

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BANT DURDURAN PARABOLİK REFLEKTÖR
TASARIMI VE ELEKTRİKSEL TESTLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hacı Kadir KAYAĞ

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hilmi NİŞANCI

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BANT DURDURAN PARABOLİK REFLEKTÖR
TASARIMI VE ELEKTRİKSEL TESTLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hacı Kadir KAYAĞ

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

Bu tez 14.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Abdullah FERİKOĞLU
Jüri Başkanı

Doç. Dr. Mehmet
Recep BOZKURT
Üye

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet
Hilmi 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.

Hacı Kadir KAYAĞ
Elektrik-Elektronik Mühendisi
05/07/2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana yol gösteren, değerli bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen ve her konuda bana destek sağlayan başta danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hilmi NİŞANCI olmak üzere tüm hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Doğumumdan şu ana kadar maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her kararında yanımda olan, bu zorlu süreçte bana sabır ve anlayışla yaklaşan kıymetli aileme canı gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca, tezimin gerçekleştirilmesinde 115E285 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
ANTENLER.....	3
2.1. Antenler	3
2.2. Antenlerin Matematiksel Eşdeğeri	4
2.2.1. Verici tipi antenlerin eşdeğer devre modeli	5
2.2.2. Alıcı tipi antenin eşdeğer devre modeli.....	5
2.3. Antenlerdeki Temel Parametreler	6
2.3.1. Işıma örüntüsü	6
2.3.2. Işıma güç yoğunluğu	7
2.3.3. Işıma şiddeti	8
2.3.4. Hüzme genişliği.....	8
2.3.5. Yönlülük.....	8
2.3.6. Anten verimliliği	9
2.3.7. Kazanç.....	10
2.3.8. Bant genişliği.....	10

2.3.9. Kutuplanma	11
2.3.9.1. Doğrusal kutuplanma	11
2.3.9.2. Dairesel kutuplanma	12
2.3.9.3. Eliptik kutuplanma.....	12
2.3.10. Giriş empedansı.....	13
2.4. Anten Türleri	13
2.4.1. Tel antenler.....	13
2.4.2. Açıklık antenleri.....	14
2.4.3. Mikro şerit antenler	15
2.4.4. Dizi antenler	15
2.4.5. Mercek antenler	16
2.4.6. Reflektör antenler.....	17
2.5. Parabolik Reflektörler Antenler	18
2.5.1. Parabolik reflektör anten yapısı.....	18
2.5.2. Parabolik reflektör antenlerin ışıma örüntüsü	22
2.5.3. Parabolik reflektör antenlerin çeşitleri	22
2.5.3.1. Simetrik veya eksen-simetrik antenler.....	22
2.5.3.2. Offset antenler.....	23
2.5.3.3. Cassegrain ve gregorain antenler.....	25
2.5.4. Parabolik reflektör antenlerde açıklık yüzeyin ışıma ilişkisi	26

BÖLÜM 3.

FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER.....	29
3.1. Frekans Seçici Yüzeylerde Frekans Özelliklerini Belirleyen Faktörler	30
3.1.1. FSY tasarımında kullanılan elemanların geometrisi ve boyutları	30
3.1.2. FSY tasarımında kullanılan elemanların iletkenliği.....	33
3.1.3. FSY tasarımında kullanılan dielektrik tabakaları.....	33
3.1.4. Elektromanyetik dalganın FSY'e geliş açısı ve polarizasyon	34
3.2. Frekans Seçici Yüzey Analizinde Uygulama Yöntemleri.....	37
3.2.1. Momentler metodu	37
3.2.2. Sonlu elemanlar metodu.....	37
3.2.3. Zaman domeninde sonlu farklar metodu.....	38

3.2.4. Ortak empedans metodu.....	38
3.2.5. Eşdeğer devre modeli	38
BÖLÜM 4.	
BANT DURDURAN FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI	39
4.1. Düzlemsel Yüzeye Sahip Bant Durduran FSY'nin Parametre Analizi	41
4.2. Parabolik Bant Durduran Reflektör Tasarımı ve Nümerik Analiz	
Sonuçları.....	46
BÖLÜM 5.	
PROTOTİP ÜRETİMİ	54
5.1. Üretimde Kullanılacak Gereç ve Yöntemler	54
5.2. Düzlemsel Yüzeye Sahip Frekans Seçici Yüzey Üretim Aşamaları....	56
5.3. Parabolik Yüzeye Sahip Frekans Seçici Yüzey Üretim Aşamaları.....	58
BÖLÜM 6.	
ÖLÇÜM SONUÇLARI	63
6.1. Düzlemsel Yüzeye Sahip FSY'nin Elektriksel Testleri	63
6.2. Parabolik Yüzeye Sahip FSY'nin Elektriksel Testleri	64
BÖLÜM 7.	
SONUÇ	68
KAYNAKÇA.....	69
ÖZGEÇMİŞ	71

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

BG	: Bant genişliği
C	: Kondansatör
CST	: Computer Simulation Technology
D	: Yönlülük
d	: Takviye malzemelerinin çapı
E	: Elektrik alan şiddeti(volt/metre)
EC	: Eşdeğer devre modeli (Equivalent Circuit Models)
f	: Odak noktasının uzaklığı
FDTD	: Zaman domeninde sonlu farklar metodu (Finite Difference Time Domain)
FEM	: Sonlu elemanlar metodu (Finite element Method)
f_r	: Rezonans frekansı
FSY	: Frekans Seçici Yüzeyler
FSS	: Frequency Selective Surfaces
g	: İletken yamalar arasındaki mesafe
I	: Antenin akımını (amper)
l	: Süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları
L	: Bobin
MOM:	: Momentler metodu (Method of moments)
p	: FSY'nin rezonans frekansının periyot uzunluğu
P_{rad}	: Toplam ışıma gücü
R	: Direnç
R_L	: Kaynak direncini (ohm)
R_r	: Radyasyon direncini (ohm)
s	: Süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki düşey boşluklar
t	: Tutucu malzemenin kalınlığı

U	: Işıma şiddetinin
V_g	: Verici devrenin çıkış gerilimini (volt)
V_R	: Alıcı devreye aktarılan gerilimi (volt)
VSWR	: Gerilim duran dalga oranına
w	: Süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki yatay boşluklar
X_A	: Anten reaktansını (ohm)
Z_0	: Anten hattının karakteristik empedansını (ohm)
Z_g	: Verici devrenin empedansını (ohm)
Z_{in}	: Antenin giriş empedansı
W_{rad}	: Işıma güç yoğunluğunu
Γ	: Yansıma katsayısı
ϵ_r	: Tutucu malzemenin bağıl dielektrik geçirgenliği
η	: Öz empedansı
σ	: Takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği
ϵ_{eff}	: Efektif dielektrik sabiti

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bilgisayarlı kablosuz iletişimin temel çalışma diyagramı [7].....	4
Şekil 2.2. Verici tipi anten devresinin temel çalışma yapısı ve eşdeğer devre modeli [8].	5
Şekil 2.3. Alıcı tipi anten devresinin temel çalışma yapısı ve eşdeğer devre modeli [8].	6
Şekil 2.4. Işıma örüntüsü [9].....	7
Şekil 2.5. Antenin referans terminalleri ve kayıpları [8].	10
Şekil 2.6. Bant genişliği [5].....	11
Şekil 2.7. (a) Doğrusal kutuplanmış, (b) dairesel kutuplanmış ve (c) eliptik kutuplanmış elektromanyetik dalga.....	12
Şekil 2.8. Farklı geometrilere sahip tel antenler.	14
Şekil 2.9. Açıklık anten türleri.	14
Şekil 2.10. Mikro şerit anten.	15
Şekil 2.11. Dizi anten geometrileri.	16
Şekil 2.12. Mercek anten türevleri [8].	17
Şekil 2.13. Reflektör anten türevleri [8].....	18
Şekil 2.14. Parabolik reflektör antenin temel kısımları.....	19
Şekil 2.15. Yansıtıcı yüzeyi ızgara biçiminde olan parabolik reflektör anten.	20
Şekil 2.16. Eksen-simetrik parabolik reflektör anten modeli.....	23
Şekil 2.17. Offset parabolik reflektör anten modeli.	23
Şekil 2.18. (a) Eksen simetrik anten ve (b) offset parabolik reflektör anten geometrileri [10].....	24
Şekil 2.19. (a) Cassegrain anten ve (b) Gregorain anten modelleri.	25
Şekil 2.20. Düzgün dağılımlı ışıma [11].	26
Şekil 2.21. Horn anten ışıması [11].....	27

Şekil 2.22. Yansıtıcı yüzey ile besleme antenin arasındaki uyumsuz ışıma kayıpları [11].	27
Şekil 2.23. Farklı ışımalarda ortaya çıkan kayıplar [11].	28
Şekil 3.1. Frekans seçici yüzeyler ve temel filtre karakteristikleri [13].	30
Şekil 3.2. FSY’lerde kullanılan elemanların geometrik şekilleri [2].	31
Şekil 3.3. Kayıplı iletken kare yamalardan oluşan FSY ve FSY’nin frekans karakteristiği ve eşdeğer devre modeli [13].	32
Şekil 3.4. İç içe geçirilmiş kare döngülerden meydana gelmiş bir FSY’nin frekans karakteristiği ve eşdeğer devre modeli [13].	32
Şekil 3.5. Dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiş iletken yamalardan oluşturulmuş FSY.	33
Şekil 3.6. (a) Dielektrik malzemenin arasına yerleştirilmiş FSY, (b) dielektrik malzemenin tek yüzüne yerleştirilmiş FSY [13].	34
Şekil 3.7. Elektromanyetik dalganın yüzeye çarpma açısına göre yüzeydeki iletken yamalara olan mesafenin değişimi [13].	36
Şekil 3.8. Elektromanyetik dalganın yüzeye çarpma açısına göre yüzeydeki iletken yamalara olan mesafenin değişimi [13].	36
Şekil 4.1. Bant durduran kompozit FSY’nin tasarım parametreleri (a) ön görünüş, (b) perspektif görünüş.	40
Şekil 4.2. Bant durduran düzlemsel yüzeye sahip FSY’nin frekansa bağlı iletim ve yansıma katsayı değerleri.	41
Şekil 4.3. Bant durduran düzlemsel yüzeye sahip FSY’nin tutucu malzemenin farklı bağıl geçirgenlik değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.	42
Şekil 4.4. Bant durduran düzlemsel yüzeye sahip FSY’nin takviye malzemelerinin farklı uzunluk değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.	43
Şekil 4.5. Bant durduran düzlemsel yüzeye sahip FSY’nin takviye malzemeleri arasındaki farklı düşey boşluk değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.	44
Şekil 4.6. Bant durduran düzlemsel yüzeye sahip FSY’nin takviye malzemeleri arasındaki farklı yatay boşluk değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.	44

Şekil 4.7. Bant durdurucu düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin tutucu malzemenin farklı kalınlık değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.....	45
Şekil 4.8. Bant durdurucu düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin takviye malzemelerinin farklı çap değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.	45
Şekil 4.9. Piramidal horn antenin tasarım parametre değerleri.	46
Şekil 4.10. Piramidal horn antenin geri dönüş kaybı.	46
Şekil 4.11. Horn antenin 2D ışıma örüntüsü.	47
Şekil 4.12. Horn antenin 3D ışıma örüntüsü.	47
Şekil 4.13. Metal parabolik reflektörün tasarım parametre değerleri.	48
Şekil 4.14. Metal parabolik reflektörün geri dönüş kaybı.....	48
Şekil 4.15. Metal parabolik reflektörün 2D ışıma örüntüsü.....	49
Şekil 4.16. Metal parabolik reflektörün 3D ışıma örüntüsü.	49
Şekil 4.17. Parabolik bant durdurucu FSY reflektörün bileşenleri.	50
Şekil 4.18. Parabolik bant durdurucu FSY reflektörün tasarım parametreleri.....	50
Şekil 4.19. Parabolik bant durdurucu FSY reflektörün geri dönüş kaybı.	51
Şekil 4.20. Parabolik bant durdurucu FSY reflektörün 2D ışıma örüntüsü.	51
Şekil 4.21. Parabolik bant durdurucu FSY reflektörün 3D ışıma örüntüsü.	52
Şekil 4.22. Metal parabolik reflektör ile parabolik bant durdurucu FSY reflektörün geri dönüş kayıplarının karşılaştırılması.	52
Şekil 4.23. Metal parabolik reflektör ile parabolik bant durdurucu FSY reflektörün ışıma örüntülerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 5.1. Epakem EP-100 marka şeffaf epoksi reçine ve sertleştirici.....	55
Şekil 5.2. 100 cm uzunluklu GEKA S-6A AL 99.5 marka alüminyum teller.	55
Şekil 5.3. Tel erozyon yöntemi ile kesilmiş alüminyum teller.	56
Şekil 5.4. Prototip üretiminde kullanılan ahşap kalıp.	57
Şekil 5.5. Prototip üretimi tamamlanan düzlemsel yüzeye sahip bant durdurucu FSY.	57
Şekil 5.6. (a) Takviye malzemelerinin şablon kâğıt ve streç film üzerine konumlandırılmaları, (b) takviye malzemelerinin streç film üzerine sabitlenmeleri ve (c) parabolik bant durdurucu FSY üretiminde kullanılmak üzere dizilimleri tamamlanan takviye malzemeleri.....	59
Şekil 5.7. Dizilimi yapılmış şeffaf folyonun anten kalıba yerleştirilmiş hali.	59

Şekil 5.8. Şeffaf folyonun dış bükey anten kalıba yerleştirmiş hali.....	60
Şekil 5.9. Epoksi dökülmeye hazır hale getirilmiş kalıbın yan görünüşü.	60
Şekil 5.10. Prototip üretimleri tamamlanan parabolik bant durduran FSY reflektör.	61
Şekil 5.11. Montaj işlemi yapılan parabolik bant durduran FSY reflektör (a) perspektif, (b) ön görünüş.	62
Şekil 6.1. Düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin elektriksel testlerinde kullanılan serbest uzay ölçüm düzeneğine ait (a) şematik gösterim ve (b) fotoğraf.	64
Şekil 6.2. Düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin ölçümler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim parametre değerlerinin simülasyonlar ile karşılaştırılması..	64
Şekil 6.3. Parabolik reflektörlerin elektriksel testlerinde kullanılan tam yansımaz oda ölçüm düzeneğine ait (a) şematik gösterim ve (b) fotoğraf.	65
Şekil 6.4. Metal parabolik reflektörün ölçümler sonucu elde edilen geri dönüş kaybının simülasyonlar ile karşılaştırılması.	65
Şekil 6.5. Metal parabolik reflektörün ölçümler sonucu elde edilen ışıma örüntüsünün simülasyonlar ile karşılaştırılması.	66
Şekil 6.6. Parabolik yüzeye sahip FSY'nin ölçümler sonucu elde edilen geri dönüş kaybının simülasyonlar ile karşılaştırılması.	67
Şekil 6.7. Parabolik bant durduran FSY reflektörün ölçümler sonucu elde edilen ışıma örüntüsünün simülasyonlar ile karşılaştırılması.....	67

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. 10 GHz çalışma frekansı için tek bantlı bant durduran FSY'nin parametre değerleri.....	40
Tablo 4.2. Düzlemsel yüzeye sahip bant durduran FSY'nin parametre analizlerinde kullanılan değerler	42

ÖZET

Anahtar kelimeler: Frekans Seçici Yüzeyler, Elektromanyetik Filtreler, Parabolik Reflektörler, Antenler

Günümüzde kablosuz haberleşme sistemlerinin gelişmesiyle, iletişim için kullanılan frekans bant aralığı birkaç yüz kilo Hertz 'den başlayıp birkaç yüz Giga Hertz'lere kadar ulaşmaktadır. Bilindiği gibi kablosuz haberleşme sistemlerinin en temel elemanları boşlukta yayılan elektromanyetik dalgaları toplayarak elektrik akımına çeviren alıcı ve elektrik akımını elektromanyetik dalgalara çevirip boşlukta yayılmasını sağlayan verici antenlerdir. Haberleşme sistemlerinde kullanılan antenlerin fiziksel büyüklüğü ve yapısal özellikleri çalışma frekansının değerine göre değişmektedir. Literatürde monopol, dipol, mikro şerit, yarık, huni, parabolik yansıtıcı vb. gibi farklı yapısal özelliklerde antenlerin mevcut olduğu görülmektedir. Önerilen çalışmada sivil ve askeri haberleşme sistemlerinde kullanılması amacıyla çalışma frekansında bant durduran filtre karakteristiğine sahip parabolik reflektör tasarımı, nümerik analizleri ve prototip üretimi hedeflenmiştir. Bu amaçla ilk olarak antenler ile ilgili teorik bilgilere yer verilmiş daha sonra literatürdeki bant durduran, bant geçiren, alçak geçiren ve yüksek geçiren filtre karakteristiğine sahip frekans seçici yüzeyler incelenmiştir. Mevcut çalışmalar FSF'lerin genellikle iki boyutlu bir yapıya sahip olduklarını ve baskı devre kartı üzerine konumlandırıldıklarını göstermiştir. Bu tez çalışmasında, elektriksel karakteristiğinin yanında fiziksel performansının da iyileştirilmesi amacıyla literatürden farklı olarak yalıtkan tutucu malzeme içerisine dairesel kesitli sonlu uzunlukta iletken takviye malzemelerinin periyodik olarak konumlandırılmaları ile elde edilen özgün parabolik FSF modeli önerilmiştir. Önerilen modelin, istenilen çalışma frekansı için parametre değerleri Computer Simulation Technology (CST) programı kullanılarak elde edilmiştir. Tez çalışmasının son aşamasında parabolik FSF'nin prototip üretimi gerçekleştirilerek nümerik analiz sonuçları ölçümler ile doğrulanmıştır.

BAND-STOP PARABOLIC REFLECTOR DESIGN AND ELECTRICAL TESTS

SUMMARY

Keywords: Frequency Selective Surfaces, Elektromagnetik Filters, Parabolic Reflectors, Antennas

Nowadays, the frequency bandwidth increased from a few hundred kilo hertz to a few giga hertz by the improvement of wireless communication systems. As it is known, the most basic elements of wireless communication systems are the receiver antenna that collects the electromagnetic waves emitted in the space and converts them into electrical current and the transmitter antenna that converts the electrical current into electromagnetic waves and spreads into the space. Size and structural feature of the antennas which are used in communication systems changes up to the value of operating frequency. In the literature, it can be seen that different structural featured antennas such as; monopole, dipole, micro-stripe, slot, horn and parabolic reflector are existing. In the proposed study, in order to used in civil and military communication systems, it is aimed to design, numerical analysis and prototype production of a parabolic reflector which has a band stop filter characteristic. For this purpose, firstly theoretical information about antennas are given in this thesis, then, frequency selective surfaces such as, band-stop, band-pass, low-pass and high-pass filter characteristics are studied. Existing studies show that frequency selective surfaces (FSSs) have two dimensional structure and located on the printed circuit board. In this thesis, in order to improve the physical performance as well as its electrical characteristics, a novel parabolic FSS model obtained by periodically positioning of finite length conductive fibers with circular cross-section into the host material is proposed. Computer Simulation Technology (CST) is used to obtain the parameter values of the proposed model for desired operating frequency values. At the end of thesis, parabolic FSS is produced and numerical results are validated by measurements.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanoğlu geçmişten günümüze kadar uzak mesafedeki insanlarla iletişim halinde olmak istemiştir. İletişim insanoğlu için zamanla vazgeçilmez bir temel ihtiyaç haline dönüşmüştür. İnsanlık bu zorunlu temel ihtiyacı karşılamak için farklı metotlar ve yollar geliştirmeye çabalamış ve günümüz haberleşme sistemlerinin oluşmasına neden olmuştur. Bunun için ilk zamanlarda ateş yakma, duman, davul, boru, düdük gibi imkânlar geliştirip kullanmışlardır. Günümüzde ise bu iletişim gereksinimi için haberleşme sistemleri kullanılmaktadır. Herhangi bir bilginin zaman ve uzayda gönderici adı verilen noktadan, alıcı adı verilen noktaya iletilmesine haberleşme, haberleşmeyi oluşturan yapıların ve parçaların tamamına ise haberleşme sistemleri denir.

Haberleşme sistemlerinde reflektör antenler dar hüzmeye genişliğine ve yüksek kazançlı ışığa karakteristiğine sahip olmalarından dolayı başta uydu haberleşmeleri ve radarlar olmak üzere birçok askeri ve sivil uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Reflektör antenlerin yansıtıcı yüzeyleri genellikle iletkenliği yüksek metallerden imal edilirler. Optik kurallarına uygun olarak davranan yansıtıcı yüzeyler uzak mesafeden üzerine gelen elektromanyetik dalgaları odak noktasında toplarken odak noktasından gönderilen EM dalgaları ise asal eksene paralel bir şekilde yansıtırlar.

Frekans seçici yüzeyler ise elektromanyetik dalgalara karşı bant durduran, bant geçiren, alçak geçiren ve yüksek geçiren filtre karakteristiği gösteren yapılardır. Genellikle radar antenlerinde kaplama malzemesi olarak kullanılırlar. Bu kaplama malzemeleri ingilizcede radar ve dome kelimelerinin birleşiminden oluşan radom (radome) olarak adlandırılırlar. Radomlar radar antenlerini ve radar sistemlerini kar, yağmur, nem, rutubet, rüzgâr, toz gibi olumsuz hava etkilerine karşı fiziksel olarak

korurken EM anlamda çalışma frekansında bant geçiren filtre gibi davranarak antenin yayılım karakteristiğini bozmadan işlevini yerine getirmesini sağlarlar.

Bu çalışmada, çalışma frekansında bant durduran diğer frekanslarda ise bant geçiren filtre karakteristiğine sahip özgün parabolik FSY reflektör tasarımı amaçlanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak epoksi tutucu malzeme içine konumlandırılmış dairesel kesitli süreksiz alüminyum takviye malzemesi içeren düzlemsel bant durduran FSY modeli önerilmiştir. Kullanılan alüminyum takviye malzemelerinin dairesel kesitli ve süreksiz olmaları sayesinde önerilen modelin elektriksel performansının yanında tasarım serbestliği, kolay üretim, hafif ve sağlam yapı gibi mekanik avantajlar sağlaması da hedeflenmiştir.

Çalışmada ilk olarak önerilen düzlemsel yapının parametre analizleri yapılmış ve tasarım parametrelerinin çalışma frekansı üzerindeki etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Daha sonra düzlemsel bant durduran FSY modeli parabolik reflektör yüzeye uygulanmış ve yansıtıcının performansı geri dönüş kaybı, ışıma örüntüsü, yönlendiricilik gibi temel anten parametreleri göz önüne alınarak irdelenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında düzlemsel bant durduran FSY ile parabolik bant durduran FSY reflektörün nümerik analiz sonuçlarının doğrulanması için prototip üretimlerine başlanmıştır. Prototip üretimlerinde hem ekonomik oluşu hem de ileri teknoloji gerektirmeyişinden dolayı fiber takviyeli kompozit panel üretimlerinde yaygın olarak tercih edilen elle yatırma yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmanın son aşamasında üretimleri tamamlanan prototiplerin elektriksel testleri yapılmıştır. Düzlemsel bant durduran FSY ile parabolik bant durduran FSY reflektörün elektriksel testlerinde sırası ile serbest uzay ve tam yansısız oda test düzenekleri kullanılmıştır. Serbest uzay test düzeneği kullanılarak düzlemsel FSY'nin frekansa bağlı iletim parametre değerleri elde edilirken tam yansısız oda test düzeneği kullanılarak parabolik FSY reflektörün geri dönüş kaybı ile ışıma örüntüsü elde edilmiştir. Son olarak, elde edilen elektriksel test sonuçları ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçlar arasındaki uyum incelenmiştir.

BÖLÜM 2. ANTENLER

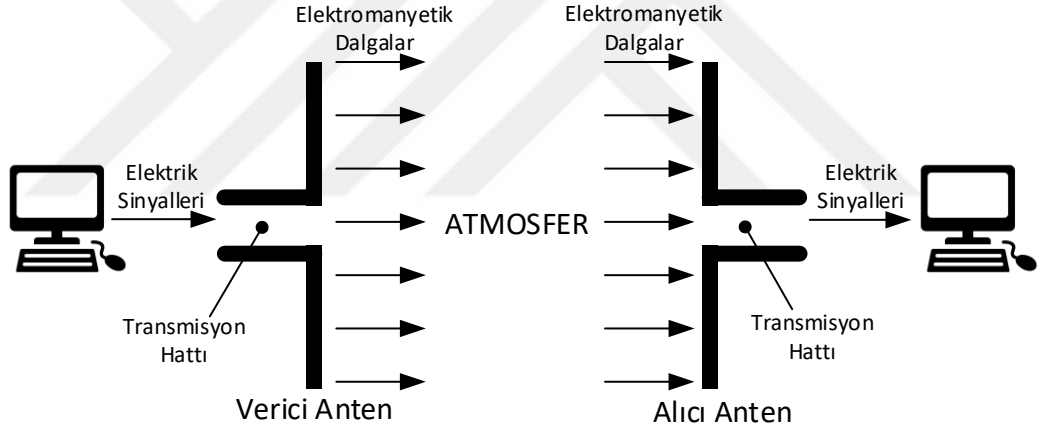
Bu bölümde antenler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Işıma örüntüsü, bant genişliği, gerilim duran dalga oranı, geri dönüş kaybı, kutuplanma gibi temel anten parametreleri açıklanmış ve farklı anten türleri ile antenlerin kullanım alanlarından bahsedilmiştir. İkinci bölüm parabolik reflektör antenler ile ilgili detaylı bilgi verilerek tamamlanmıştır.

2.1. Antenler

Antenlerin tarihçesi incelendiğinde James Clerk Maxwell'in çalışmalarına dayandığı görülmektedir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilmiş denklemler kullanılarak elektromanyetik alan dalgaları hesaplanabilir hale getirilmiştir. Maxwell ayrıca yaptığı çalışmalarda, ışığın da bir elektromanyetik dalga olduğunu göstermiştir. Daha sonraki yıllarda Profesör Heinrich Rudolph Hertz, Maxwell denklemlerini kullanarak kablosuz elektromanyetik sistemini oluşturmuştur. 2. Dünya savaşından sonra, yeni anten türleri ortaya çıkmaya başlamış ve bu anten türlerine büyük önem verilerek geliştirilmeleri sürdürülmüştür [1,6,7,8,9].

Kablosuz iletişim teknolojisinin vazgeçilmez elemanı olan antenler, elektromanyetik alan dalgaları ile elektrik sinyalleri arasında çift yönlü dönüşüm yapan elemanlardır. Yani, antenler verici ve alıcı olmak üzere iki farklı şekilde çalışabilmektedirler [6,9]. Dönüşümün yönüne göre verici anten veya alıcı anten olarak isimlendirilirler. Elektrik sinyallerini elektromanyetik alan dalgalarına dönüştüreene “verici anten”, elektromanyetik alan dalgalarını elektriksel sinyallere dönüştüreene ise “alıcı anten” adı verilmektedir. Antenler iletim hattı olarak uzay boşluğu veya atmosferi kullanmaktadırlar [6].

1960'lara gelindiğinde ise bilgisayar teknolojisiyle birleştirilen antenler, kablosuz bilgisayar iletişiminin temellerini oluşturmaktadır. Bilgisayardan gönderilen sinyaller, antenin transmisyon hattına iletilmesiyle, elektriksel sinyallerden elektromanyetik dalgalara dönüştürülmektedir [6,8]. Dönüşümü yapılan bu dalgaların yansıtıcı yüzeye çarparak, dalganın atmosfere yayılımı gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler sonucunda bilgisayardaki bilginin başka bir alıcıya kablosuz bir şekilde erişimi sağlanmaktadır. Başka bir konumda bulunan alıcı antenin yansıtıcı yüzeyine çarpan elektromanyetik dalgalar alıcı antenin odak noktasında toplanmaktadır. Toplanan dalgalar transmisyon hattına iletilerek elektrik sinyallerine dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Üretilen sinyaller, bilgisayara iletilerek bir verinin kablosuz haberleşme yöntemiyle taşınması sağlanmaktadır. Şekil 2.1.'de, alıcı ve verici antenler kullanılarak, bilgisayarlar arasında kablosuz iletişimin temel çalışma yapısı gösterilmiştir [7].



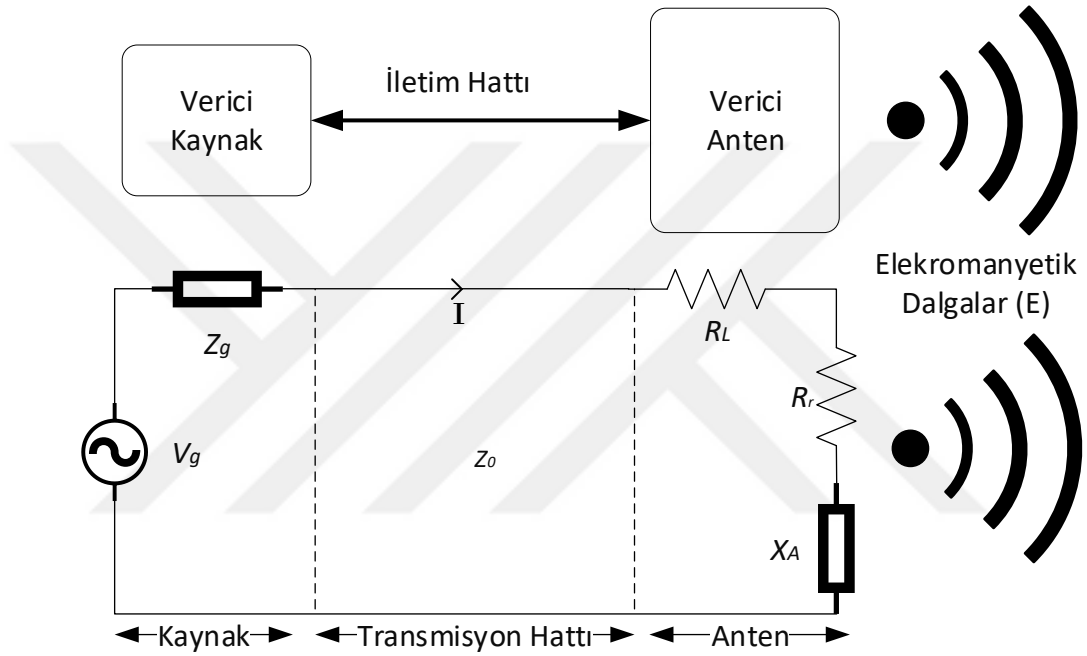
Şekil 2.1. Bilgisayarlı kablosuz iletişimin temel çalışma diyagramı [7].

2.2. Antenlerin Matematiksel Eşdeğeri

Antenlerin tasarımlarına öncelikle eşdeğer devre modellerinin oluşturulması ile başlanılmaktadır. Antenlerin eşdeğer devre modelleri devre teorileri kullanılarak çıkartılmakta ve teorik parametre analizlerinde kullanılmaktadırlar [8,9].

2.2.1. Verici tipi antenlerin eşdeğer devre modeli

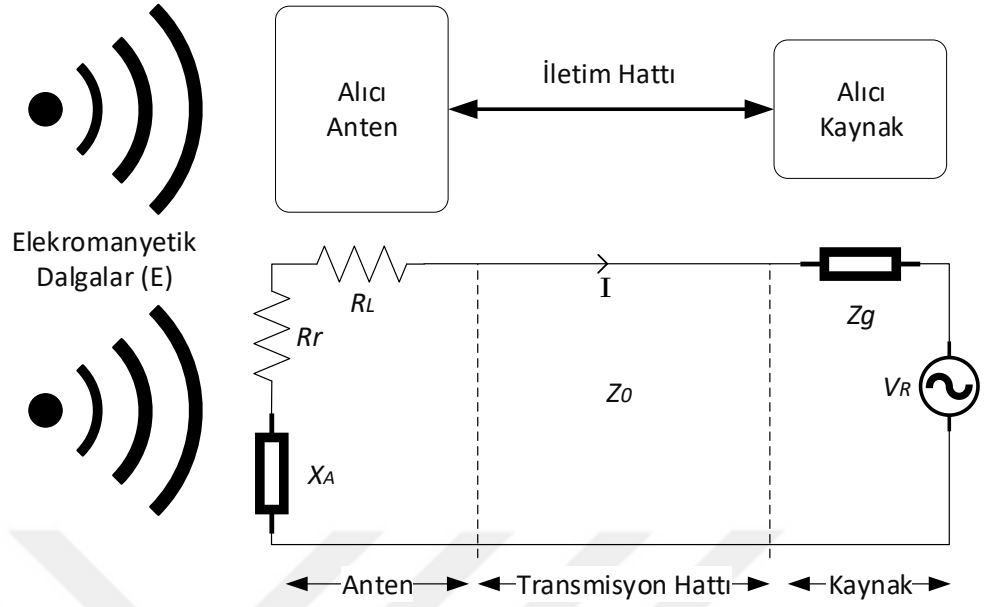
Verici tipi antenin eşdeğer devre modeli Şekil 2.2.'de verilmektedir. Şekil 2.2.'de R_r radyasyon direncini (ohm), R_L kaynak direncini (ohm), X_A anten reaktansını (ohm), V_g verici devrenin çıkış gerilimini (Volt), I antenin akımını (Amper), Z_g verici devrenin empedansını (ohm), Z_0 antene giden hattın karakteristik empedansını (ohm) göstermektedir [8,9].



Şekil 2.2. Verici tipi anten devresinin temel çalışma yapısı ve eşdeğer devre modeli [8].

2.2.2. Alıcı tipi antenin eşdeğer devre modeli

Alıcı tipi antenin eşdeğer devre modeli Şekil 2.3.'te gösterilmektedir. Şekil 2.3.'te E gelen dalganın elektrik alan şiddetini (Volt/metre), R_L alıcı devrenin empedansını (ohm), R_r alıcı devre giriş direncini (ohm), X_A anten reaktansını (ohm), Z_0 anten hattının karakteristik empedansını (ohm), V_R alıcı devreye aktarılan gerilimi (Volt) belirtmektedir [7,8,9].



Şekil 2.3. Alıcı tipi anten devresinin temel çalışma yapısı ve eşdeğer devre modeli [8].

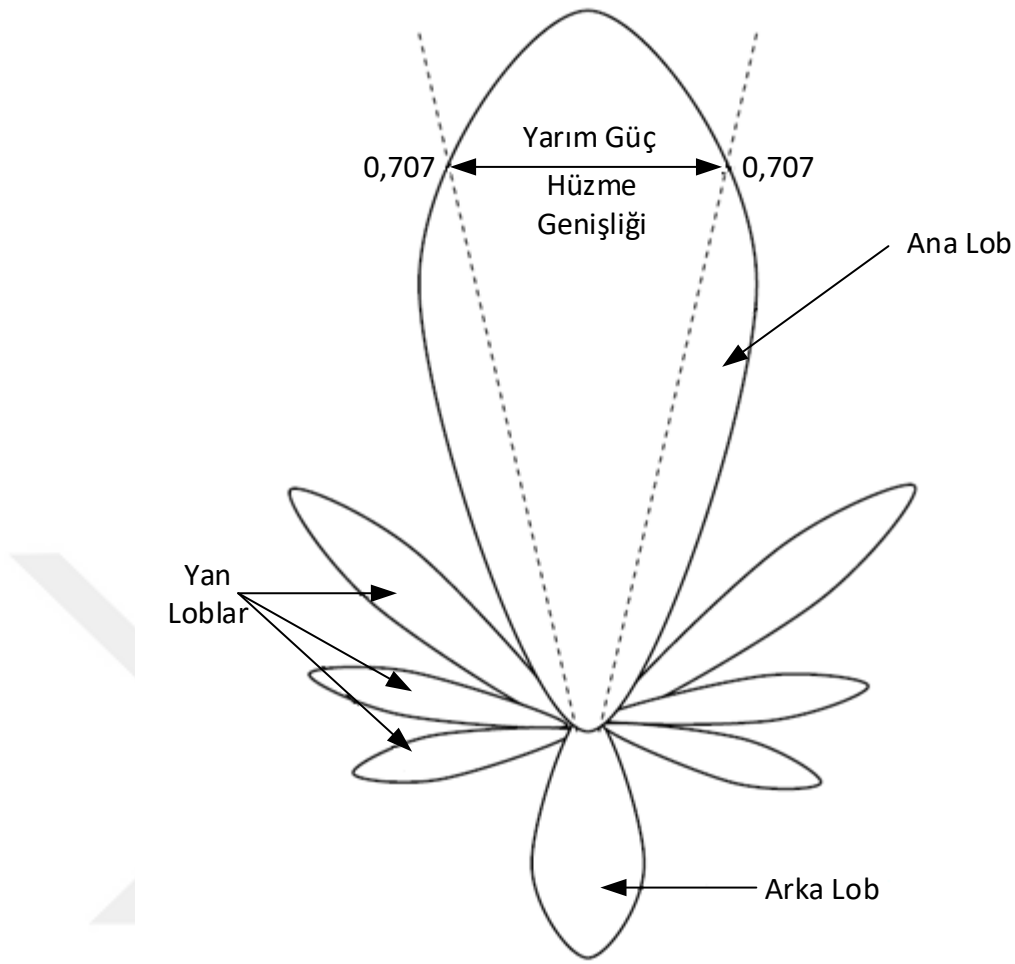
2.3. Antenlerdeki Temel Parametreler

Bir antenin performansı veya karakteristik özellikleri ışıma örüntüsü, ışıma güç yoğunluğu, ışıma şiddeti, hüzmeye genişliği, yönlülüğü, verimliliği, kazancı, bant genişliği, kutuplanması, giriş empedansı vb. parametreler aracılığıyla tanımlanmaktadır. Birbiri ile bağıntılı bu parametreler kullanılarak parametrenin birinden, bir diğerine geçiş kolaylıkla yapılabilmektedir [7,8].

2.3.1. Işıma örüntüsü

Işıma örüntüsü veya anten örüntüsü, bir antenin uzay koordinatlarının ve ışıma özelliklerinin bir fonksiyon olarak matematiksel bir ifadesi veya iki boyutlu grafiksel bir gösterimidir [8]. Bu grafiğe bakılarak bir anten ile ilgili ışıma yönü tayin edilmektedir. Şekil 2.4.'te verilen ışıma örüntüsünün üç ayrı lobdan meydana geldiği görülmektedir. Bunlar; ana lob, yan lob ve arka lob olarak isimlendirilmektedir. Ana lob antenin istenilen yönde yaptığı ışımadır. Yan ve arka loblar ise antenden yayılması istenmeyen yöndeki ışımalardır ve bu ışımlar antenin kaybını artırmaktadır.

Yan ve arka lobların küçük olması antenin ışıma için kaynaktan çekilen enerjinin daha fazlasının istenilen yönde ışıma yapması anlamına gelmektedir [6,7,8,9].



Şekil 2.4. Işıma örüntüsü [9].

2.3.2. Işıma güç yoğunluğu

Elektromanyetik dalgalar bir noktadan başka bir noktaya antenler vasıtasıyla iletilmektedir. Bu bilgiden yola çıkılarak güç ve enerjinin, elektromanyetik alan dalgalarıyla bir ilgisi olduğu kanısına varılmaktadır. Işıma güç yoğunluğu (W_{rad}), uzak alan bölgesinde geçerli olması şartıyla elektrik alan şiddeti (E) ve öz empedansı (η) kullanılarak Eşitlik 2.1'deki gibi tanımlanmaktadır [6,7].

$$W_{rad} = \frac{|E(R, \theta, \phi)|^2}{2\eta} \quad (2.1)$$

2.3.3. Işıma şiddeti

Belirli bir yönde, birim katı açı (steradyan) başına antenin yayabildiği güce “ışırma gücü” adı verilmektedir. Işıma şiddeti, bir uzaklık parametresidir. Eşitlik 2.2’de gösterildiği gibi ışıma yoğunluğu, mesafenin karesine olan orandan hesaplanmaktadır [8,9].

$$U = r^2 W_{rad} = \frac{|E(R, \theta, \phi)|^2}{2\eta} \quad (2.2)$$

2.3.4. Hüzme genişliği

Hüzme genişliği, anten örüntüsü ile ilgili bir parametredir ve bir antenin verimi ile ilgili bilgiler vermektedir. Şekil 2.4.’te olduğu gibi yarım güç hüzme genişliğinin azalması yan lobların artmasına neden olmaktadır. Bu da anten veriminin düşük olduğu anlamına gelmektedir. Ana hüzme z-ekseni doğrultusunda ($\theta = 0$) olan bir anten için hüzme verimliliği Eşitlik 2.3’teki gibi tanımlanmaktadır [8,9].

$$BE = \frac{\theta_1 \text{ açısından alınan güç}}{\text{antenden alınan güç}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.3)$$

θ_1 ilk sıfır veya minimumun oluştuğu nokta olarak kabul edilir ise hüzme verimliliği toplam güce oranla ana lobtaki güç miktarını göstermektedir.

2.3.5. Yönlülük

Yönlülük, antenin belli bir yönde yaptığı ışıma şiddetinin, bütün yönlerde yaptığı ışıma şiddetine oranı ile hesaplanır [8,9]. Bu parametreye herhangi bir birim verilmemektedir. Antenin yönü belliyse, o yöndeki ışıması ile matematiksel işlem yapılmaktadır. Eşitlik 2.4’te yönlülüğün matematiksel karşılığı gösterilmektedir [8]. Yönlülük (D), ışıma şiddetinin (U) toplam ışıma gücüne (P_{rad}) oranının 4π katına eşittir [8,9].

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.4)$$

Antenin ışıma yönü tayin edilmemişse, maksimum ışıma yaptığı yön, belirli yön olarak tayin edilmekte ve ona göre matematiksel işlemler yapılmaktadır. Eşitlik 2.5'te maksimum yönlülüğün matematiksel karşılığı verilmektedir [8,9].

Maksimum yönlülük (D_{max}), maksimum ışıma şiddetinin (U_{max}) toplam ışıma gücüne (P_{rad}) oranının 4π katına eşittir.

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.5)$$

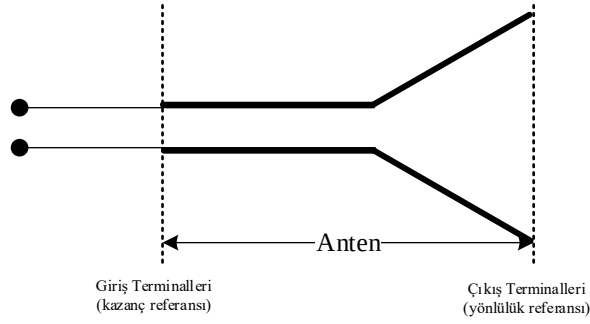
2.3.6. Anten verimliliği

Antenler, kayıplı sistemlerdir ve antene kaynaktan verilen enerjinin tamamı ışıma için harcanmamaktadır. Şekil 2.5.b'de gösterildiği gibi antenlerdeki kayıpların empedans uyumsuzluğundan kaynaklı yansımalar (Γ) ve I^2R kayıpları (eşdeğerde gösterilen direnç ve dielektrik materyallerde harcanan enerji) olmak üzere iki temel sebebi vardır [6,7,8,9].

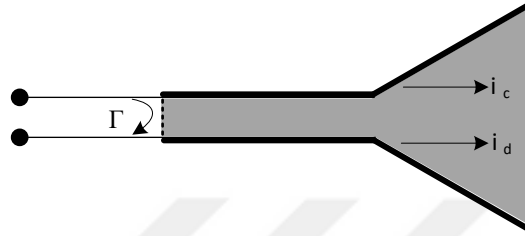
Yansımadan kaynaklanan kayıplar Eşitlik 2.6 kullanılarak hesaplanmaktadır. Z_{in} antenin giriş empedansını Z_0 ise antenin karakteristik empedansını göstermektedir. Eşitlik 2.6'den elde edilen parametreyi Eşitlik 2.7'de kullanarak gerilim duran dalga oranına (VSWR) ulaşılmaktadır [6,7,8,9].

$$\Gamma = \frac{(Z_{in} - Z_0)}{(Z_{in} + Z_0)} \quad (2.6)$$

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.7)$$



(a)Anten Referans Terminalleri



(b)Yansıma, İletim ve Dielektrik Kayıpları

Şekil 2.5. Antenin referans terminalleri ve kayıpları [8].

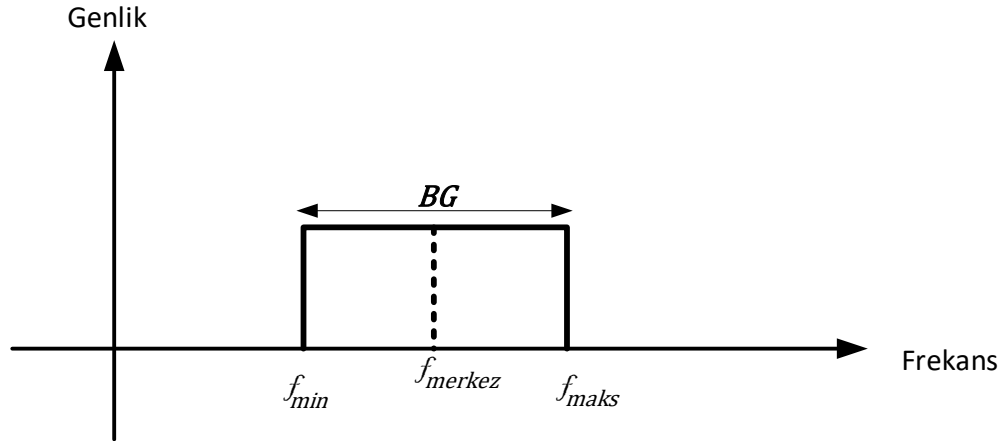
2.3.7. Kazanç

Antenlerin temel karakteristik özelliklerinden biri de kazançlarıdır. Eşitlik 2.8'de görüldüğü gibi kazanç antenin ışıma şiddetinin ($U(\theta, \phi)$), toplam antene gelen giriş gücüne ($P_{giriş}$) oranının 4π katı alınarak hesaplanmaktadır. Kazanç yönden bağımsız bir parametredir ve herhangi bir birimle ifade edilmemektedir [7,8,9].

$$Kazanç = 4\pi \frac{\text{ışıma şiddeti}}{\text{toplam giriş gücü}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{giriş}} \quad (2.8)$$

2.3.8. Bant genişliği

Bant genişliği, bir antenin işleyebileceği frekans aralığını belirten bir parametredir ve Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi, antenin çalışacağı merkez frekansının alt ve üst taraflarındaki frekans aralığını belirtmektedir [7,8,9].



Şekil 2.6. Bant genişliği [5].

Bant genişliği (BG) Eşitlik 2.9’da verilen formülle bulunmaktadır.

$$BG = f_{maks} - f_{min} \quad (2.9)$$

2.3.9. Kutuplanma

Antenin yaydığı dalganın yönüne “kutuplanma” adı verilmektedir. Kutuplanma parametresi doğrusal, dairesel ve eliptik olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Buna ek olarak, alıcı ve verici antenlerden maksimum verim isteniliyorsa antenlerin kutuplanmalarının aynı olması gerekmektedir [6,7,8,9].

2.3.9.1. Doğrusal kutuplanma

Bir harmonik dalganın, uzayda verilen bir noktadaki elektrik alan vektörü, daima aynı düz çizgi boyunca hareket ediyorsa buna “doğrusal kutuplanma” adı verilmektedir.

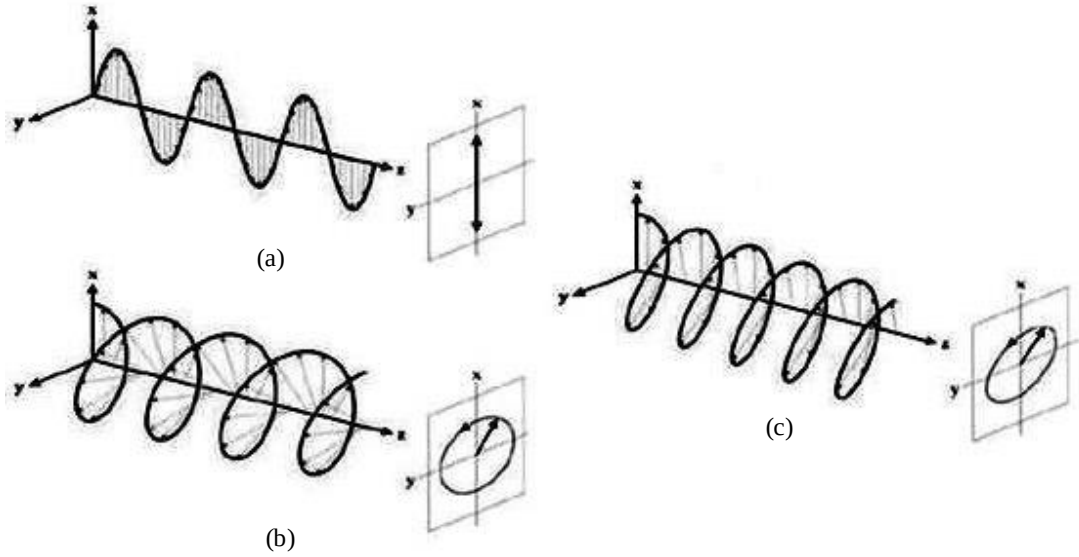
Ayrıca, doğrusal kutuplanmaya sahip bir dalga sadece bir bileşene sahip olabilirken, birden fazla bileşene sahip olacak ise, aralarında π kadar faz farkı olmalıdır [6,7,8,9].

2.3.9.2. Dairesel kutuplanma

Bir harmonik dalgaının uzayda verilen bir noktada elektrik alan vektörü, zamana bağlı fonksiyon olarak bir daire çiziyorsa bu dalga dairesel kutuplanmış olarak tanımlanmaktadır [8]. Dairesel kutuplu dalgalar, iki bileşen içermektedir ve bu iki bileşen birbirine 90° bir açıyla konumlanmaktadır. Bunlara ilave olarak, dairesel kutuplanma için iki bileşenin genlikleri eşit olmalı ve bu iki bileşen arasında faz farkı $\pi/2$ 'nin tek katlarından meydana gelmelidir [8,9].

2.3.9.3. Eliptik kutuplanma

Bir harmonik dalgaının, uzayda verilen bir noktada elektrik alan vektörünün ucu, uzayda eliptik bir şekil çiziyorsa bu tür dalgalar eliptik kutuplanmış olarak adlandırılmaktadır [8,9]. Doğrusal, dairesel ve eliptik kutuplanmalar sırası ile Şekil 2.7.a, Şekil 2.7.b ve Şekil 2.7.c'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. (a) Doğrusal kutuplanmış, (b) dairesel kutuplanmış ve (c) eliptik kutuplanmış elektromanyetik dalga

2.3.10. Giriş empedansı

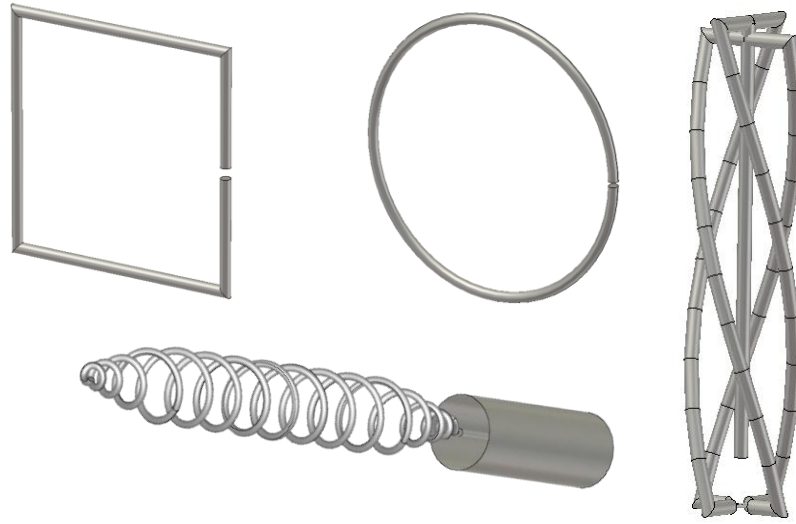
Bir antenin giriş terminalleri arasındaki voltaj akım oranı veya bir noktanın elektrik alanının, manyetik alana olan oranına “giriş empedansı” adı verilmektedir. Giriş terminalindeki empedans değerinin iletim hattındaki empedans değerine mümkün olduğunca yakın olması gerekmektedir. İki empedans değerinde dengesizlik meydana gelirse, antenden iletim hattına doğru ilerleyen dalgada, antenden kaynağa doğru yansımalar oluşmaktadır ve bu yansıyan dalgalar, sistemin kaybını arttırmaktadır [8,9].

2.4. Anten Türleri

Antenler kullanım amaçlarına ve kullanım yerlerine göre farklılık göstermektedirler. Uygulamalarda genellikle tel, açıklık, mikro şerit ve reflektör antenler sıklıkla kullanılmaktadır.

2.4.1. Tel antenler

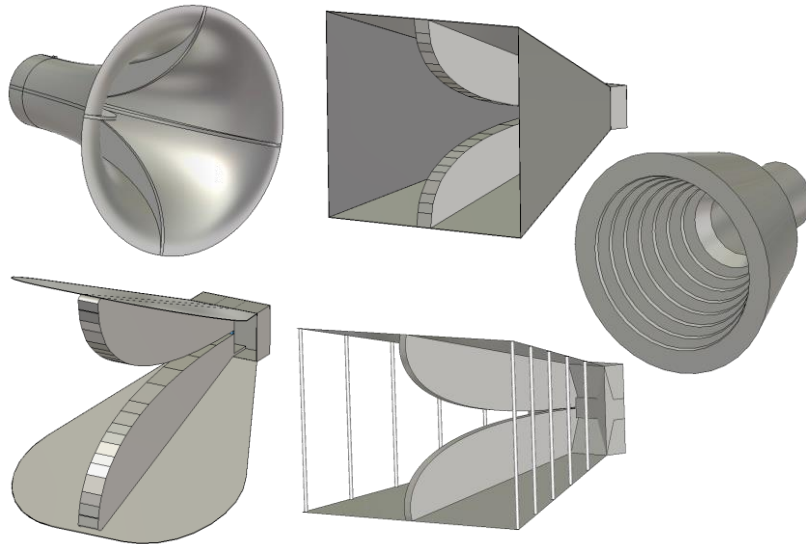
Tel antenler, binalar, gemiler, otomobiller, uçaklar ve uzay araçları gibi birçok alanda en çok kullanılan anten türü olarak bilinmektedir. Tel antenler farklı şekillerde imal edilmektedirler. Şekil 2.8.’de farklı geometrilere sahip tel antenler gösterilmiştir. Tel antenlerdeki telin bir ucu toprak, diğer bir ucu ise alınacak veya gönderilecek sinyal ucudur. Bu antenlerde bir yansıtıcı yüzey yoktur ve telin kendisi bir yansıtıcı yüzey olarak kullanılmaktadır [6,7,8,9].



Şekil 2.8. Farklı geometrilere sahip tel antenler.

2.4.2. Açıklık antenleri

Açıklık antenleri, elektromanyetik dalgalarını açıklıklarından alan veya gönderen antenlere verilen genel addır. Bu antenler Şekil 2.9.'daki gibi farklı şekillerde açıklık geometrilerine sahiptirler. Bu tür antenlerin ışıma alanları dar bir yüzey alanına sahip olmasına rağmen kazançları yüksektir. Kolay monte edilebilmeleri ve yüksek çalışma frekanslarında daha küçük boyutlarda imal edilmelerinden dolayı bu antenler hava ve uzay araçlarında sıklıkla kullanılmaktadırlar [7,8].

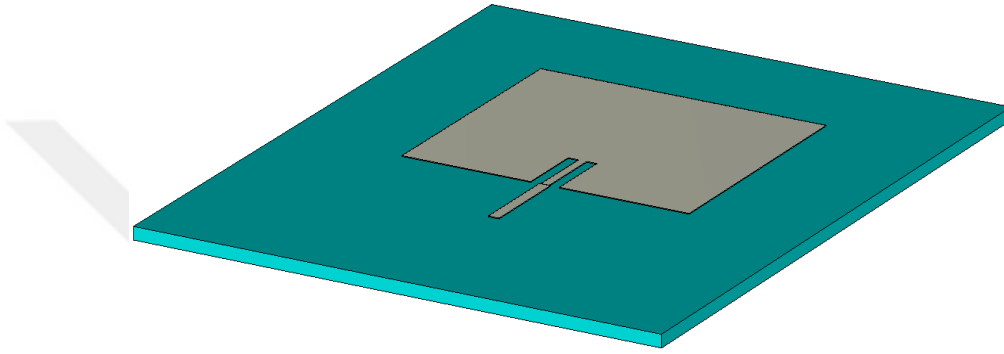


Şekil 2.9. Açıklık anten türleri.

2.4.3. Mikro şerit antenler

Mikro şerit antenler, düzlemsel bir yapıya sahiptir çok ince olarak imal edilmektedir ve antenin konumlandırılacağı yüzeyin aerodinamik yapısında bozukluklar oluşturmamaktadır. Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi bu antenlerin yapısının iki iletken tabakanın arasındaki dielektrik malzemeden meydana geldiğini görülmektedir.

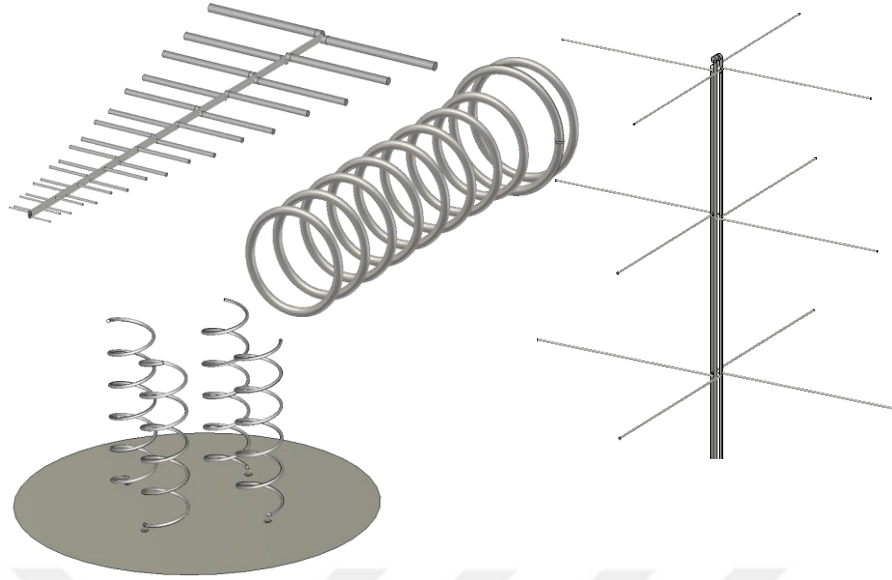
Tel antenler gibi mikro şerit antenlerin de iletken yüzeylerinden biri toprak hattı olarak kullanılırken, diğer yüzey ışıma yüzeyi olarak kullanılmaktadır [8].



Şekil 2.10. Mikro şerit anten.

2.4.4. Dizi antenler

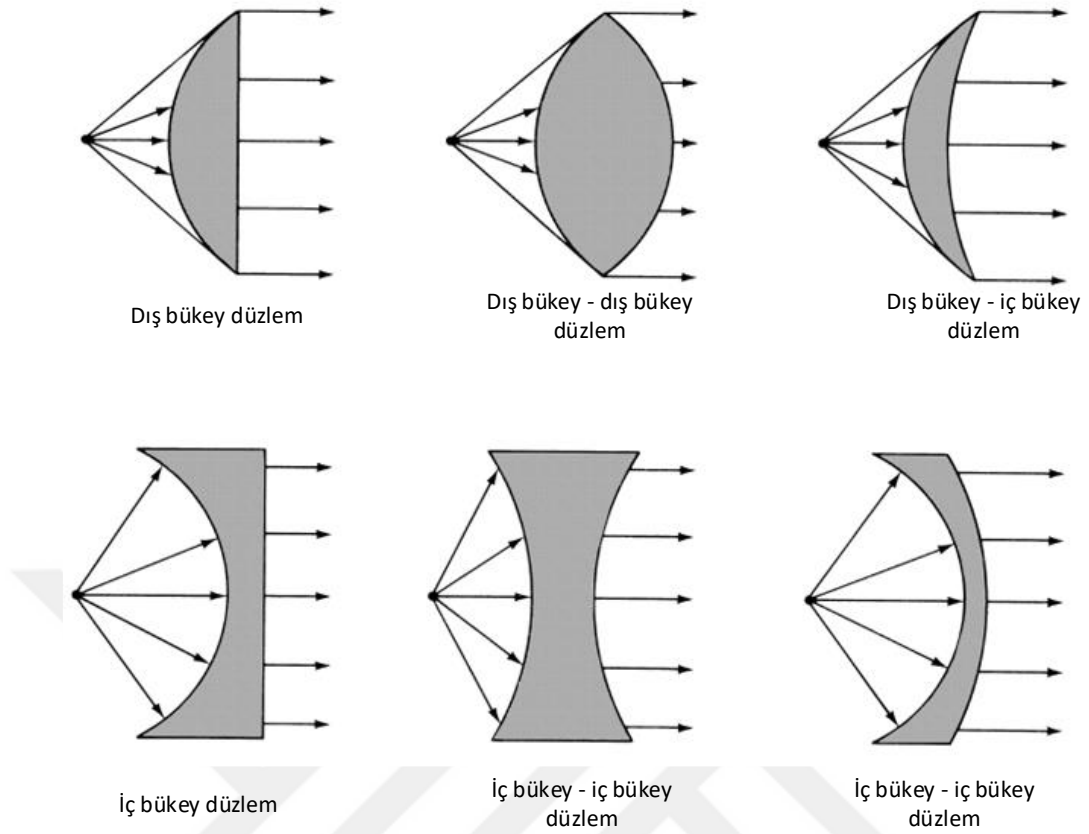
Tek bir elemanın ışımmasının yetmediği durumlarda aynı özelliğe sahip elemanların belli bir dizgi düzenine göre bir araya getirilmesiyle oluşturulan anten bütünlüğüne “dizi anten” adı verilmektedir [8]. Bu antenlerin bant genişliği, yönlendiricilik kazancı ve çıkış gücü yüksek olmaktadır. Şekil 2.11.'da farklı dizi anten yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Dizi anten geometrileri.

2.4.5. Mercek antenler

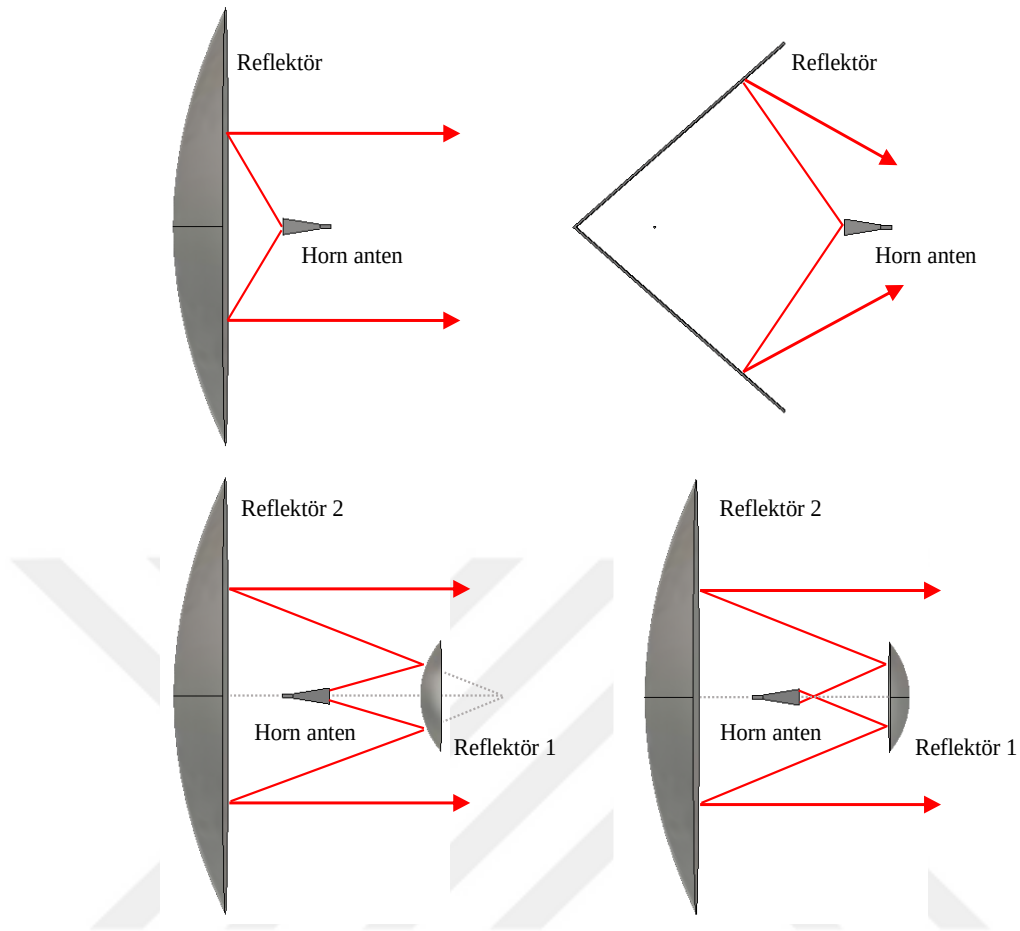
Mercek antenler, farklı yönlerdeki enerjiyi paralel olarak yönlendirmek için kullanılmaktadır. İstenmeyen yönde yayılan dalgaların düzlem dalgalara dönüşümünde görev alan mercek antenlerin, çalışma frekansı azaldıkça boyutları, hacimleri ve ağırlıkları artmaktadır. Ayrıca, bu antenlerin kendi içinde sınıflandırılması mercek antenin imal ediliş geometrisine göre yapılmaktadır. Şekil 2.12.'de bu geometrilerin bazıları gösterilmektedir [8].



Şekil 2.12. Mercek anten türevleri [8].

2.4.6. Reflektör antenler

Uzay araştırmaları başladığı ilk günden itibaren reflektör antenlere olan ilginin sürekli arttığı görülmektedir. Diğer anten türlerinden farklı olarak, reflektör antenler çok uzak mesafeler ile iletişim kurabilmektedir [6,7,8,9]. Şekil 2.13.'de farklı şekilde kullanılan reflektör antenler gösterilmektedir. Bu tez çalışması bant durduran parabolik FSY reflektör tasarımı üzerine olduğu için Bölüm 2.5'te parabolik reflektör antenlerin yapısı ve karakteristik özellikleri ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

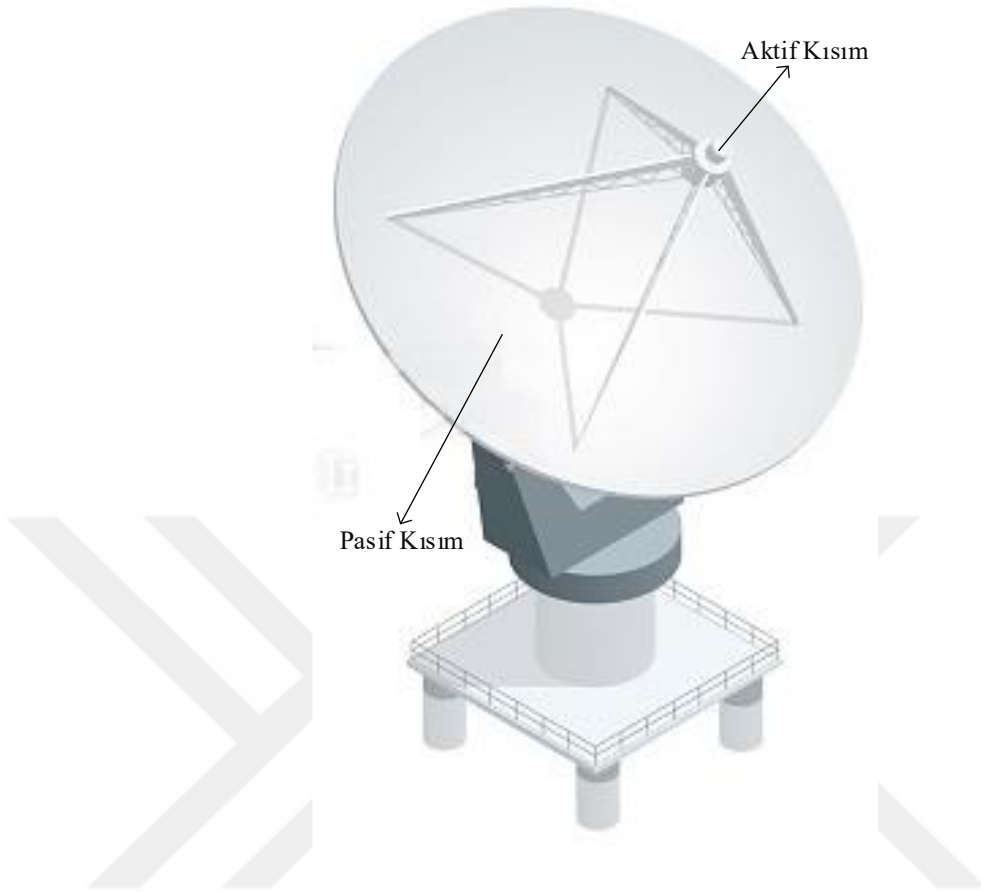


Şekil 2.13. Reflektör anten türevleri [8].

2.5. Parabolik Reflektörler Antenler

2.5.1. Parabolik reflektör anten yapısı

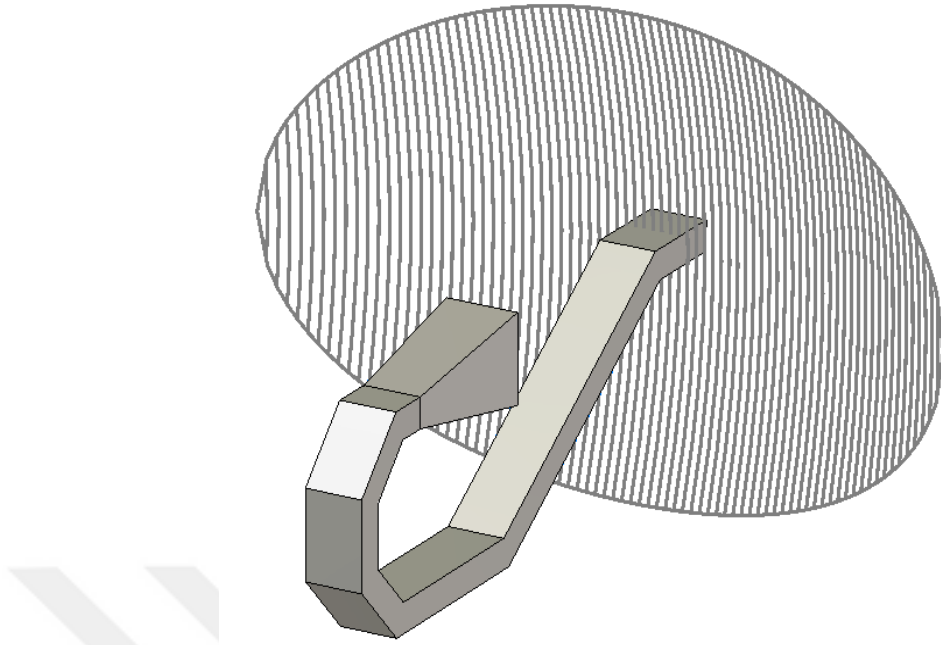
Parabolik reflektörler Şekil 2.14.' de gösterildiği gibi yansıtıcı yüzeyin bulunduğu pasif kısım ile besleme kaynağının bulunduğu aktif kısımdan meydana gelmektedirler.



Şekil 2.14. Parabolik reflektör antenin temel kısımları.

Pasif kısım, antenin yansıtıcı yüzeyi olarak kullanılmaktadır. Bu kısmın görevi, üzerine gelen elektromanyetik dalgalarını yansıtmaktır. Reflektör uzak mesafeden yüzeyine gelen elektromanyetik dalgaları odak noktasında topluyorsa alıcı anten, odak noktasındaki kaynaktan gönderilen dalgaları asal eksene paralel bir şekilde yansıtıyorsa verici anten olarak görev yapmaktadır. Bu kısımda herhangi bir kaynak üreticisi veya herhangi bir alıcı bulunmamaktadır. Parabolik yüzey optik kurallarına uygun bir şekilde çalışmaktadır [7,8,9].

Pasif kısımda elektromanyetik dalgayı daha az kayıpla yansıtabilmek için genellikle iletkenliği yüksek, yüzeyi pürüzsüz ve parlak metal levhalar ve bileşenler kullanılmaktadır.



Şekil 2.15. Yansıtıcı yüzeyi ızgara biçiminde olan parabolik reflektör anten.

Şekil 2.15.'te gösterildiği gibi, kullanım amacına ve çalışma koşullarına göre yansıtıcı yüzeyler, levhaların dışında ızgara biçimli bir yapıda da bulunmaktadır. Sert rüzgarların olduğu yerlerde rüzgârın antenin yansıtıcı yüzeyine yaptığı yelken kuvvetiyle yönünü birkaç derece döndürebilmekte ve alıcı ile verici arasındaki haberleşmenin kesilmesine neden olmaktadır [6,7]. Bu sebepten dolayı rüzgârlı alanlarda parabolik reflektör kullanılması isteniliyorsa, rüzgârdan kaynaklı yelken kuvvetini en aza indirmek için yansıtıcı yüzeyi tek bir levhadan yapmak tercih edilmemektedir. Bunun yerine aynı karakteristik özellikleri sağlayacak ızgara biçiminde bir yapı kullanılması daha avantajlı bir tercih olacaktır. Izgara biçimindeki yansıtıcı yüzeyler rüzgârın etkisini azaltmanın dışında farklı faydalara da sahip olmaktadır. Bunlardan biri büyük çaplı antenlerin ağırlıklarını azaltmasıdır. Ağırlığı azaltılmış antenin hareket mekanizmasının güç isteği azalacağı için enerji tasarrufu sağlamaktadır [8,9].

Izgara biçimli yüzeylerin çalışması elektromanyetik dalgaların dalga kılavuzu özellikleri kullanılarak yapılmaktadır. Elektromanyetik dalgalar, dalga kılavuzu içinde belli bir kesim frekansına sahiptir. Kesim frekansının altındaki bir frekansa sahip dalga, kılavuz içine girdiğinde hareket edemeden sönmektedir. Elektromanyetik

dalgaların bu özellikleri kullanılarak tasarlanan yansıtıcı yüzeylerdeki ızgara biçimindeki yapıların, her bir aralığı dalga kılavuzu gibi hareket etmektedir.

Tasarımı yapılacak antenin çalışma frekansı, aralıkların boyutlarına göre hesaplanan kesim frekansından düşük olduğu sürece aralıklardaki boşluklar, yüzeye gelen bir elektromanyetik dalga için bir tek levhadan yapılmış yansıtıcı yüzey gibi davranmaktadır [8,9].

Daha önceden de açıklandığı gibi parabolik reflektörlerin aktif kısımlarını besleme antenleri oluşturmaktadır. Aktif kısımdaki besleme antenleri türlerine göre farklı özelliklere sahiptirler. Verici tipi antenlerde aktif kısmı kaynak oluşturmaktadır. Parabolik reflektörlerin yan loblarının az ve antenin yüksek kazaca sahip olabilmesi için yönlendiriciliği yüksek olan bir besleme anteninin kullanılması gerekmektedir. Bu amaca yönelik besleme anten çeşitlerinden en çok tercih edileni genellikle horn antenlerdir [6,7].

İyi tasarlanmış horn antenin yan loblarının az olması ve yüksek yönlendiricilik kazanç özelliğine sahip bir ışıma yapması gerekmektedir. Yüksek kazançlı besleme antenlerinden yüksek derecede verim elde etmek için tasarımlarda besleme antenin ışıma alanıyla pasif kısmı oluşturan yansıtıcı yüzeyin ışıma alanının örtüşmesine özen gösterilmelidir [6,7].

Tasarımı yapılan besleme antenin ışıma karakteristiği analizi yapılırken, beraberinde kullanılacak yansıtıcı yüzeye olan mesafenin de hesaba katılması gerekmektedir. Çoğu kullanımında yansıtıcı yüzey ile besleme anteni yakın konumlandırıldığı için besleme antenin ışıması yakın alan analizi ile gerçekleştirilmektedir. Genelde besleme antenleri yansıtıcı yüzeyin odak noktasına yerleştirilmektedir. Fakat kullanım amacına ve anten çeşitlerine göre farklı konumlarda da bulunması mümkündür [6,7]. Besleme antenlerinin konumlandırılması ile ilgili detaylı bilgiler parabolik reflektör anten çeşitlerinden bahsedilirken verilecektir.

2.5.2. Parabolik reflektör antenlerin ışıma örüntüsü

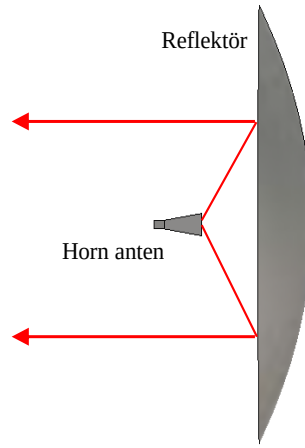
Kullanılan parabolik reflektör antenlerin besleme anteninden gelen bütün dalgayı istenilen yönde yayması (ışınması) istenilmektedir. Parabolik reflektör antenin ışıma yönünden saparak farklı açılarda hareket etmesi antenin kazancını düşürerek verimini olumsuz yönde etkileyecektir. Şekil 2.4'te verilen antenin ışıma örüntüsü göz önüne alındığında ana lob olarak gösterilen kısım antene gönderilen dalganın ışıma yönünü temsil ederken yan loblar ve arka loblar ise istenmeyen ışımaları göstermektedir. Bu ışımların artması genel olarak antene gönderilen dalganın tamamının istenilen yönde ışıma yapamaması anlamına gelmektedir [6,7,8].

2.5.3. Parabolik reflektör antenlerin çeşitleri

Parabolik reflektör antenler besleme antenlerinin konumuna göre simetrik veya eksen-simetrik antenler, offset antenler ve Cassegrain ve/veya Gregorain antenler olmak üzere üç farklı başlık altında incelenmektedir.

2.5.3.1. Simetrik veya eksen-simetrik antenler

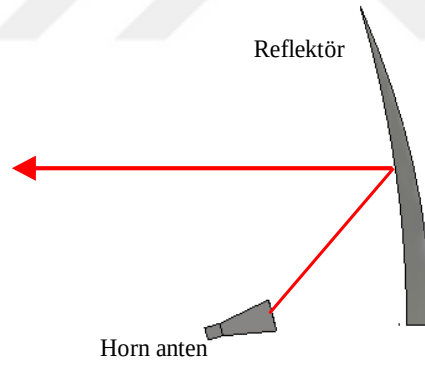
Simetrik veya eksen-simetrik antenlerin en önemli özellikleri besleme anteninin odak noktasında yer almasıdır. Yansıtıcı yüzeyindeki eğim neredeyse küresel bir yapıya sahiptir. Şekil 2.16.'da simetrik veya eksen simetrik antenlerin genel modellenmesi verilmiştir [6,7,8,9].



Şekil 2.16. Eksen-simetrik parabolik reflektör anten modeli.

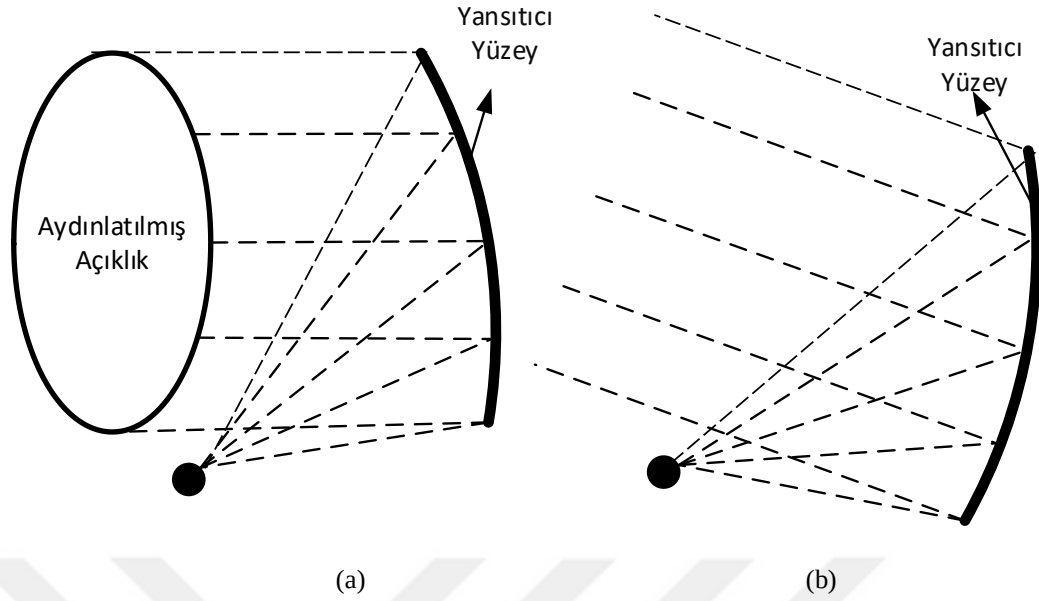
2.5.3.2. Offset antenler

Offset antenlerin, simetrik veya eksen-simetrik antenlere göre en büyük farkı besleme anteninin odak noktasında bulunmamasıdır. Parabolik reflektörün kullanım amacına yönelik olarak besleme anteninin konumlandırılması yapılmaktadır [6,7,8,10].



Şekil 2.17. Offset parabolik reflektör anten modeli.

Offset antenlerin yansıtıcı yüzey derinlikleri azdır [6,7,8]. Bu antenlerin yansıtıcı yüzey derinlikleri incelendiğinde küresellikten daha çok elips şekline benzedikleri görülmektedir. Şekil 2.17.'de offset anten modeli verilmiştir.



Şekil 2.18. (a) Eksen simetrik anten ve (b) offset parabolik reflektör anten geometrileri [10].

Şekil 2.18.a ve Şekil 2.18.b’de sırası ile eksen-simetrik anten ile offset antenlerin yansıtıcı yüzey geometrileri gösterilmektedir. Eksen-simetrik antenin odak noktasındaki besleme anteninin yeri değiştirilmeden sadece yansıtıcı yüzeyinin belli bir kısmı kesildiğinde Şekil 2.18.b’de görüldüğü gibi offset anten elde edilmektedir. Küresel yapıdaki antenden eliptiğe benzer bir yapıya geçilmektedir.

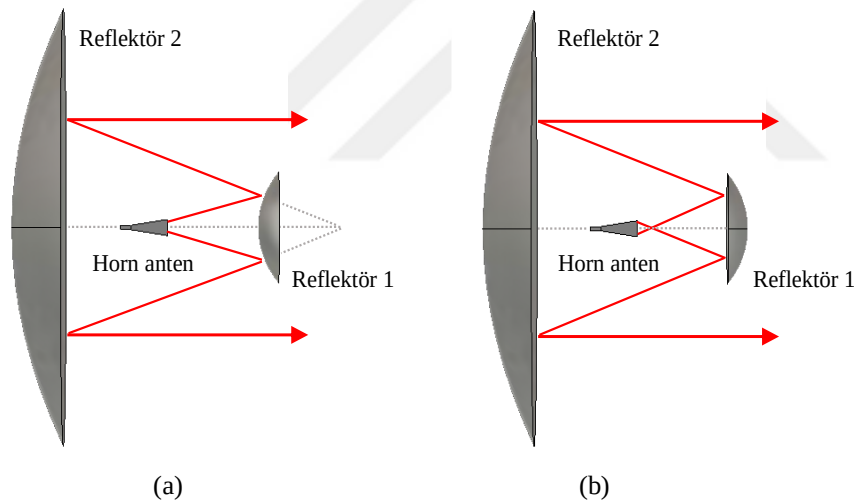
Şekil 2.18.’de offset antenin iç derinliğinin eksen-simetrik antenden daha az olduğu görülmektedir. Besleme antenin odakta konumlandırılmış olması ve yansıtıcı yüzeyinin eliptik bir yapıya sahip olması bu antenlerin başlıca özelliklerindedir [6,7,8,9,10].

Eksen-simetrik ve offset antenler farklı karakteristik özelliklere sahiptir. Kullanım amacına yönelik ikisi arasında tercih yapılmaktadır. Eksen-simetrik antenler, gökyüzüne daha geniş bir açıdan bakan, yansıtıcı yüzeyinin daha yuvarlak olduğu ve merkez bombesi daha fazla olan bir anten türüdür. Offset antenler ise ufuk açısına daha fazla bakmaktadır ve eliptik yansıtıcı yüzeye sahip olmalarından dolayı daha az bombeye sahip olduğu bilinmektedir. Offset antenlerin sahip oldukları yapıdan dolayı sinyal alma açıları daha fazladır. Antenlerin kullanım yerlerinde doğa olaylarından az etkilenmesi istenmektedir ve özellikle kış aylarında eksen-simetrik antenin

bombesinin fazla olması sebebiyle yansıtıcı yüzey üzerinde kar birikme ihtimali Offset antenlere göre daha fazladır. Doğal olaylara göre de kullanılacak antenin uygun çevre koşullarına göre tercih edilmesi önemlidir [10].

2.5.3.3. Cassegrain ve gregorain antenler

Şekil 2.19.'da görüldüğü üzere Cassegrain ve Gregorain antenlerde ana yansıtıcı ve yardımcı yansıtıcı olmak üzere iki adet yansıtıcı yüzey yer almaktadır. Besleme anteni, ana yansıtıcı yüzey üzerinde konumlandırılmıştır. Ana yansıtıcı yüzeyin odak noktasında ise daha küçük dışbükey ve içbükey yardımcı yansıtıcı yüzeyler yer almaktadır. Yardımcı yansıtıcı yüzeyin şekli içbükey ise “Gregorain antenler”, yüzeyin şekli dışbükey ise “Cassegrain antenler” denilmektedir. Ayrıca, Cassegrain ve Gregorain antenler birbirine oldukça benzer özelliklere sahiptir [6,7].

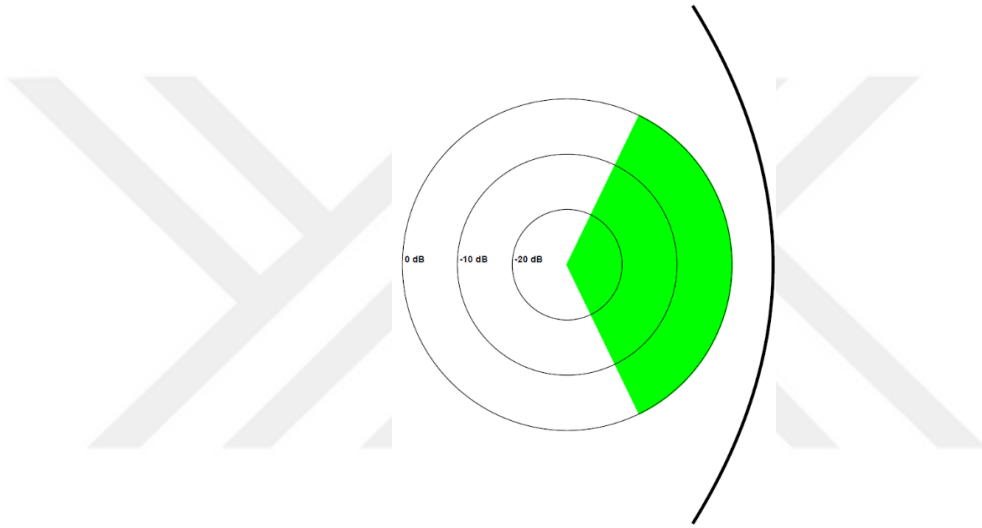


Şekil 2.19. (a) Cassegrain anten ve (b) Gregorain anten modelleri.

Cassegrain ve Gregorain antenlerin boyutları oldukça büyük çaplı parabolik reflektör antenlerdir. Boyutlarının büyük olmasının sebebi antenin mümkün oldukça yüksek kazançlara sahip olma isteğidir. Yardımcı yansıtıcı yüzeye çarpan elektromanyetik dalga, küresele daha yakın bir forma girerek ana yansıtıcının yüzeyinin etkin açıklığını artırıcı bir etki göstermektedir [1,6,7,8,9].

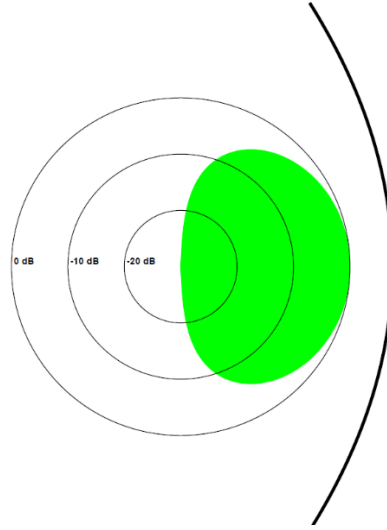
2.5.4. Parabolik reflektör antenlerde açıklık yüzeyin ışıma ilişkisi

Parabolik reflektör anten tasarımında, besleme anteninden gelen ışımadan en yüksek derecede verim alabilmek istenilmektedir. Yüksek verime ulaşmak için besleme antenin ışıması ile yansıtıcı yüzeyin sahip olduğu açıklık yüzeyinin mümkün olduğunca birbirine uyumlu olması gerekmektedir. Şekil 2.20.'de yansıtıcı yüzeyde yer alan açıklık yüzeyi ile besleme anteninin ışıması uyumlu olduğunda düzgün dağılımlı ışıma örüntüsü gösterilmektedir [11].



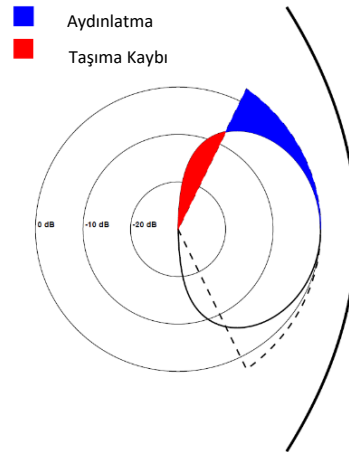
Şekil 2.20. Düzgün dağılımlı ışıma [11].

Şekil 2.21.'de besleme anteni olarak horn anten seçildiğinde yansıtıcı yüzeyde oluşan ışıma örüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Horn anten ışıması [11].

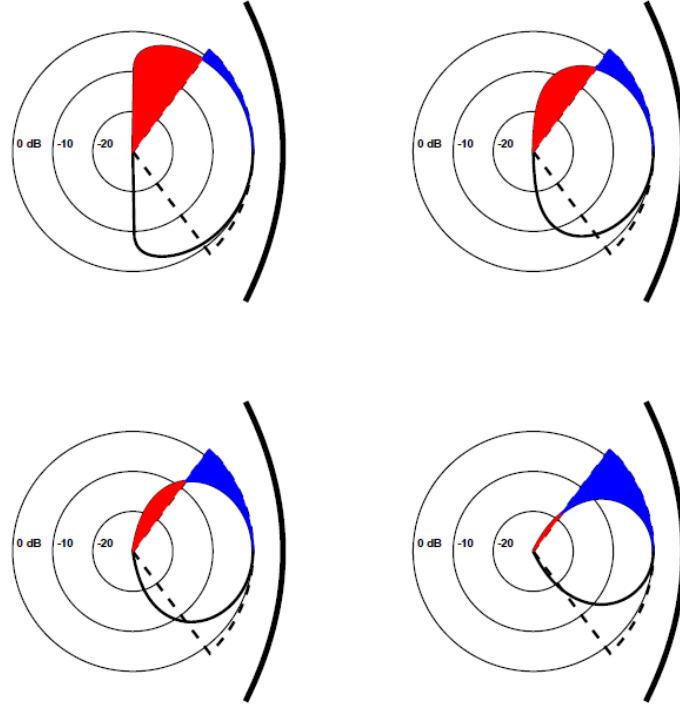
Besleme anteninin ışıma şekli, Şekil 2.20.'deki gibi düzgün ışımaya yaklaştıkça antenden elde edilen verim artmaktadır. Besleme anteninin ışıma şekli düzgün ışıma olduğu gibi uç noktalara ulaşamazsa, kullanılan yansıtıcı yüzeyde aydınlatılmayan noktalar oluşur [11]. Bu durumda yansıtıcı yüzeyin tamamının kullanılmadığı anlaşılmaktadır. Diğer bir taraftan besleme anteninin ışımasının yansıtıcı yüzeyinin uçlarından dışarıya taşması veya diğer bir deyişle beslemenin ışımasının yansıtıcı tarafının açıklık yüzey bölümünden daha geniş bir alana ışıma yapması gene bir önceki durum gibi antenin verimini düşürmektedir. Şekil 2.22.'de besleme ışımasından ortaya çıkan kayıplar gösterilmektedir [1,11].



Şekil 2.22. Yansıtıcı yüzey ile besleme anten arasındaki uyumsuz ışıma kayıpları [11].

Şekil 2.22.'de görülen mavi ve kırmızı renk ile belirtilen parçalar kayıpları göstermektedir.

■ Aydınlatma Kaybı
■ Taşıma Kaybı

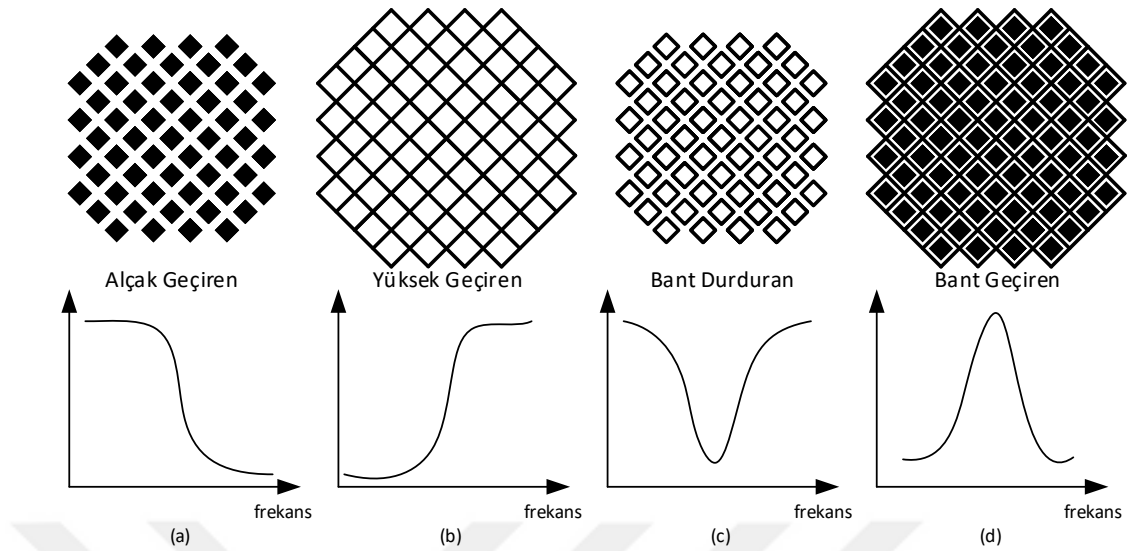


Şekil 2.23. Farklı ışımalarda ortaya çıkan kayıplar [11].

Şekil 2.23.'de kırmızı ve mavi renklerle gösterilen kayıpların bulunduğu konum ve konumlarda belirten renklerin belli anlamları vardır. Şekil 2.23.'de mavi ile gösterilen alanlar antenin ana lobunda belirgin bir şekilde azalmaların olduğunu gösterirken, kırmızı ile belirtilen alanlar ise yan lobların oluştuğunu göstermektedir. Parabolik reflektör tasarımı yapılacağı zaman kullanım amacına göre en uygun ışımaya seçilerek bu ışımaya uygun ana ve yan lobları oluşturacak bir tasarım yapılmalıdır [1,6,7,8,9,11].

BÖLÜM 3. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER

Belli bir frekans bandını soğuran veya yansıtan yapılara frekans seçici yüzey (FSY) adı verilmektedir. FSY'ler haberleşme sistemlerinde, mikrodalga entegre devrelerinde ve antenlerde sıklıkla kullanılmaktadır. FSY tasarımında iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan biri dielektrik malzeme üzerine iletken yamalar eklemektir, diğeri ise iletken yüzeyin üzerine oyuklar açarak dielektrik alanlar oluşturmaktır [2,4,12,13,14,16]. Bu iki farklı tasarım, FSY'nin çalışma karakteristiğine göre tercih edilmektedir. FSY'nin kapasitif bir etki göstermesi istenilirse dielektrik malzeme üzerine iletken yamalar yapılmakta, endüktif bir etki göstermesi istenilirse iletken yüzeyin üzerine oyuklar açılmaktadır [2,4,12,13,14]. Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi, alçak geçiren ve yüksek geçiren filtre karakteristiğinde çalışabilen yapılar olduğu gibi bu iki yapıyı birleştirerek bant durduran ve bant geçiren filtre karakteristiğinde çalışabilen FSY'ler de elde edilmektedir. Şekil 3.1.'de temel olarak dört farklı filtre karakteristiği gösterilmektedir. Şekilde siyah renkle gösterilen yerler iletken kısımları belirtirken, beyaz olan kısımlar ise dielektrik tabakayı göstermektedir [13].



Şekil 3.1. Frekans seçici yüzeyler ve temel filtre karakteristikleri [13].

3.1. Frekans Seçici Yüzeylerde Frekans Özelliklerini Belirleyen Faktörler

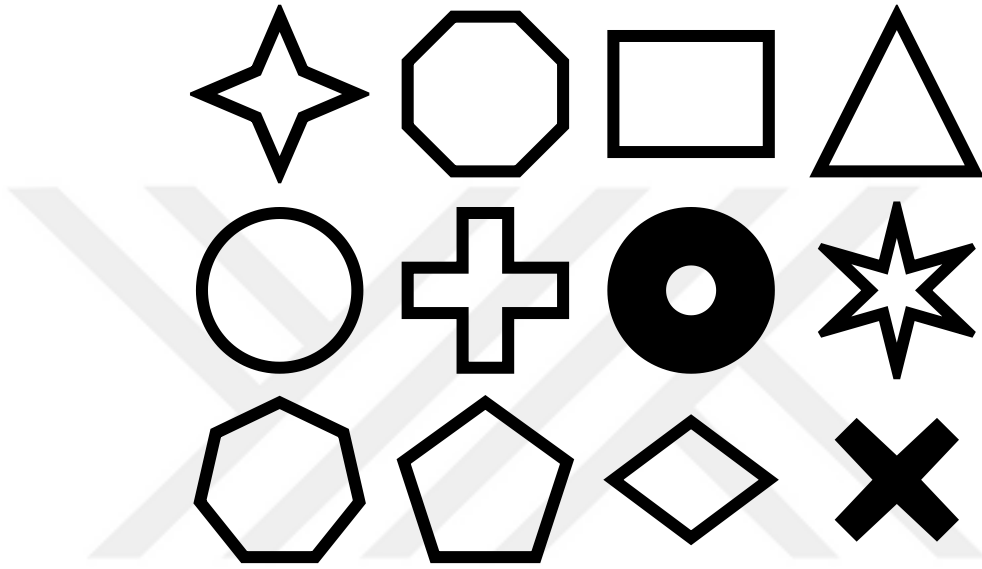
FSY'nin karakteristiğini; periyodik yapıyı oluşturacak iletken elemanların geometrisi ve boyutları, elemanlar arasındaki boşluklar, kullanılan dielektrik malzemenin cinsi, dielektrik malzemenin kalınlığı, düzlem dalganın geliş açısı ve polarizasyonu etkilemektedir [2,4,13,14].

3.1.1. FSY tasarımında kullanılan elemanların geometrisi ve boyutları

Frekans seçici yüzeylerin çalışma frekansını belirleyen en önemli faktörlerden biri periyodik olarak yerleştirilmiş iletken elemanların geometrik şekilleridir. Frekans seçici yüzeylerin yapısı periyodik şekilde dielektrik yüzeye eklenmiş iletken yamalardan veya iletken yüzeydeki periyodik şekilde açılmış oyuklardan meydana gelmektedir. Bu yamalar ve oyuklar belli bir geometrik yapıdadır. Her bir yama veya oyuk, geometrisine göre farklı karakteristik özellikler göstermektedir [2,4,13,15,16].

Şekil 3.1.a'da gösterildiği gibi iletken yamaların periyodik dizilimi alçak geçiren filtre karakteristiği gösterirken, Şekil 3.1.b'de iletken bir tabakadaki periyodik oyuklar (açıklıklar) yüksek geçiren filtre karakteristiği göstermektedir [2,4,12,13,15,16]. Daha farklı geometrik şekiller ve periyodik elemanlar kullanarak bant durduran veya bant

geçiren filtre karakteristikleri geliştirilmektedir. Şekil 3.2.'de literatürde yaygın olarak kullanılan farklı geometrik yapılar verilmiştir. Bu yapılardan bazıları dalganın polarizasyonuna diğerlerinden daha fazla hassasiyet gösterirken, bazı geometrik yapılar ise diğer yapılara göre daha geniş bant özelliği göstermektedirler. Ayrıca bazı geometrik yapıların birden fazla rezonans frekansına sahip olması çok bantlı filtre karakteristiği gösteren FSY'lerin tasarlanmasına olanak sağlamaktadır [2,4,13,15].



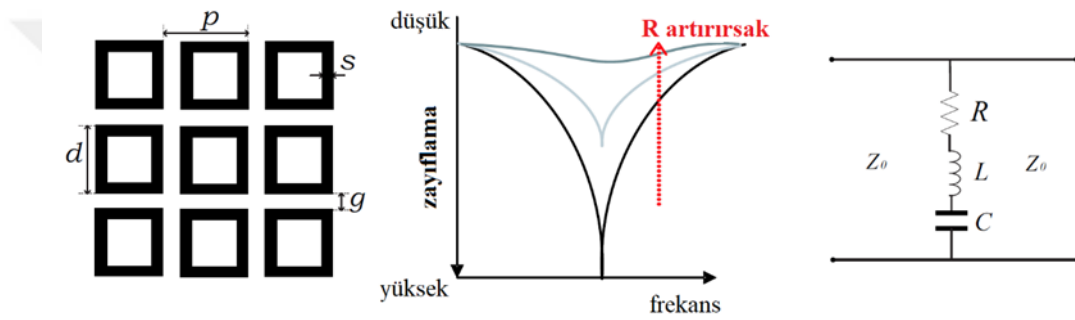
Şekil 3.2. FSY'lerde kullanılan elemanların geometrik şekilleri [2].

Frekans seçici yüzey tasarımında iletken elemanların geometrik şekline ilave olarak boyutları da çalışma karakteristiğini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Periyodik yapının boyutlarına göre FSY'nin, rezonans frekansı, bant genişliği, elektromanyetik dalganın geliş açısı ve polarizasyonu gibi parametreleri değişmektedir [2,4,13,15].

Frekans seçici yüzeylerde kullanılacak iletken elemanların geometrik şekilleri, literatürde mevcut olanların dışında istenilen karakteristiği sağlayacak farklı geometrik şekillerde tasarlanabilmektedir. Şekil 3.3.'te periyodik iletken eleman olan kare döngünün, bant durdurucu filtre karakteristiğine olan etkisi ve eş değer devre modeli gösterilmektedir [2,4,13,15]. Şekil 3.3.'ten FSY'nin rezonans frekansının periyot uzunluğu (p), iletken yamanın kenar uzunluğu (d) ve iletken yamanın

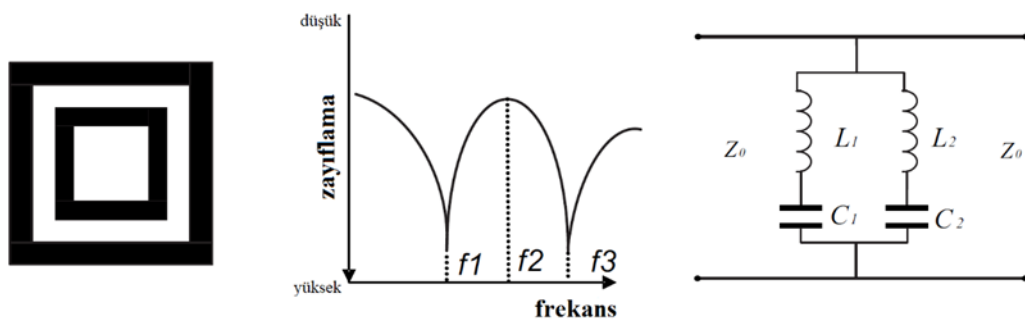
kalınlığına (s) bağlı olarak değişirken elektromanyetik dalganın geliş açısındaki hassasiyetliği ise iletken yamalar arasındaki mesafeye (g) bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Ayrıca frekans seçici yüzeyin veriminin iletken yüzey direnci R 'nin artışı ile azaldığı belirtilmiştir [2,4,13,15].

Özet olarak, kare döngülerin boyutlarının küçülmesi rezonans frekansının daha yüksek frekanslara kaymasına sebep olurken, aralarındaki açıklığın küçültülmesi ise farklı geliş açılara sahip elektromanyetik dalgalara karşı filtrenin kararlılığını artırarak genel karakteristiğinin iyileşmesini sağlamaktadır [2,4,13,15].



Şekil 3.3. Kayıplı iletken kare yamalardan oluşan FSY ve FSY'nin frekans karakteristiği ve eşdeğer devre modeli [13].

Basit filtreler dışında daha karışık geometrilerle oluşturulmuş bir FSY, çoklu rezonans frekanslarında çalışmaya imkân vermektedir [13]. Şekil 3.4.'te frekans cevabı ve eşdeğer devre modeli gösterilen, iç içe kare döngülü FSY iki rezonans frekansında bant durduran filtre karakteristiği göstermektedir [2,4,13,15].



Şekil 3.4. İç içe geçirilmiş kare döngülerden meydana gelmiş bir FSY'nin frekans karakteristiği ve eşdeğer devre modeli [13].

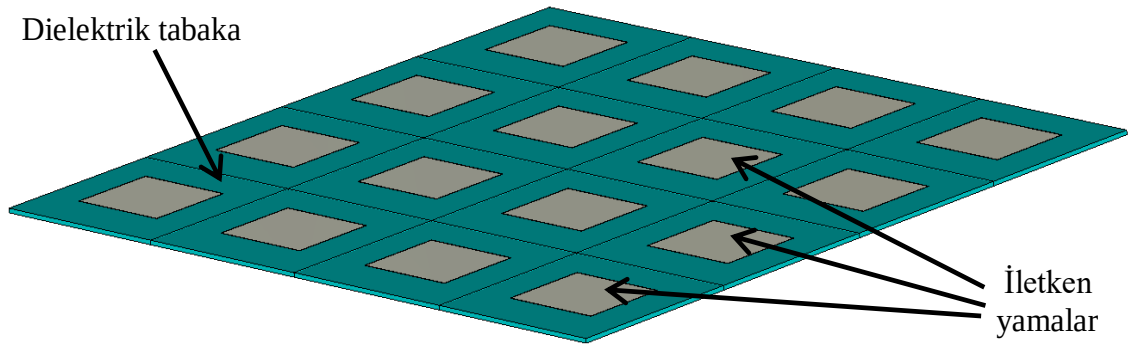
Z_0 = transmisyon hattının karakteristik empedansı.

3.1.2. FSY tasarımında kullanılan elemanların iletkenliği

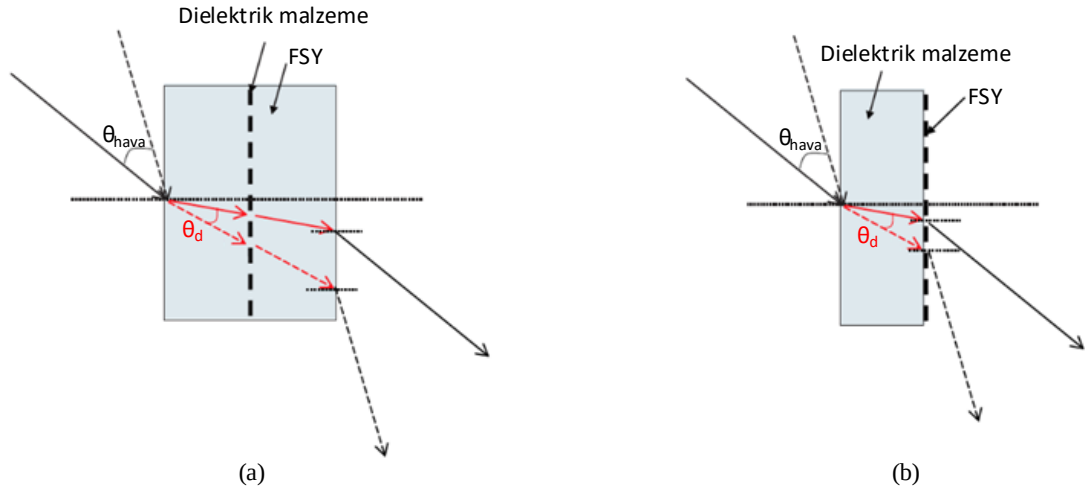
Frekans seçici yüzeylerde kullanılan iletken yamaların veya oyukların eş değer devre modellerinin direnç (R), bobin (L), kapasite (C) gibi basit elektrik elemanlarından oluştuğu gözlenmektedir [2,4,13]. Direnç, bobin ve kapasite değerlerine bağlı olarak yüzeyin iletkenliği de değişmektedir. Şekil 3.3'ten FSY'de kullanılan kare döngünün iletkenliğinin artması ile yapının direncinin azaldığı ve buna bağlı olarak filtrenin veriminin arttığı görülmektedir [2,4,13].

3.1.3. FSY tasarımında kullanılan dielektrik tabakaları

Dielektrik tabakada iletken yamaların bulunduğu frekans seçici yüzeylerde, dielektrik tabakanın önemi daha fazla ortaya çıkmaktadır. Dielektrik tabakanın kalınlığı ve dielektrik sabiti, frekans seçici yüzeyin rezonans frekansını önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 3.5.'te dielektrik tabaka üzerine yerleştirilen iletken yamalarla oluşturulmuş bir FSY gösterilmektedir [2,4,13,14].



Şekil 3.5. Dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiş iletken yamalardan oluşturulmuş FSY.



Şekil 3.6. (a) Dielektrik malzemenin arasına yerleştirilmiş FSY, (b) dielektrik malzemenin tek yüzüne yerleştirilmiş FSY [13].

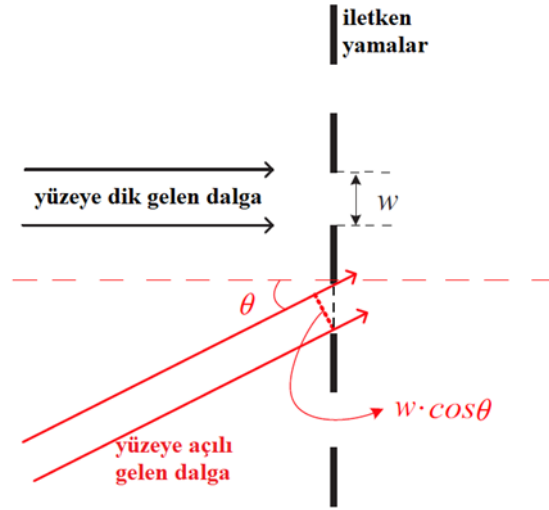
Şekil 3.6.a ve Şekil. 3.6.b’de sırası ile dielektrik tabakanın arasına ve dielektrik tabakanın tek yüzeyine yerleştirilmiş tek katmanlı FSY tasarımları verilmektedir. Dielektrik tabaka, eşdeğer devredeki kapasiteyi değiştirici etkiye sahiptir. Efektif dielektrik sabiti faktörü ($\sqrt{\epsilon_{eff}}$) tarafından frekans seçici yüzeyin rezonans frekansı (f_r) düşürülmektedir. Şekil 3.6.a’daki gibi dielektrik tabakanın kalınlığı $0,05\lambda$ dalga boyundan daha büyük ise $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$ eşitliği Şekil 3.6.b’deki gibi $0,05\lambda$ dalga boyundan daha küçük ise $\epsilon_{eff} = (\epsilon_r + 1)/2$ eşitlikleri elde edilmektedir [2,4,13,14]. Eğer dielektrik tabakanın kalınlığı $0,05\lambda$ dalga boyundan daha küçük olursa ϵ_{eff} non-lineer bir fonksiyona dönüşmektedir. Sonuç olarak, dielektrik tabaka kalınlığı, FSY’nin rezonans frekansını (f_r) etkileyen efektif dielektrik sabiti faktörü (ϵ_{eff}) için önem kazanmaktadır [2,4,13,14].

3.1.4. Elektromanyetik dalganın FSY’ye geliş açısı ve polarizasyon

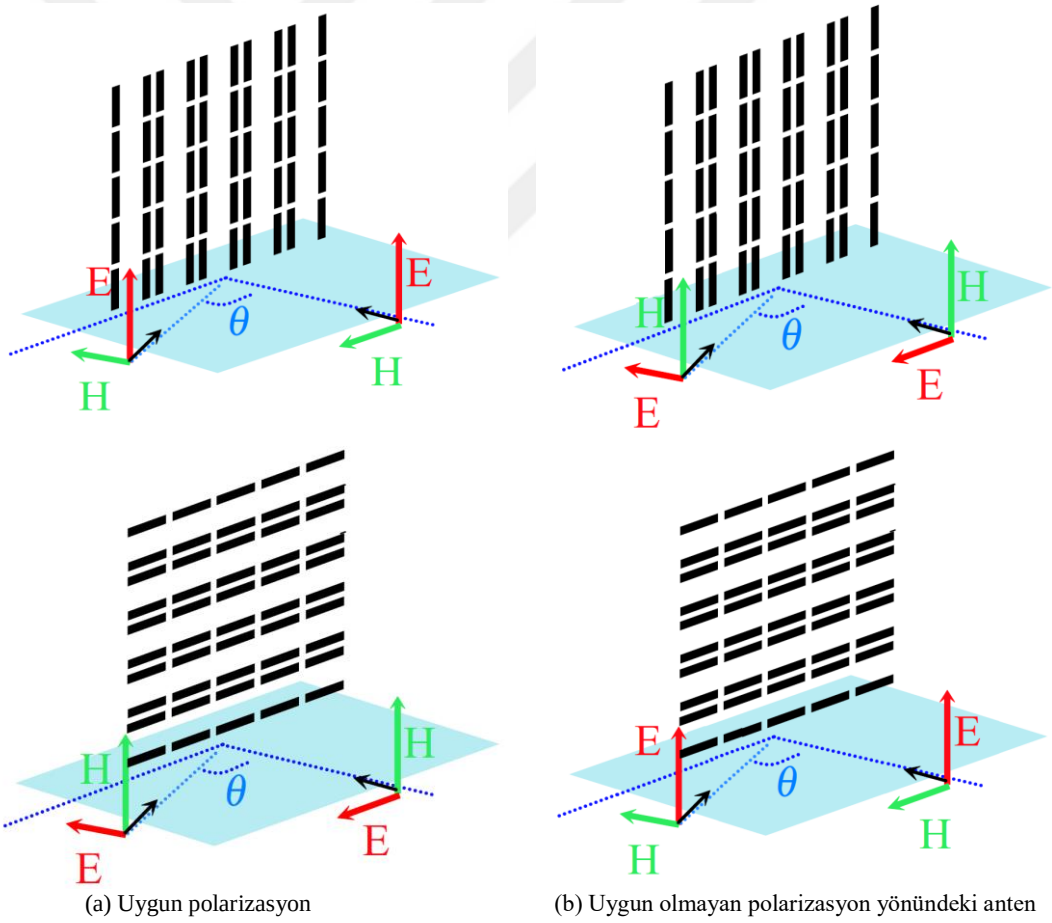
Frekans seçici yüzeylerdeki iletken yamalara gelen dik elektromanyetik dalgalar, yüzeydeki bütün iletken yamalara, aynı anda çarparak hepsinin bir bütün halinde hareket etmesini sağlamaktadır. Fakat farklı bir açı ile gelen dalga, yüzeydeki bütün yamalara farklı zamanlarda çarpmasından dolayı filtrenin karakteristiğinde değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Bu değişiklikler, filtrenin rezonans frekansının ve

bant genişliğinin değişmesine yol açmaktadır [2,4,13,14]. Bu sebepten dolayı frekans seçici yüzeyler fiziksel özelliklerine ve tasarımına göre belli bir çalışma açısına sahip olmaktadır. Tasarımlarda belirlenen çalışma açısı dışındaki açılarda gelen elektromanyetik dalgalar, filtrenin karakteristiği dışında çalışmasına sebep olabilmektedir. Şekil 3.7.'de yüzeye dik gelen elektromanyetik dalga için her bir iletken yama arasında w kadar bir açıklık olmaktadır. Açılı gelen elektromanyetik dalga, yüzeyde $\cos(\theta)$ kadar zayıflamaya uğramaktadır ve iletken yamalar arasındaki boşluk $w \cdot \cos(\theta)$ kadar küçülmektedir. İletken yamaların arasındaki boyut değişikliği yüzeyin rezonans frekansını ve bant genişliğini önemli ölçüde değiştirmektedir [2,4,13,14].

Yüzeye gelen dalganın geliş açısı gibi, gelen elektromanyetik dalganın polarizasyonu da filtrenin amaçlanan davranış karakteristiğinin dışında çalışmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.8.a'da elektriksel alan yönüne uygun bir şekilde frekans seçici yüzey tasarlandığı görülmektedir. Şekil 3.8.b ise tasarlanan frekans seçici yüzey tasarımının dışında farklı polarizasyonda gelen elektromanyetik dalga etkisinde kaldığı gösterilmektedir. Şekil 3.8.a'daki gibi gelecek bir elektromanyetik dalganın FSY'ye istenilen filtre karakteristiğinin sağlanması için belli rezistif, kapasitif ve endüktif değerleri sağlaması gerekmektedir. Bu değerler ise iletken çubukların kalınlığı, boyu ve arasındaki mesafeler ile sağlanılmaktadır. Uygun tasarım parametreleri ile oluşturulmuş frekans seçici yüzey, polarizasyon yönünde gelen elektromanyetik dalgada istenilen filtre karakteristiğini sergilemektedir. Farklı bir polarizasyona sahip elektromanyetik dalga (Şekil 3.8.b) frekans seçici yüzeye çarptığında farklı değerlerde rezistif, kapasitif ve endüktif etkiler oluşmasını sağlayacaktır, bu da istenilen karakteristiğin dışında çalışmasına sebep olacaktır [2,4,13,14].



Şekil 3.7. Elektromanyetik dalganın yüzeye çarpma açısına göre yüzeydeki iletken yamalara olan mesafenin değişimi [13].



Şekil 3.8. Elektromanyetik dalganın yüzeye çarpma açısına göre yüzeydeki iletken yamalara olan mesafenin değişimi [13].

3.2. Frekans Seçici Yüzey Analizinde Uygulama Yöntemleri

Frekans seçici yüzeylerin analizinde kullanılmak üzere pek çok nümerik yöntem bulunmaktadır ve bu yöntemlerin geliştirilmesine devam edilmektedir. Bu yöntemlerden başlıcaları momentler metodu (method of moments (MOM)), sonlu elemanlar metodu (finite element method (FEM)), zaman domeninde sonlu farklar metodu (finite difference time domain (FDTD)), ortak empedans metodu (mutual impedance method), eşdeğer devre modeli (equivalent circuit (EC) models) şeklinde sıralanabilir. Bu bölümde nümerik yöntemlerden kısaca bahsedilecektir [2,4,13].

3.2.1. Momentler metodu

Momentler metodu, frekans seçici yüzeylerin saçılma analizinde kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu konuyla ilgili ilk yaklaşımda “Chen” bulunmuştur [2,4,13]. Chen’in bu yaklaşımı, bazen “integral eşitliği metodu” diye de anılmaktadır. Frekans seçici yüzeydeki iletken yamalara çarpan elektromanyetik dalgalar, iletkenlerde denklemi bilinmeyen bir akım indükler. Denklemi bilinmeyen akım denklemi, integral ile ifade edilmektedir [2,4,13]. Momentler metodu karışık integralli ifadeleri çözmek yerine bir takım matematiksel basit denklemlere indirgeyerek, bu denklemlerin daha basit bir şekilde çözülmesini sağlamaktadır. Birim iletken yama elemanı için çıkarılan denklem periyodik FSY hücre yapıları içinde kullanılmaktadır. Dolayısı ile FSY’nin periyod sayısının artması kullanılacak denklem sayısını da arttırmakta ve çözümlerin bilgisayar destekli yapılmasını gerektirmektedir [2,4,13].

3.2.2. Sonlu elemanlar metodu

Frekans seçici yüzeyler gibi periyodik yapılara gelen elektromanyetik alan dalgalarının saçılma analizinde kullanılan bir yaklaşımdır ve “Courant” tarafından 1943 yılında ilk olarak ortaya atılmıştır [2,4,13]. Ayrıca birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. 1968 yılından itibaren ise elektromanyetik alan dalgalarına uygulanmaya başlanması gözlemlenmektedir. Sonlu elemanlar metodu karışık geometrili frekans seçici yüzeylerin analizinde daha etkili bir metottur [2,4,13].

3.2.3. Zaman domeninde sonlu farklar metodu

Zaman domeninde sonlu farklar metodu, temel olarak diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin zaman domeninde ayrıştırılarak çözüme ulaşılması esasına dayanmaktadır [2,4,13]. İlk defa 1966 yılında “Kane Yee” tarafından üretilen bir yöntemdir. Sonlu elemanlar metodunun çözümleri zaman domeninde yapılmaktadır [13].

3.2.4. Ortak empedans metodu

Ortak empedans metodu “Ben A. Munk” tarafından geliştirilmiştir [2,4,13]. Frekans seçici yüzeylerde yer alan iletken yamalara elektromanyetik dalgaların etkisiyle indüklenen gerilimi ve iletken yamaların birbirini etkileyen gerilimlerini kullanarak ortak bir empedans hesaplayan bir metottur [13].

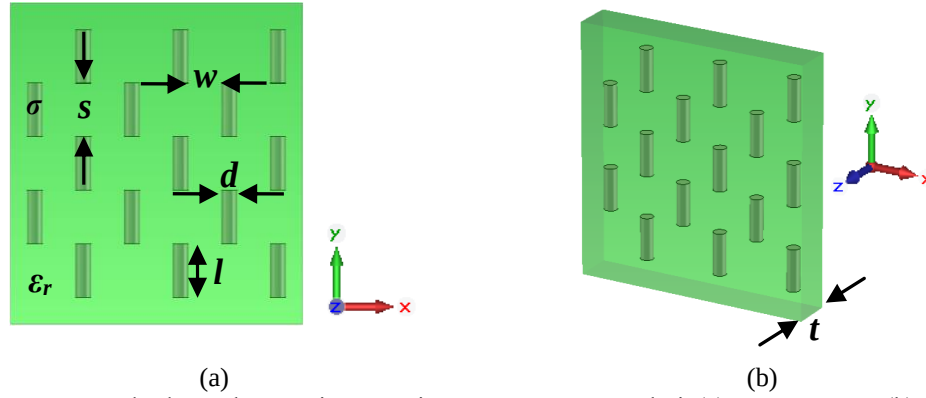
3.2.5. Eşdeğer devre modeli

Karmaşık ve teorisi ağır metotların aksine eşdeğer devre modeli, frekans seçici yüzeylerin analizi için daha basit bir çözüm sunmaktadır. Frekans seçici yüzeyin iletim karakteristiklerini kullanarak, yüzeyde endüktif ve kapasitif elemanlar cinsinden benzetimleri yapılmaktadır. Bu yöntem ile iletken yamalar ve dielektrik tabaka arasındaki eşdeğer devre modeli çıkartılmaktadır [2,4,13]. Elde edilen model üzerinde elektrik devre teorilerinin kullanılmasıyla basit bir şekilde analizde bulunmaktadır. Bu yöntem elektromanyetik dalgalar için kullanılan integrali ağır analizlerin yerine, daha basit matematiksel denklemler ile analiz yapılması sağlanmaktadır. Bu yöntem basit geometrik elemanlardan oluşan frekans seçici yüzeylerde daha doğru sonuçlar ortaya çıkartmaktadır fakat karmaşık geometrik elemanlardan oluşan FSY’lerde diğer yöntemler kadar doğru sonuçlar verememektedir [2,4,13]. Buna rağmen uygulanması kolay ve hızlı bir analiz yöntemi olduğundan sıklıkla kullanılmaktadır [2,4,13].

BÖLÜM 4. BANT DURDURAN FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Bölüm 3’te detaylı olarak açıklandığı gibi bant durduran FSY için literatürde birçok farklı model tasarımları mevcuttur. Elektriksel performansının yanında sağladığı mekanik avantajlarından dolayı bu çalışmada tutucu malzeme içine konumlandırılmış süreksiz iletken takviye malzemesi içeren kompozit bant durduran FSY modeli tercih edilmiştir. Bilindiği gibi kompozit malzemeler; optimum özellikler elde etmek için en az iki veya daha fazla elektriksel ve mekaniksel özelliği farklı olan malzemelerin makro düzeyde kontrollü bir şekilde birleştirilmesi sonucu oluşturulan yapılardır. Kompozit malzemeler düşük özgül ağırlıklı olmaları, yüksek mukavemet ve darbe dayanımı sağlamaları, kolay şekillendirilmelerinin yanında üstün elektriksel özelliklerinden dolayı günümüzde başta havacılık ve denizcilik sanayi olmak üzere sağlık, otomotiv ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [17,18].

Literatür çalışmaları incelendiğinde iletken takviye malzemelerinin dairesel olduğu gibi daha nadiren dikdörtgen, hegzagonal ve poligonal kesitli olduğu görülmekle birlikte dairesel kesitli takviyelerin maliyeti ve kullanım kolaylığı ile üstünlük sağladığı görülmektedir. Ayrıca, süreksiz fiberlerin tasarım serbestliğinin sürekli fiber takviyelerine göre daha yüksek olması kompozit malzeme tasarımlarında daha çok tercih edilmelerine sebep olmaktadır [17]. Sağladıkları bu avantajlardan dolayı önerilen tez çalışmasında takviye malzemesi olarak dairesel kesitli süreksiz iletken fiber yapılarının kullanılmaları tercih edilmiştir.



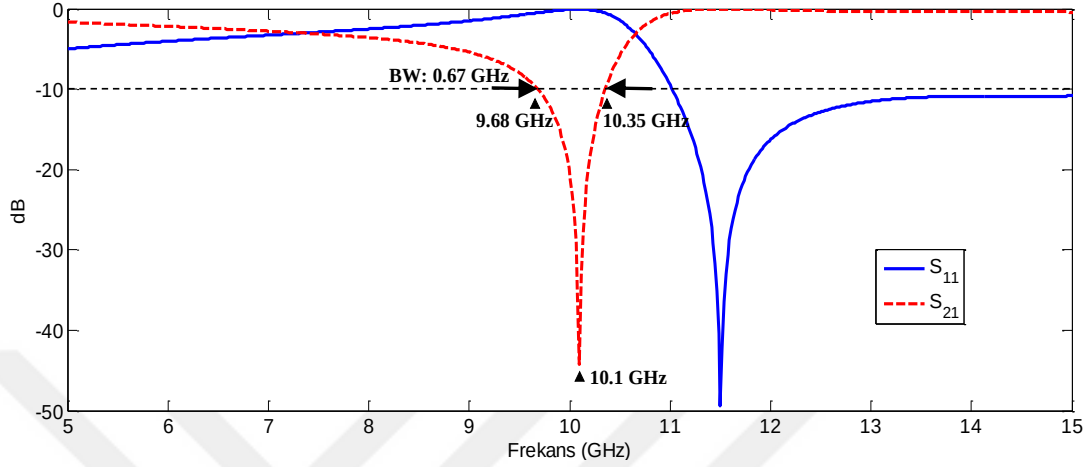
Şekil 4.1. Bant durduran kompozit FSY'nin tasarım parametreleri (a) ön görünüş, (b) perspektif görünüş.

Parabolik yüzeye sahip bant durduran kompozit FSY'nin tasarımına geçmeden önce ilk olarak Şekil 4.1.'de verilen düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin tasarımları yapılmış olup parametrenin çalışma frekansı üzerindeki etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi önerilen model takviye malzemelerinin çapı d , tutucu malzemenin kalınlığı t , süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları l , süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki düşey ve yatay boşluklar sırası ile s ve w olmak üzere beş fiziksel, tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği ϵ_r ve takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği σ olmak üzere iki elektriksel parametreye sahiptir. Tasarım parametrelerinin değerleri üç-boyutlu (3D) tam-dalga elektromanyetik benzetim programı CST kullanılarak 10 GHz çalışma frekansı için Tablo 4.1.'de listelendiği şekilde elde edilmiştir [20].

Tablo 4.1. 10 GHz çalışma frekansı için tek bantlı bant durduran FSY'nin parametre değerleri

Parametre	Parametre açıklaması	Parametre değeri
d	Takviye malzemelerinin çapı	1,6 mm
t	Tutucu malzemenin kalınlığı	5 mm
l	Süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları	8 mm
s	Süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki düşey boşluklar	10 mm
w	Süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki yatay boşluklar	10,4 mm
σ	Takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği	$3,56 \times 10^7$ S/m
ϵ_r	Tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği	2,9

Tablo 4.1.'de verilen parametre değerlerine sahip kompozit FSY'nin 5-15 GHz frekans aralığında nümerik olarak elde edilen yansıma ve iletim katsayıları Şekil 4.2.'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.2. Bant durduran düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin frekansa bağlı iletim ve yansıma katsayı değerleri.

Şekil 4.2.'de verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde tasarımı yapılan FSY'nin merkez frekansının ve bant genişliğinin sırası ile 10,1 GHz ve 67 MHz olduğu görülmektedir.

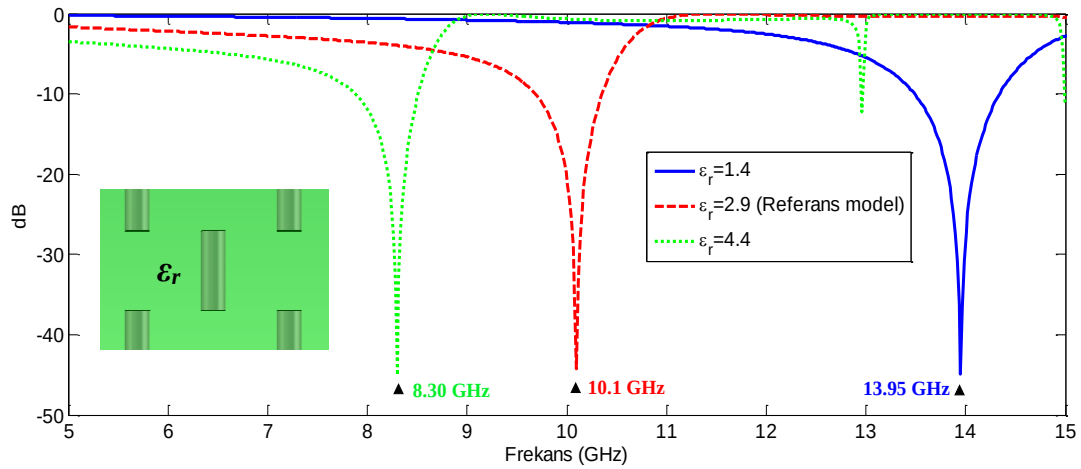
4.1. Düzlemsel Yüzeye Sahip Bant Durduran FSY'nin Parametre Analizi

Düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin frekans cevabı nümerik olarak doğrulandıktan sonra parametre analizlerine geçilmiştir. Analiz çalışmalarında tasarım parametrelerinin etkilerinin daha iyi gözlemlenebilmesi için tasarım parametrelerinden diğerleri sabit kalmak şartı ile sadece bir tanesinin değeri değiştirilmiştir. Analizlerde kullanılan parametre değerleri Tablo 4.2.'de listelenmiştir.

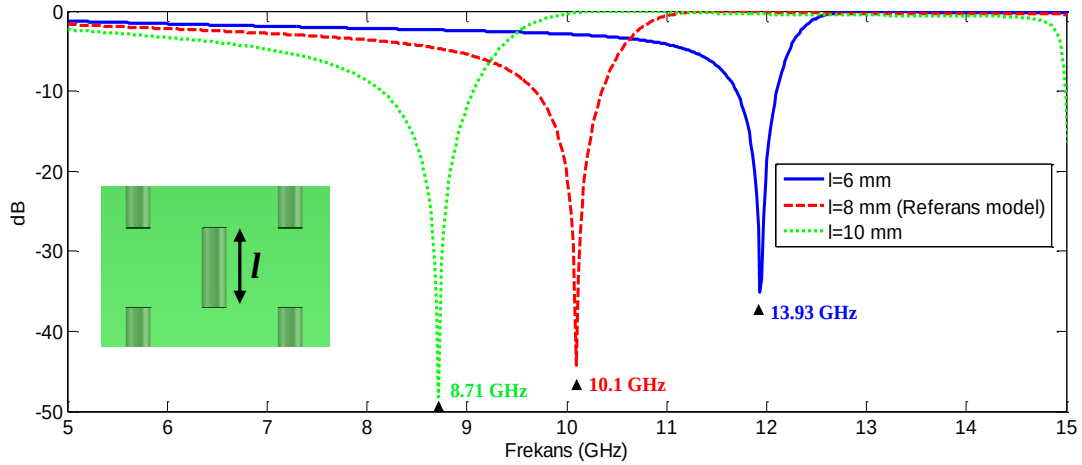
Tablo 4.2. Düzlemsel yüzeye sahip bant durdurucu FSY'nin parametre analizlerinde kullanılan değerler

d (mm)	t (mm)	l (mm)	s (mm)	w (mm)	ϵ_r
1,6	5	8	10	10,4	2,9
0,8	5	8	10	10,4	2,9
2,4	5	8	10	10,4	2,9
1,6	2,5	8	10	10,4	2,9
1,6	7,5	8	10	10,4	2,9
1,6	5	6	10	10,4	2,9
1,6	5	10	10	10,4	2,9
1,6	5	8	7	10,4	2,9
1,6	5	8	13	10,4	2,9
1,6	5	8	10	8,4	2,9
1,6	5	8	10	12,4	2,9
1,6	5	8	10	10,4	1,4
1,6	5	8	10	10,4	4,4

Şekil 4.3.'te verilen frekansa bağlı iletim katsayılarından açıkça görüldüğü gibi tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği 1,4, 2,9 ve 4,4 olarak değiştiğinde bant durdurucu FSY'nin çalışma frekansı sırası ile 13,95 GHz, 10,1 GHz ve 8,30 GHz olarak değişmektedir. Tutucu malzemenin bağıl geçirgenliğinin artması takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşlukların oluşturduğu kapasitif etkileri arttırmakta ve yapının artan kapasitif etkisinden dolayı çalışma frekansını düşürmektedir. Dolayısı ile çalışma frekansı tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği ile ters orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 4.3. Bant durdurucu düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin tutucu malzemenin farklı bağıl geçirgenlik değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.

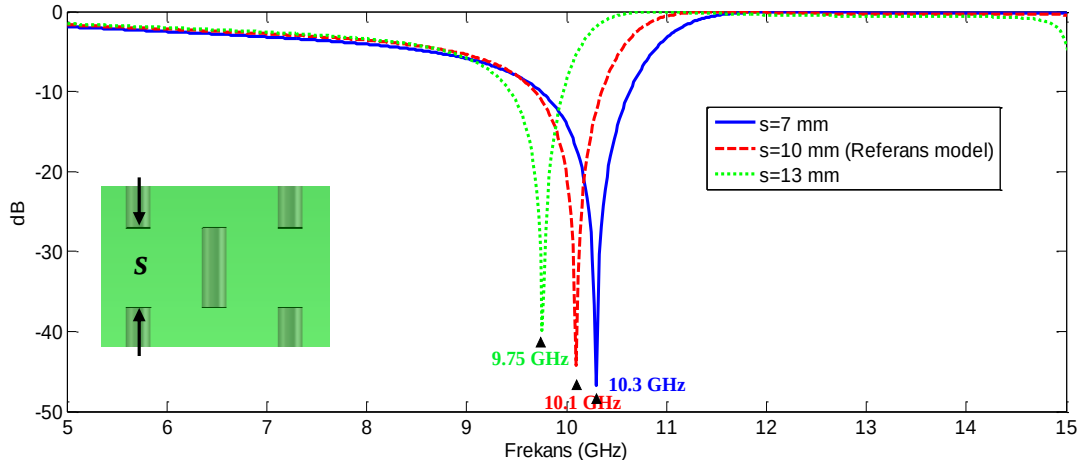


Şekil 4.4. Bant durdurucu düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin takviye malzemelerinin farklı uzunluk değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.

Takviye malzemelerinin üç farklı uzunluk değeri için elde edilen bant durdurucu FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları Şekil 4.4.'te karşılaştırılmıştır. Şekil 4.4.'ten takviye malzemelerinin uzunlukları azaldığında FSY'nin çalışma frekansının yüksek frekanslara doğru kaydığı görülmektedir. Takviye malzemelerinin uzunluklarının artması FSY'nin toplam endüktans değerini arttırarak çalışma frekansını düşürmektedir. Bu sonuç takviye malzemelerinin elektriksel boyları göz önüne alınarak da açıklanabilir. Eşitlik 4.1'de verildiği gibi çalışma frekansı elektriksel boy (λ) ile ters orantılı olarak değişmektedir. Şekil 4.4.'te elde edilen sonuçlar bunu doğrulamaktadır.

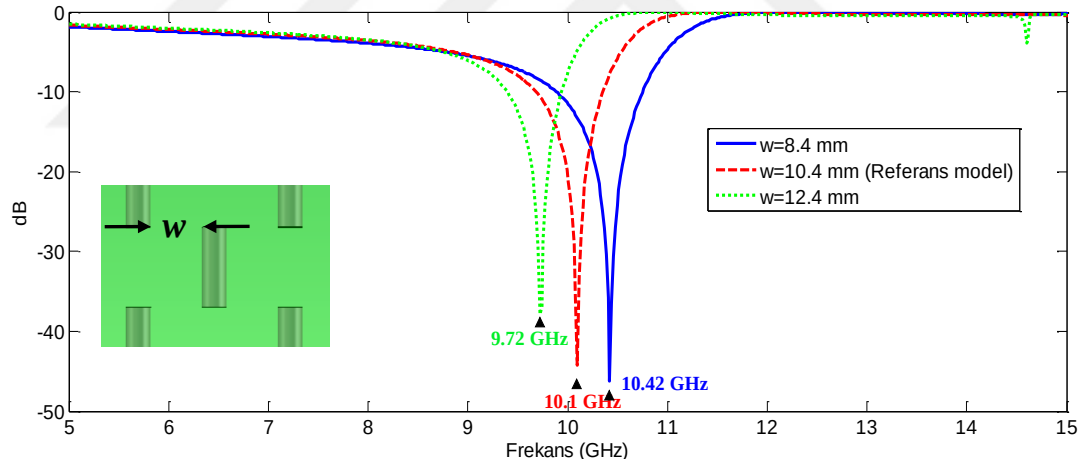
$$f = C_0 / \lambda \quad (4.1)$$

Süreksiz iletken takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşlukların farklı varyasyonları için elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri sırası ile Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da verilmiştir. Şekil 4.5.'de verilen sonuçlardan iletken takviye malzemeleri arasındaki düşey boşlukların 3 mm'lik artışına karşılık çalışma frekansının düşük frekanslara doğru kaydığı görülmüştür. Takviye malzemeleri arasındaki düşey boşlukların artması hem takviyeler arasında düşey ekseninde oluşan dairesel paralel plaka kapasitans değerlerini hem de çalışma frekansını azaltmaktadır.



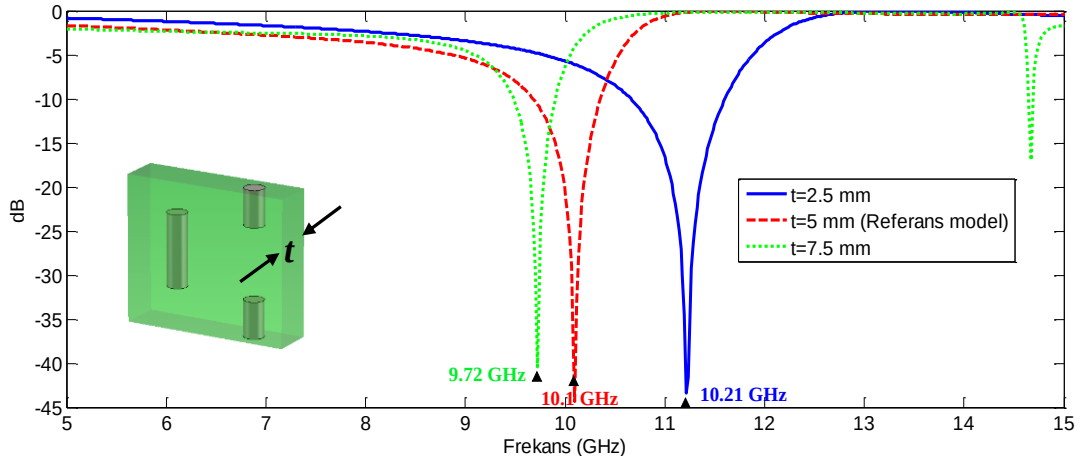
Şekil 4.5. Bant durduran düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin takviye malzemeleri arasındaki farklı düşey boşluk değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.

Şekil 4.6.'da verilen iletim parametre değerleri incelendiğinde takviye malzemeleri arasındaki yatay boşlukların artırılması ile yapının kapasitif değerinin azaldığı ve buna bağlı olarak çalışma frekansının arttığı görülmüştür.



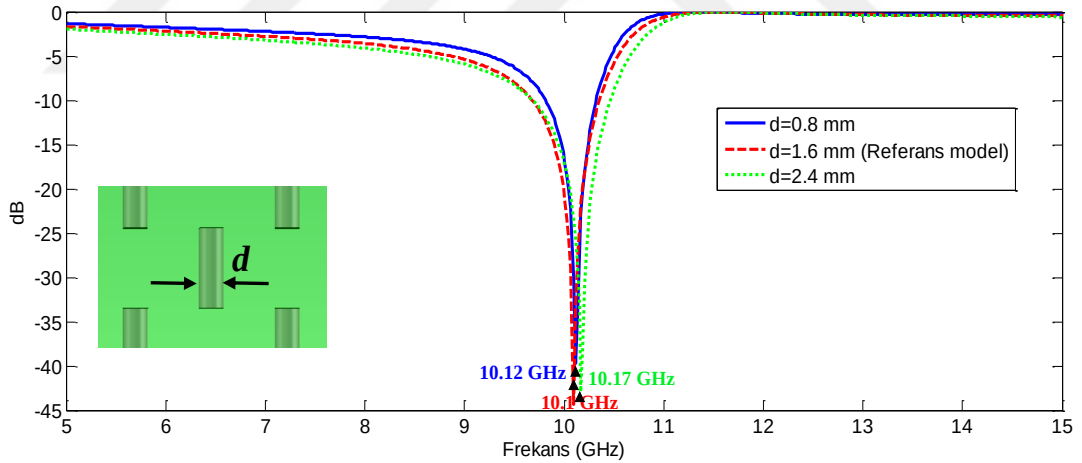
Şekil 4.6. Bant durduran düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin takviye malzemeleri arasındaki farklı yatay boşluk değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.

Şekil 4.7. kompozit FSY'nin iletim parametre değerlerini tutucu malzemenin kalınlığına bağlı olarak karşılaştırmaktadır. Şekil 4.7.'den tutucu malzemenin kalınlığının artmasının FSY'nin çalışma frekansını düşürdüğü görülmektedir. Bu sonuç daha ince FSY tasarımlarının yapılması açısından oldukça önemlidir.



Şekil 4.7. Bant durduran düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin tutucu malzemenin farklı kalınlık değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.

Son olarak, takviye malzemelerinin çapının iletim parametre değerleri üzerine etkileri Şekil 4.8.'de gösterilmiştir. Şekil 4.8. incelendiğinde takviye malzemelerinin çapının artmasının veya azalmasının FSY'nin çalışma frekansında fazla bir değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür.

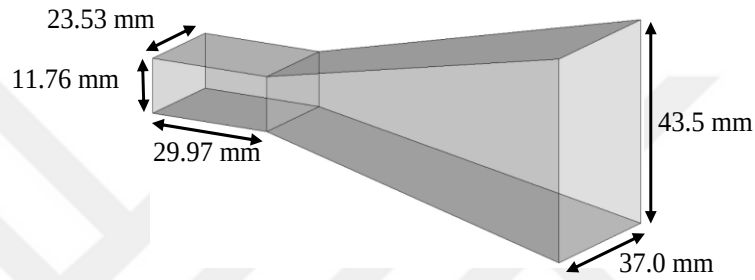


Şekil 4.8. Bant durduran düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin takviye malzemelerinin farklı çap değerleri için frekansa bağlı iletim katsayıları.

Sonuç olarak, düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin parametre analizlerinden tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği ile takviye malzemelerinin uzunluklarının çalışma frekansı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Yapılan analiz çalışmaları istenilen çalışma frekansı için FSY'nin frekans cevabının tasarımcılar tarafından doğru bir şekilde ayarlanmasına olanak sağlayacaktır.

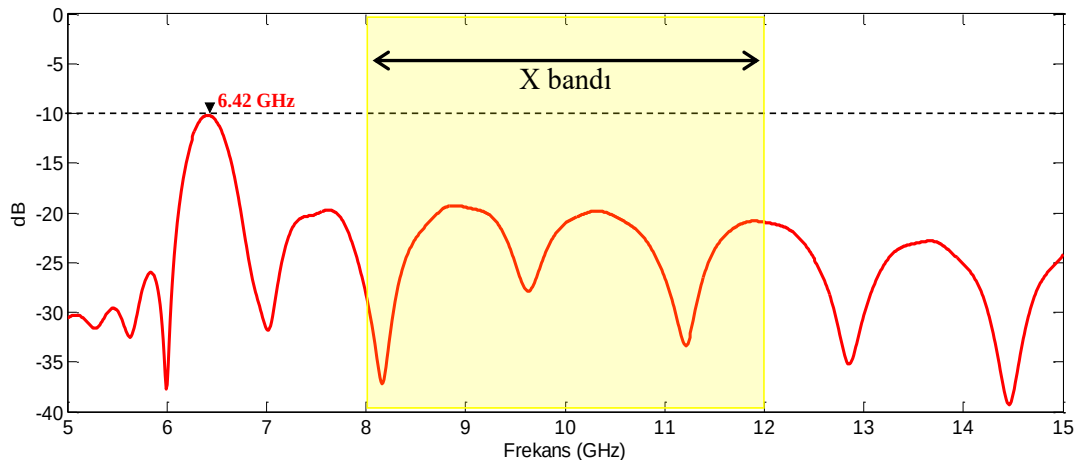
4.2. Parabolik Bant Durduran Reflektör Tasarımı ve Nümerik Analiz Sonuçları

Parabolik bant durduran FSY reflektör tasarımına başlanmadan önce ilk olarak merkez frekansı 10 GHz olan 8 GHz-12 GHz çalışma frekans aralığına sahip besleme anteni tasarımı yapılmıştır. Besleme anteni olarak yüksek yönlendiricilik kazancı sebebiyle parabolik reflektör antenlerde yaygın olarak kullanılan piramidal horn anten tercih edilmiştir. Piramidal horn antenin geometrisi ve tasarım parametre değerleri Şekil 4.9.'da verilmiştir.



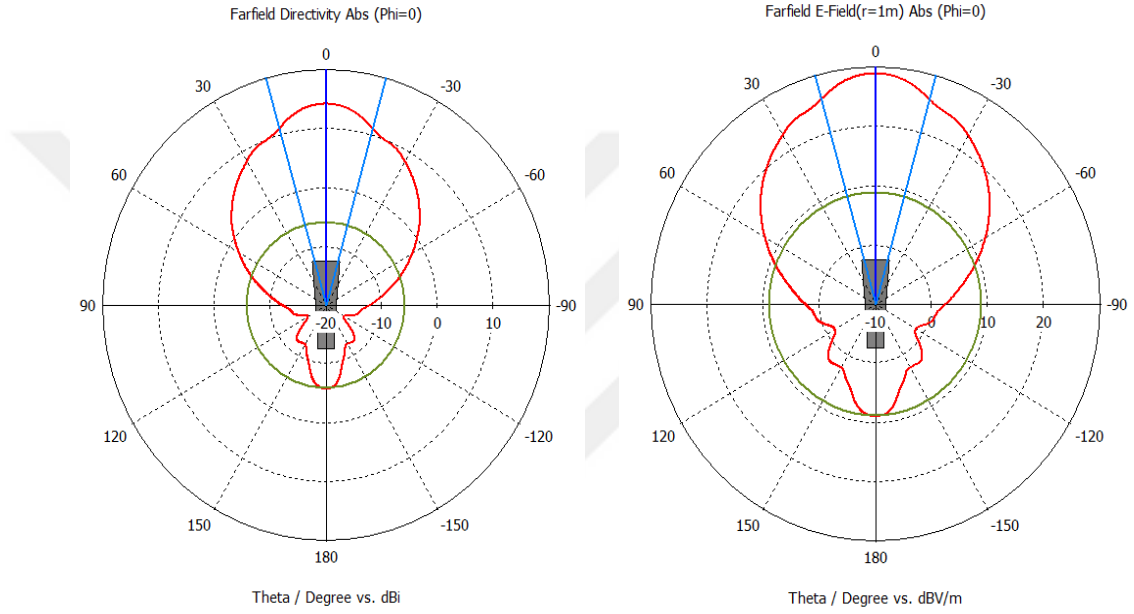
Şekil 4.9. Piramidal horn antenin tasarım parametre değerleri.

Horn antenin nümerik analizler sonucu elde edilen geri dönüş kaybı grafiği Şekil 4.10.'da verilmiştir. Şekil 4.10. incelendiğinde tasarlanan antenin X-bandını da kapsayacak şekilde 6,4-15 GHz frekans aralığında çalışabildiği görülmektedir. Bu çalışma bandında anten -10 dB'den daha az geri dönüş kaybına sahiptir.

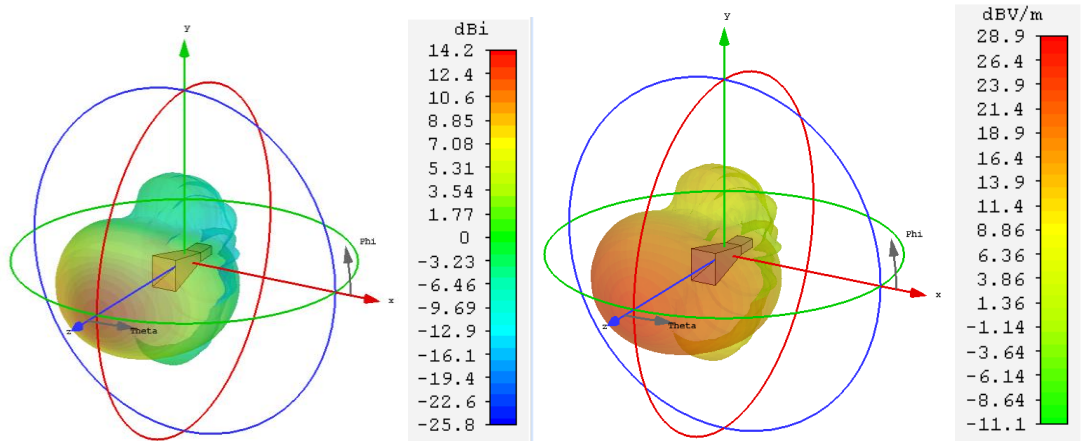


Şekil 4.10. Piramidal horn antenin geri dönüş kaybı.

Bölüm 2'de detaylı olarak açıklandığı gibi yönlü antenlerin performans analizlerinde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer temel parametre ise ışıma diyagramıdır. Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'de sırasıyla tasarlanan antenin 10 GHz merkez frekansında nümerik analizler sonucu elde edilen 2D ve 3D uzak alan ışıma örüntüleri gösterilmektedir. Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'den horn antenin 10 GHz 'de ana lob açısının 0° , yönlendiriciliğinin 14,2 dBi ve -3 dB hüzme genişliğinin $31,2^\circ$ olduğu görülmektedir.

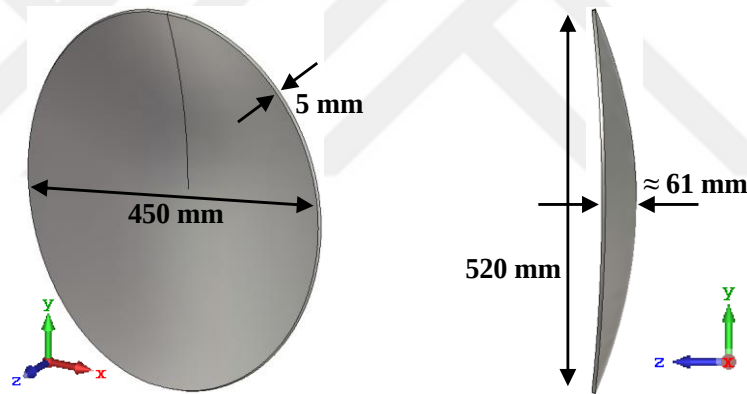


Şekil 4.11. Horn antenin 2D ışıma örüntüsü.

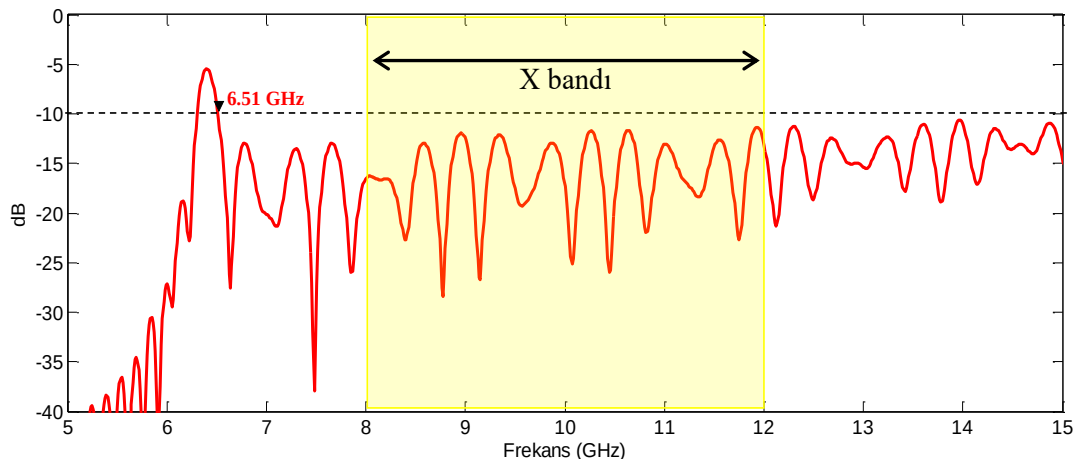


Şekil 4.12. Horn antenin 3D ışıma örüntüsü.

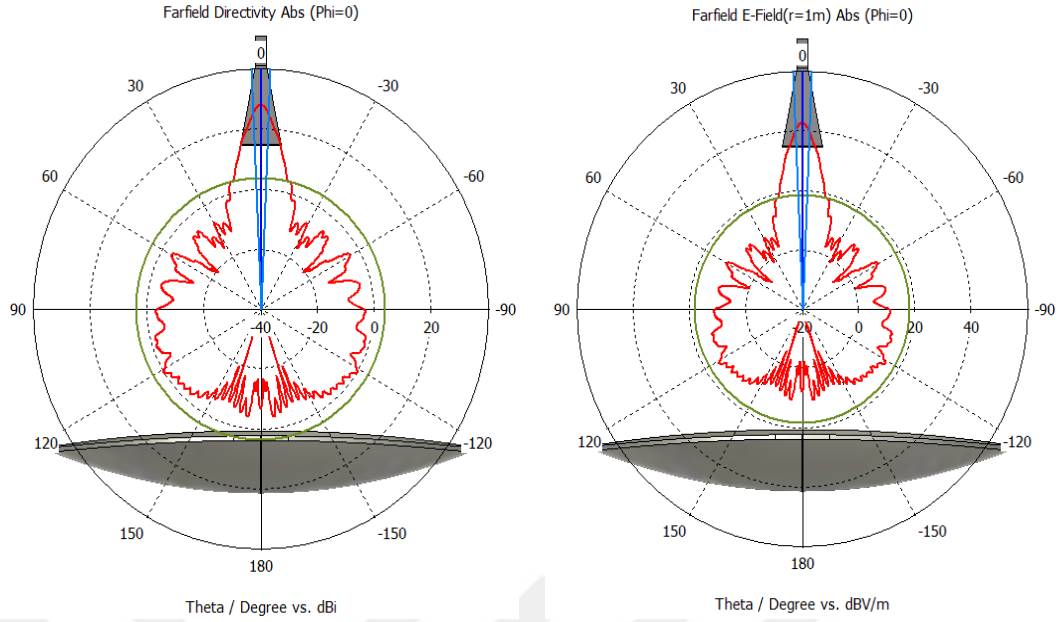
Besleme anten tasarımından sonra ikinci aşamada Şekil 4.13.'te gösterildiği gibi 5 mm kalınlığa, 520 mm×450 mm çap uzunluğuna ve yaklaşık 61 mm derinliğe sahip metal parabolik reflektör yüzey tasarlanmış ve horn anten reflektörün odağına konumlandırılmıştır. Metal reflektör yüzeyin geri dönüş kaybı grafiği ile 10 GHz frekansında nümerik analizler sonucu elde edilen 2D ve 3D uzak alan ışınma örüntüleri sırası ile Şekil 4.14., Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da karşılaştırılmıştır. Şekil 4.14.'ten metal parabolik reflektörün 6,51 GHz-15 GHz frekans aralığında çalışabildiği görülürken, Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'dan metal parabolik reflektörün 10 GHz' de ana lob açısının 0° , yönlendiriciliğinin 28 dBi ve -3 dB hüzme genişliğinin 5° olduğu görülmektedir. Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da verilen metal parabolik reflektör yüzeye sahip antenin nümerik analiz sonuçları daha sonra parabolik yüzeye sahip bant durduran FSY'nin nümerik analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde referans olarak kullanılacaktır.



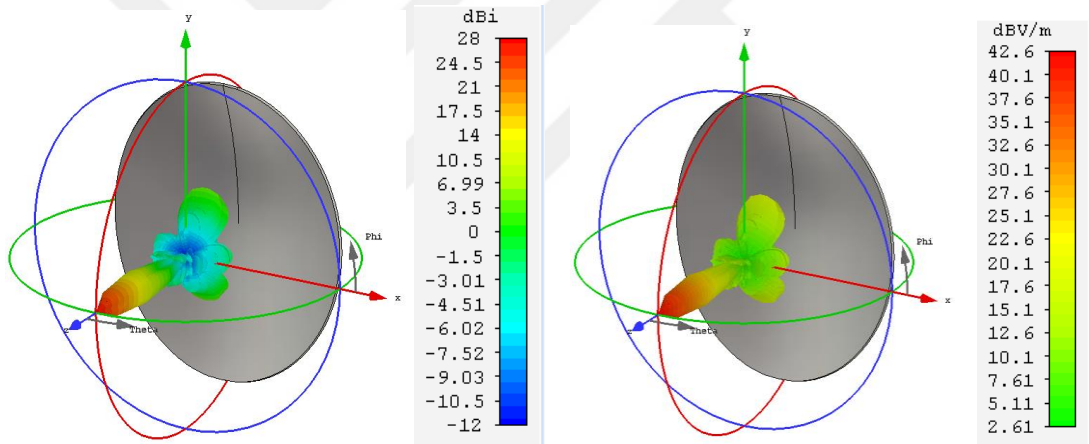
Şekil 4.13. Metal parabolik reflektörün tasarım parametre değerleri.



Şekil 4.14. Metal parabolik reflektörün geri dönüş kaybı.

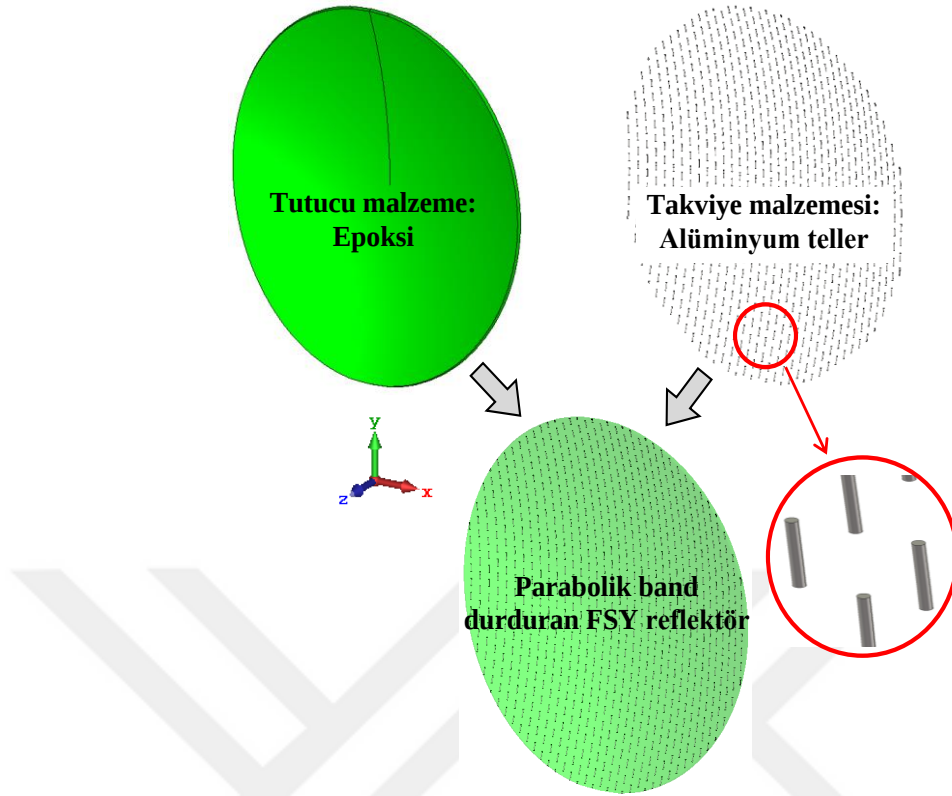


Şekil 4.15. Metal parabolik reflektörün 2D ışıma örüntüsü.

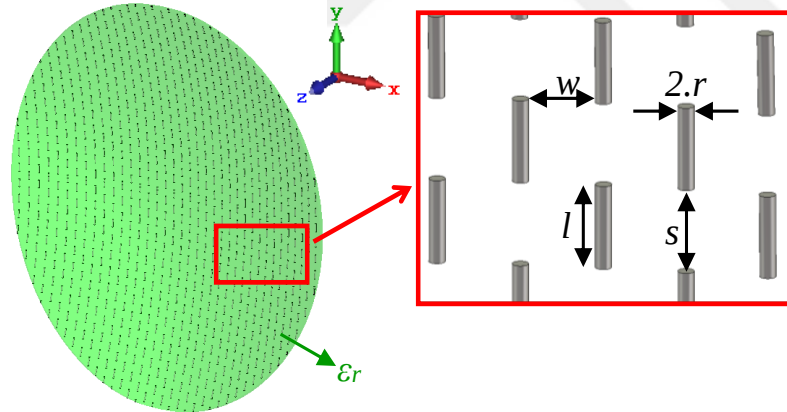


Şekil 4.16. Metal parabolik reflektörün 3D ışıma örüntüsü.

Anten tasarımının üçüncü ve son aşamasında, parabolik bant durdurucu FSY reflektör tasarımı elde etmek için Şekil 4.17.'de gösterildiği gibi reflektör antenin yansıtıcı yüzeyine sonlu uzunluklu takviye malzemeleri aralarında yatayda ve düşeyde sırasıyla 10,4 mm ve 10 mm boşluk olacak şekilde periyodik yerleştirilmiştir. Takviye malzemeleri arasındaki boşluklar ile reflektör yüzeyde kullanılan tutucu malzemenin kalınlığı ve elektriksel özellikleri Bölüm 4.1'de tasarımı ve analizi yapılan 10 GHz çalışma frekansına sahip bant durdurucu düzlemsel FSY model ile aynı seçilmiştir.



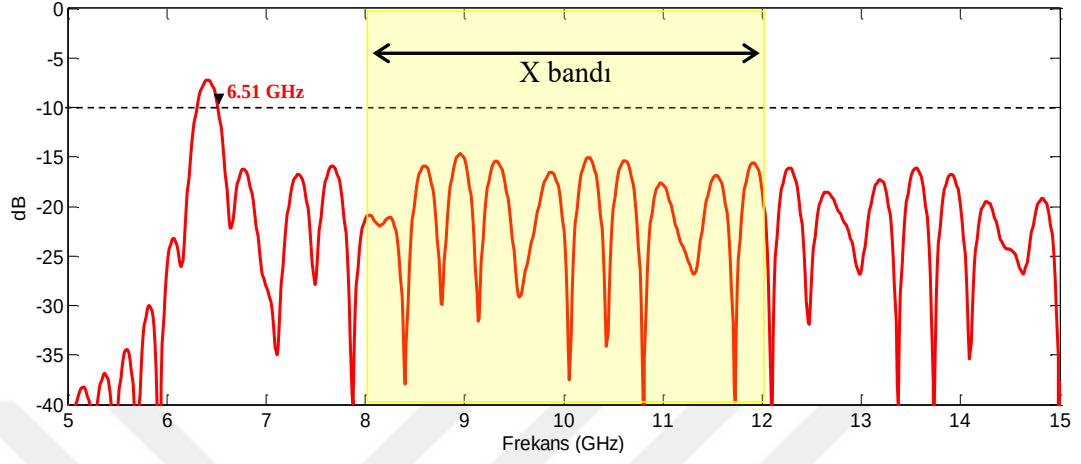
Şekil 4.17. Parabolik bant durduran FSY reflektörün bileşenleri.



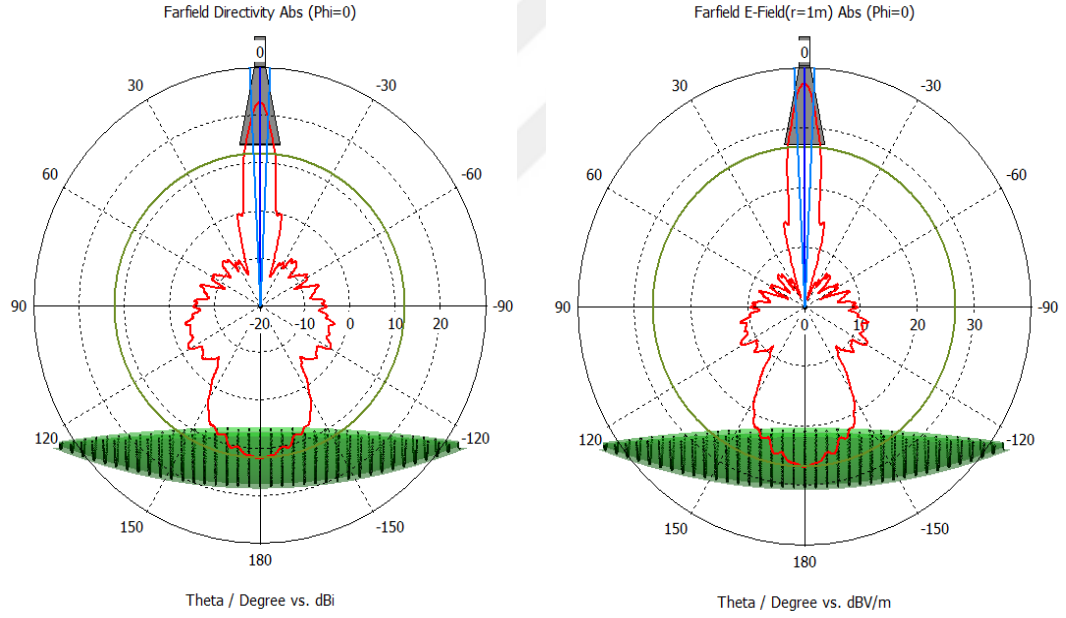
Şekil 4.18. Parabolik bant durduran FSY reflektörün tasarım parametreleri.

Metal reflektör yüzeyin nümerik analizlerinde olduğu gibi parabolik bant durduran FSY reflektörün de geri dönüş kaybı grafiği ile 10 GHz çalışma frekansı için elde edilen 2D ve 3D uzak alan ışınma örüntüleri sırası ile Şekil 4.19., Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.'de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.19.'dan parabolik bant durduran FSY reflektörün metal reflektörde olduğu gibi 6,51 GHz-15 GHz frekans aralığında çalışabildiği görülmektedir. Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.'den parabolik bant durduran FSY reflektörün

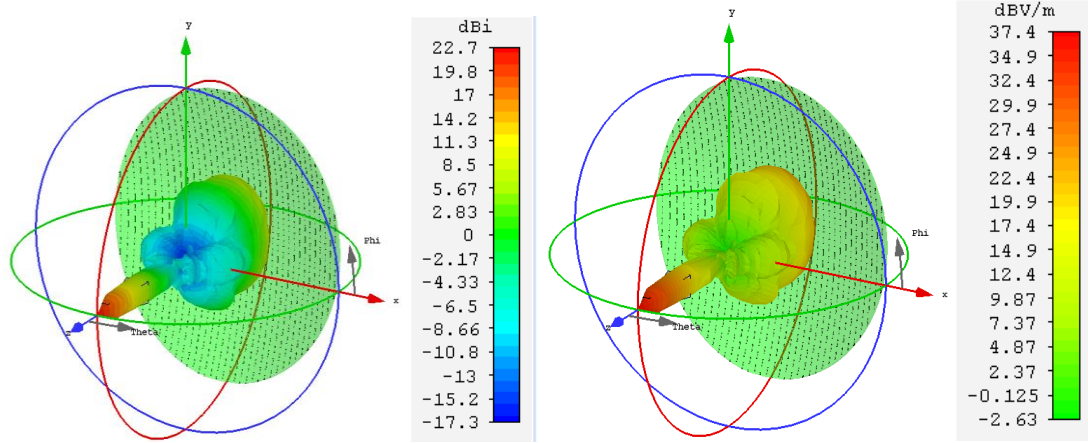
çalışma frekansında ana lob açısının 0° , yönlendiriciliğinin 22,7 dBi ve -3 dB hüzme genişliğinin $5,1^\circ$ olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19. Parabolik bant durduran FSY reflektörün geri dönüş kaybı.

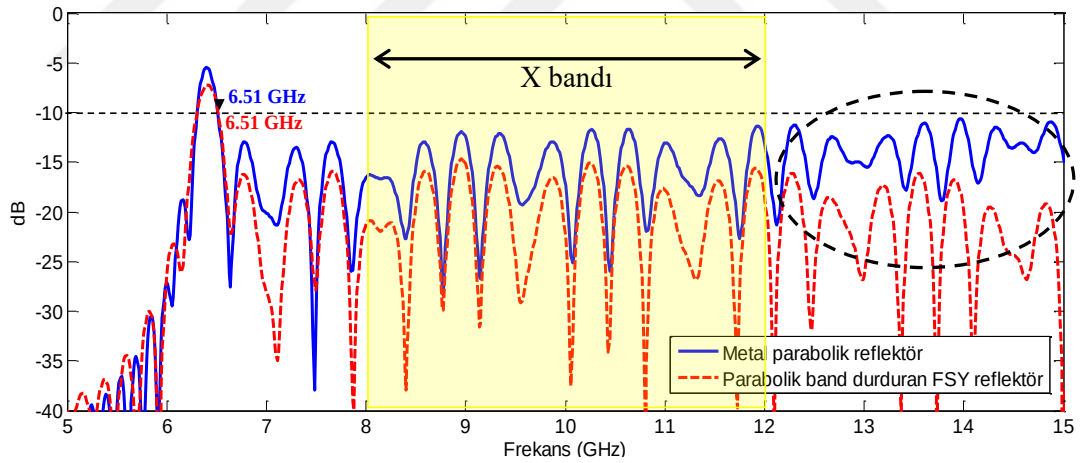


Şekil 4.20. Parabolik bant durduran FSY reflektörün 2D ışıma örüntüsü.

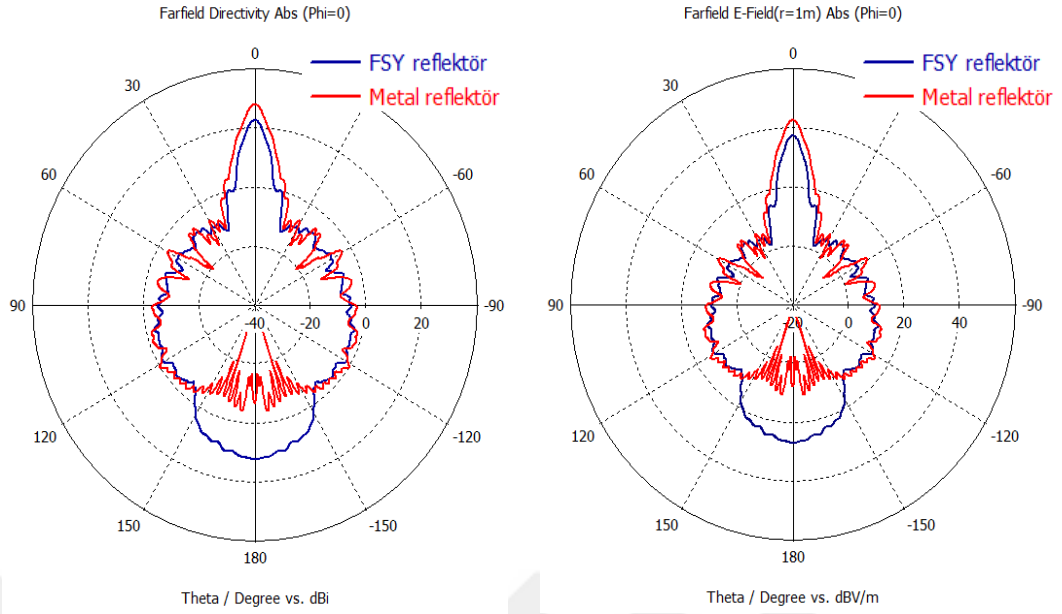


Şekil 4.21. Parabolik bant durduran FSY reflektörün 3D ışıma örüntüsü.

Parabolik bant durduran FSY reflektörün performansının daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.’de verilen geri dönüş kaybı ve 2D uzak alan ışıma örüntüleri ile Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.’te elde edilen metal parabolik reflektörün geri dönüş kaybı ve 2D uzak alan ışıma örüntüleri sırası ile Şekil 4.22. ve Şekil 4.23.’te karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.22. Metal parabolik reflektör ile parabolik bant durduran FSY reflektörün geri dönüş kayıplarının karşılaştırılması.



Şekil 4.23. Metal parabolik reflektör ile parabolik bant durduran FSY reflektörün ışıma örüntülerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.22.'den geri dönüş kayıplarının maksimum genlik değerleri arasındaki farkın X-bandında az iken bandın dışında yüksek frekanslara doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. Bunun sebebi FSY reflektörün çalışma bandı içinde bant durduran filtre karakteristiği sergilemesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.23.'ten parabolik bant durduran FSY reflektörün çalışma frekansı olan 10 GHz'deki uzak alan ışıma örüntüsünün genlik ve şekil olarak metal parabolik reflektörün aynı frekanstaki ışıma örüntüsüne benzediği görülmektedir.

BÖLÜM 5. PROTOTİP ÜRETİMİ

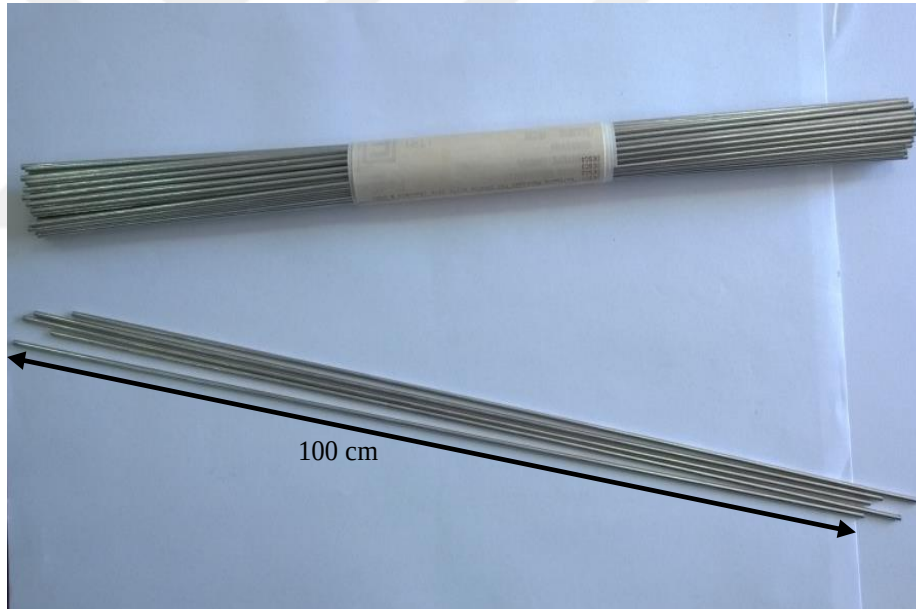
Bu bölümde nümerik analizleri yapılan bant durduran filtre karakteristiğine sahip FSY'nin prototip üretim aşamaları detaylı olarak açıklanmıştır. Prototip üretimine öncelikle düzlemsel yüzey ile başlanmış, düzlemsel yüzey üretiminden elde edilen bilgi ve becerilerden faydalanılarak parabolik yüzey üretimi gerçekleştirilmiştir.

5.1. Üretimde Kullanılacak Gereç ve Yöntemler

Bu tez çalışmasında, frekans seçici yüzeyin prototip üretimi için elle yatırma (Hand Lay-Up) yöntemi tercih edilmiştir. Elle yatırma yöntemi, düşük teknolojiye sahip oluşu ve özel bir el becerisi gerektirmeyişinden dolayı günümüzde fiber takviyeli kompozit panel üretimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretimlere başlanmadan önce nümerik analizler sonucu elde edilen FSY'nin elektriksel ve fiziksel parametre değerlerine sahip tutucu ve takviye malzemeleri belirlenmiştir. Bu kapsamda 2,9 bağıl geçirgenliğe sahip Epakem EP-100 marka şeffaf epoksi tutucu malzeme olarak seçilirken 1.6 mm çaplı dairesel kesitli GEKA S-6A AL 99.5 marka yüksek saflıktaki alüminyum teller takviye malzemesi olarak seçilmiştir. Epoksinin şeffaf olması, içine konumlandırılacak takviye malzemelerinin dizilişinin rahatça görülmesine olanak sağlarken tutucu malzemelerin alüminyum olması FSY'lerin daha hafif ve ekonomik olarak daha ucuz olmasını sağlamıştır. Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.'de sırası ile üretimlerde kullanılan tutucu ve takviye malzemeleri gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Epakem EP-100 marka şeffaf epoksi reçine ve sertleştirici.



Şekil 5.2. 100 cm uzunluklu GEKA S-6A AL 99.5 marka alüminyum teller.

Şekil 5.1.'den görüldüğü gibi epoksi, reçine ve sertleştirici olmak üzere iki bileşenden oluşur. Reçine ve sertleştiricinin oranları doğrultusunda tutucu malzeme farklı fiziksel ve mekanik mukavemete sahip olur.

Üretimlerin ilk aşamasında Şekil 5.2.'de verilen 100 cm uzunluğundaki takviye malzemelerin boyları nümerik analizlere uygun olacak şekilde kesilmiştir. Tellerin

kesimi sırasında aşınma, çapak, ezilme vb. gibi fiziki deformasyonların oluşmaması için tel erozyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde iki elektrot arasına gerilmiş üzerinden yüksek akım geçirilen iletken telin aşındırıcı etkisi kullanılarak iletken malzemenin hassas bir şekilde kesimi gerçekleştirilir. Kesme işlemi sonucu elde edilen 8 mm uzunluğa sahip takviye malzemeleri Şekil 5.3.'te gösterilmiştir.



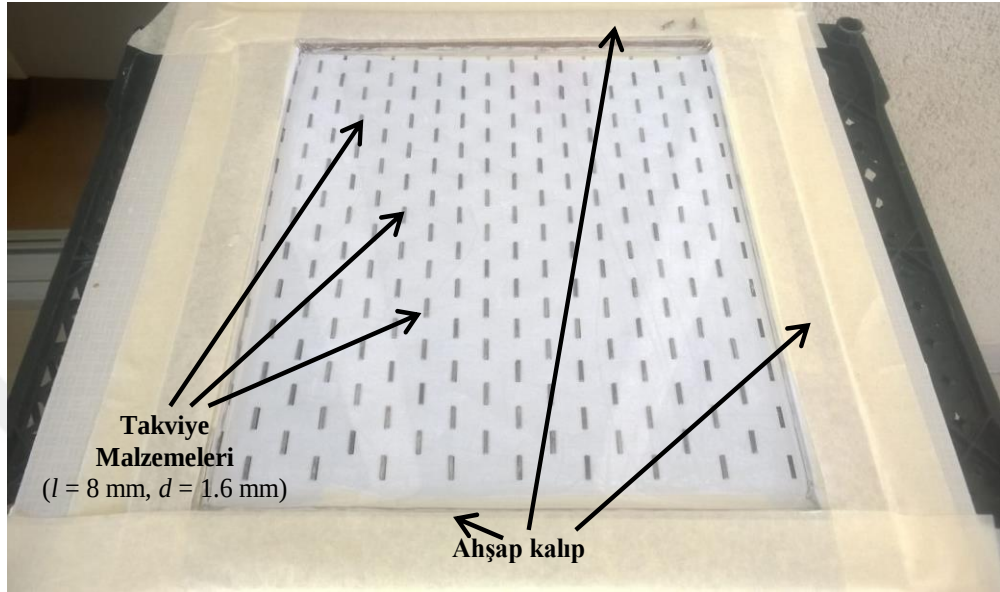
Şekil 5.3. Tel erozyon yöntemi ile kesilmiş alüminyum teller.

Üretimlerin ikinci aşamasında düzlemsel yüzeye sahip FSY ile parabolik yüzeye sahip FSY'nin üretimleri için kalıp hazırlama aşamalarına geçilmiştir.

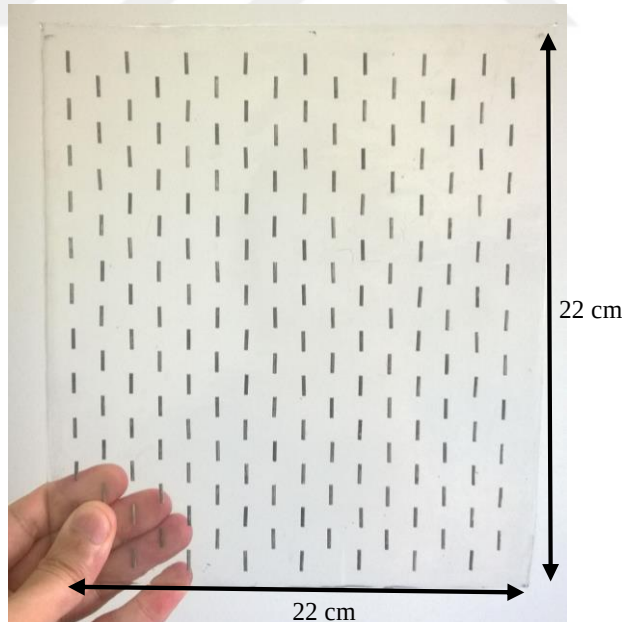
5.2. Düzlemsel Yüzeye Sahip Frekans Seçici Yüzey Üretim Aşamaları

Düzlemsel yüzeye sahip bant durduran FSY'nin prototip üretiminde basit geometrisinden dolayı Şekil 5.4.'te gösterildiği gibi 22 cm×22 cm×5 cm boyutlarında ahşap kalıp hazırlanmıştır. İletken takviye malzemelerinin simülasyon modeline uygun olacak şekilde konumlandırılıp hizalanmaları için şablon kağıt kalıbın tabanına serilmiş ve tek tarafı yapışkanlı streç film ile üzeri kaplanmıştır. Tutucu malzemenin kalıptan rahatlıkla ayrılabilmesini sağlamak için ilk olarak ahşap kalıbın bütün yüzeyine silikon kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Daha sonra iletken takviye malzemeleri şablon kâğıt üzerine konumlandırılıp üzerlerine 1'e ½ oranında sırasıyla reçine ve sertleştirici içeren epoksi karışımı ilave edilmiştir. Epoksinin yoğunluğundan dolayı hareket eden takviye malzemeleri sivri uçlu bir cımbız yardımıyla düzeltilmiş ve oluşan hava kabarcıkları giderilmiştir. Son olarak oda sıcaklığında 24 saat kurumaya

bırakılan FSY kalıptan ayrılarak iletken çubukların tamamen tutucu malzeme ile kaplanması için diğer yüzeye de homojen epoksi karışımı uygulanılmıştır. Şekil 5.5.'te prototip üretimi tamamlanmış frekans seçici yüzey gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Prototip üretiminde kullanılan ahşap kalıp.

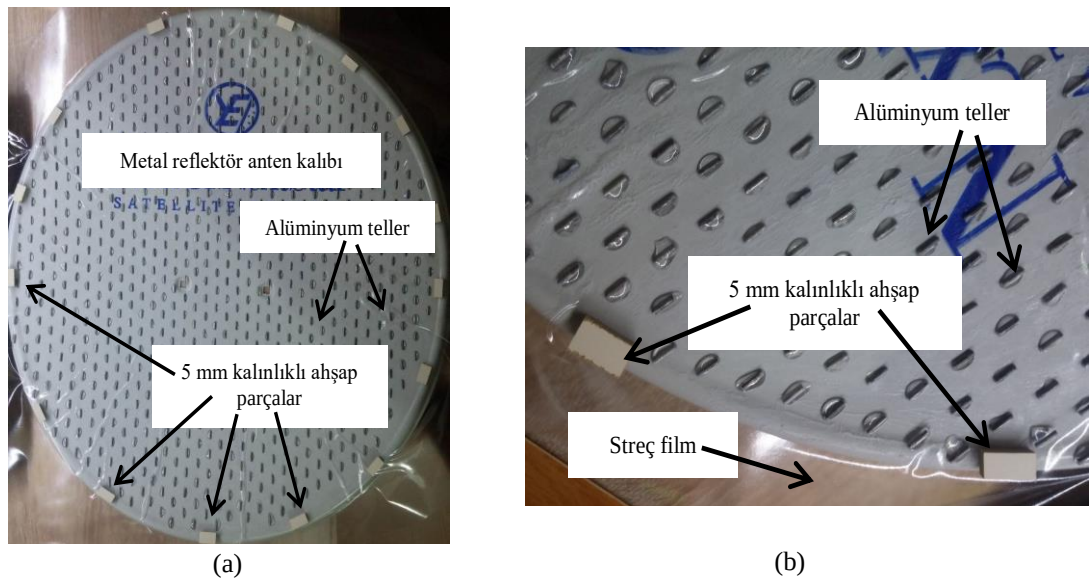
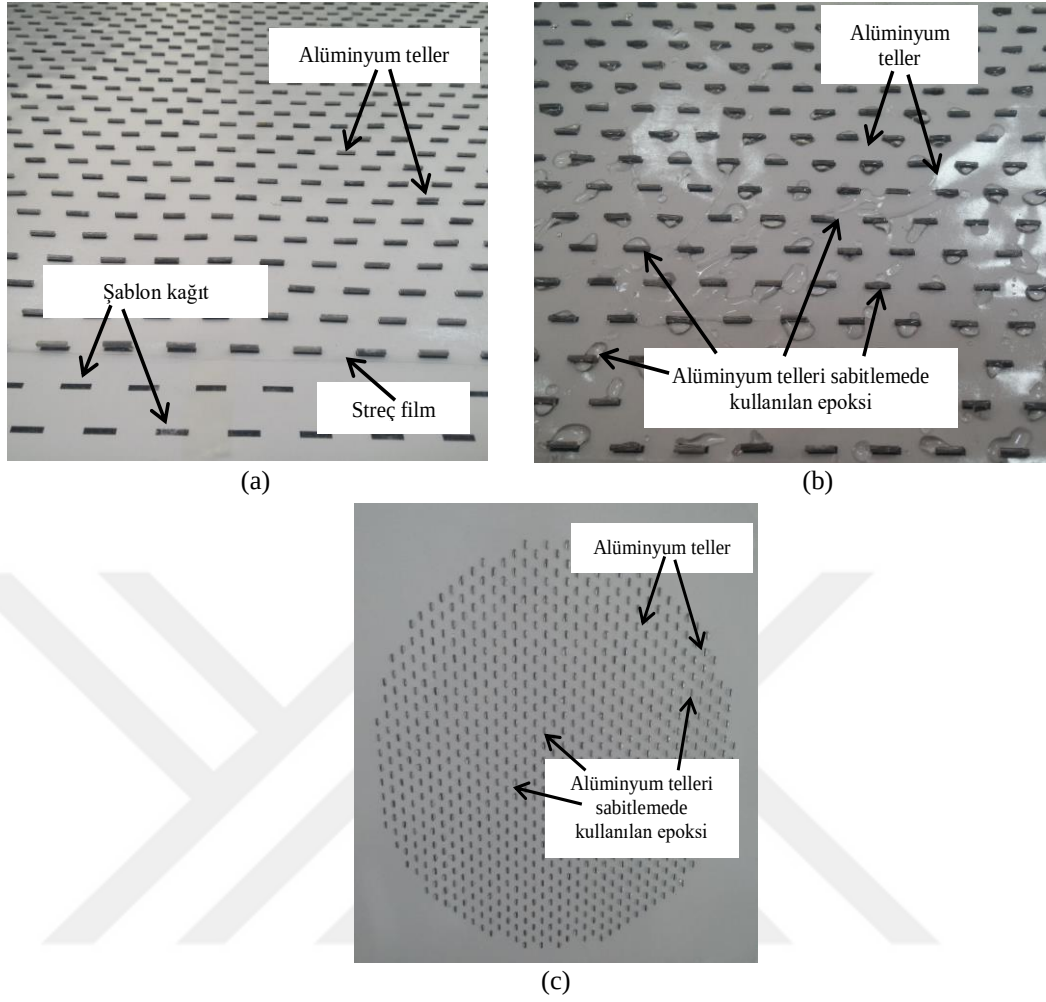


Şekil 5.5. Prototip üretimi tamamlanan düzlemsel yüzeye sahip bant durduran FSY.

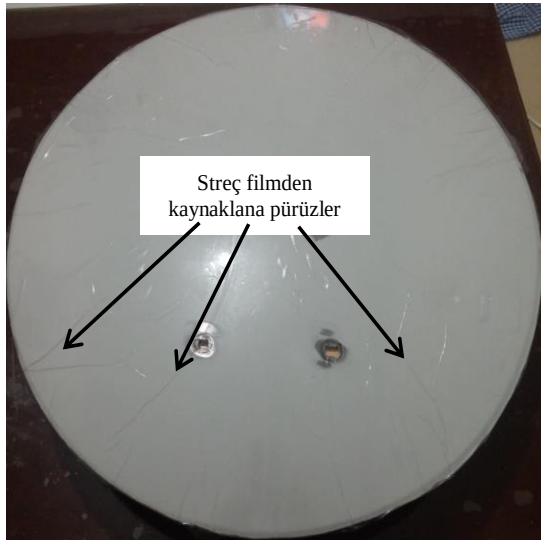
5.3. Parabolik Yüzeye Sahip Frekans Seçici Yüzey Üretim Aşamaları

Parabolik yüzeye sahip bant durduran FSY'nin prototip üretiminde ahşap kalıp yerine iki adet Next & NextStar marka parabolik reflektörler kalıp olarak kullanılmıştır. Düzlemsel yüzeye sahip FSY tasarımlarında olduğu gibi şablon kâğıt hazırlanmış ve üzerine tek tarafı yapışkanlı streç film serilmiştir. Şekil 5.6.'da görüldüğü gibi iletken takviye malzemeleri şablon kâğıt üzerine konumlandırılmış ve her bir takviye malzemesi üzerine hazırlanan epoksi bir şırınga yardımı ile tek tek damlatılıp kurumaya bırakılmıştır. Bu sayede takviye malzemelerinin uygulanacak epoksinin yoğunluğundan dolayı hareket etmeleri engellenmiş ve konumları sabitlenmiştir. Ayrıca sabitleme işleminin farklı bir yapıştırıcı malzeme kullanılmayıp epoksi ile yapılması bant durduran FSY'nin bağıl geçirgenlik değerinin değişmemesini sağlamıştır.

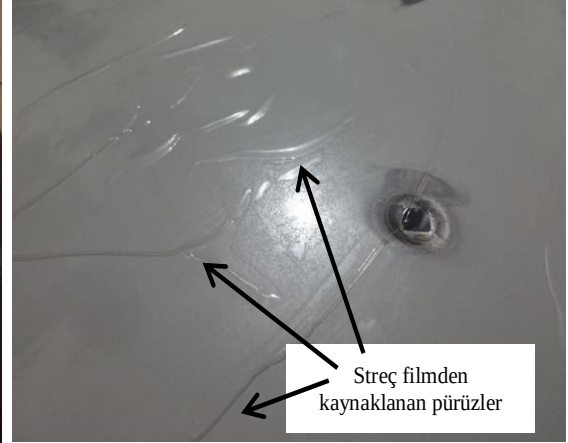
Şekil 5.7.'de görüldüğü gibi şablon kâğıt yardımı ile streç film üzerine dizilimleri tamamlanan takviye malzemeleri reflektör antenin iç bükey yüzeyine yapıştırıcı kullanarak yapıştırılmıştır. Yapıştırma işleminden sonra şablon kâğıt ile reflektör arasında oluşan hava kabarcıkları giderilmiştir. Bu işlem takviye malzemelerinin aynı ekseninde olmaları açısından son derece önemlidir. Tutucu malzemenin kalıp olarak kullanılan reflektör antenlerden kolaylıkla ayrılması için üretimlerde kullanılan ikinci reflektörün dış bükey yüzeyine de tek tarafı yapışkanlı streç film serilmiştir. Streç filminden kaynaklanan pürüzler Şekil 5.8.'de gösterilmiştir. Üretimlerin son aşamasında kalıp için hazırlanan reflektörler aralarında 5 mm olacak şekilde bir araya getirilmişlerdir. Reflektörler arasındaki mesafeyi ayarlamak için 5 mm kalınlığa sahip ahşap parçalar iç bükey yüzeyin kenarlarına konumlandırılmıştır (Bkz. Şekil 5.9.). Uygulanacak epoksinin kenarlardan dışarı akmasını engellemek amacı ile reflektör antenlerin kenarlarına silikon yapıştırıcı uygulanmıştır. Daha sonra Şekil 5.7.'de gösterildiği gibi üsteki reflektörün merkezinde bulunan açıklıklardan hazırlanmış olan homojen epoksi karışımı dökülmüştür. Oda sıcaklığında 48 saat bekledikten sonra parabolik yüzeye sahip bant durduran FSY kalıptan ayrılmıştır. Prototip üretimi tamamlanan FSY Şekil 5.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Dizilimi yapılmış şeffaf folyonun anten kalıba yerleştirilmiş hali.

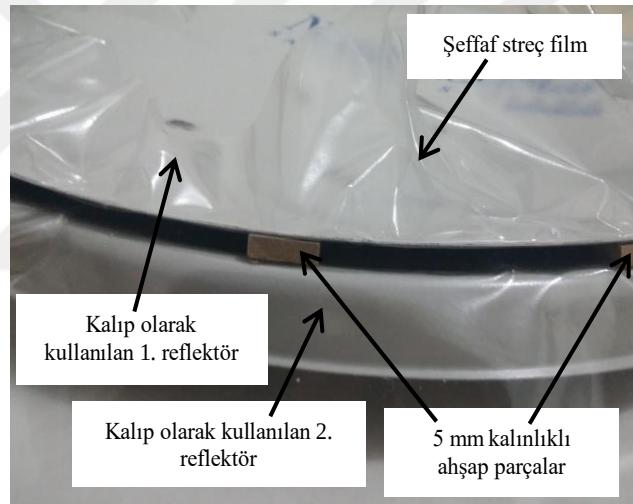


(a)



(b)

Şekil 5.8. Şeffaf folyonun dış bükey anten kalıba yerleştirmiş hali.

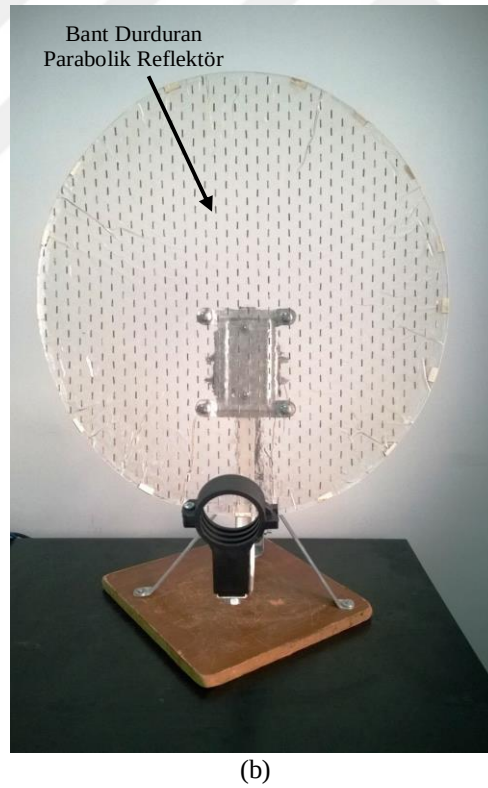
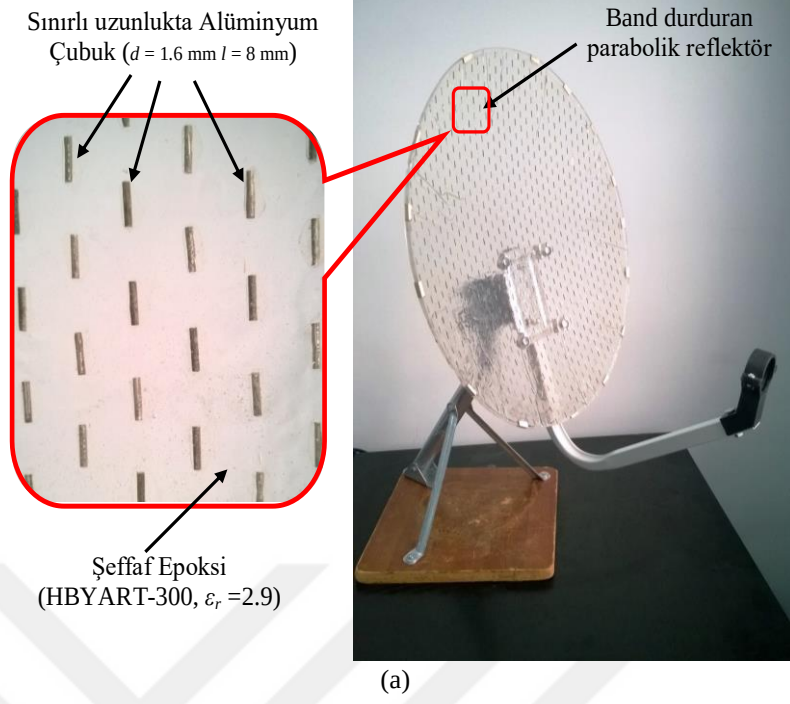


Şekil 5.9. Epoksi dökülmeye hazır hale getirilmiş kalıbın yan görünüşü.



Şekil 5.10. Prototip üretimleri tamamlanan parabolik bant durduran FSY reflektör.

Parabolik reflektörün prototip üretiminden sonra Şekil 5.11.'de gösterildiği gibi reflektöre anten ayakları ve besleme anten kelepçeleri takılarak montaj işlemi tamamlanmıştır.



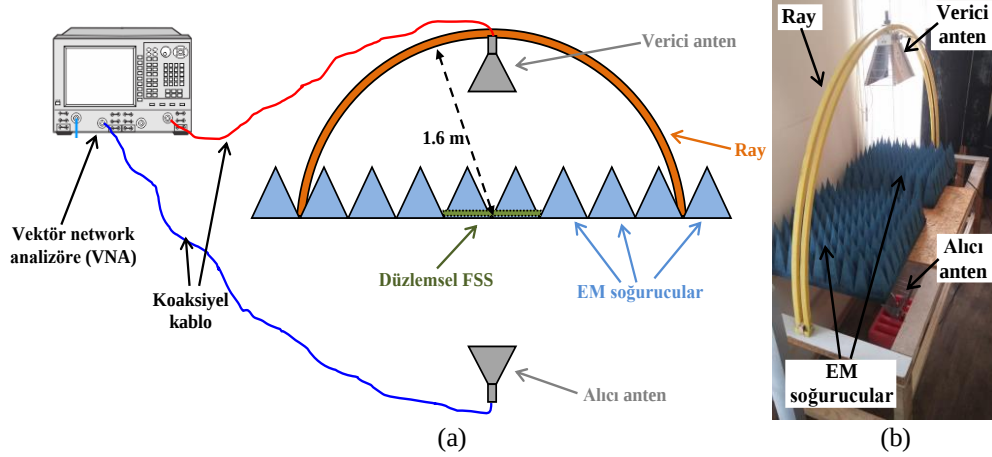
Şekil 5.11. Montaj işlemi yapılan parabolik bant durdurun FSF reflektör (a) perspektif, (b) ön görünüş.

BÖLÜM 6. ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bu bölümde ilk olarak prototip üretimleri yapılan düzlemsel ve parabolik yüzeylere sahip FSY'lerin elektriksel testlerinde kullanılan test ekipmanları ile test düzenekleri açıklanmış daha sonra elde edilen ölçüm sonuçları Bölüm 4'te verilen nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak simülasyon sonuçları doğrulanmıştır.

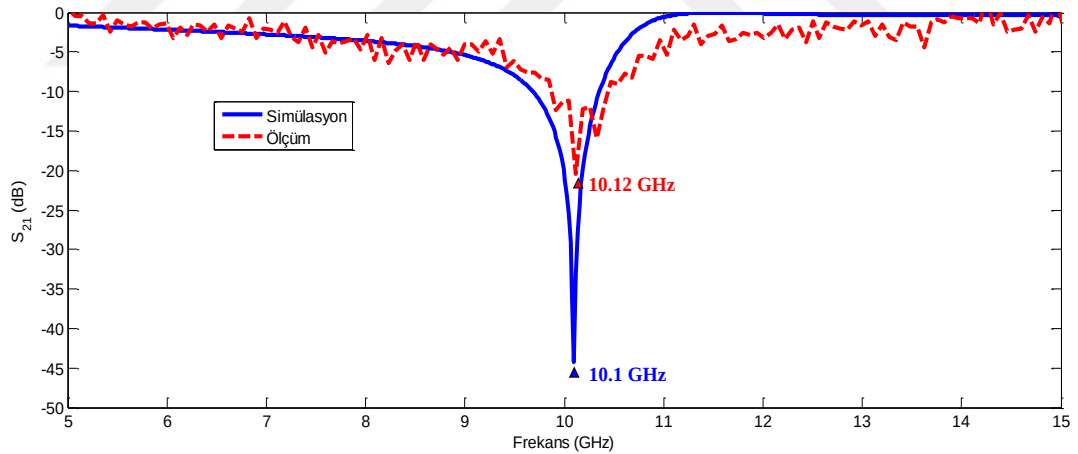
6.1. Düzlemsel Yüzeye Sahip FSY'nin Elektriksel Testleri

Düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları Şekil 6.1.a'da verilen serbest uzay ölçüm düzeneği kullanılarak 5 GHz-15 GHz frekans aralığında elde edilmiştir. Şekil 6.1.a'dan görüldüğü gibi düzlemsel yüzeye sahip FSY birbirinden yaklaşık 3,2 m uzaklıkta bulunan iki adet 1 GHz-18 GHz geniş bant horn antenin ortasına konumlandırılmıştır. Antenler 50 Ω 'luk koaksiyel kablolar ile 10 MHz-40 GHz çalışma frekansına sahip Agilent E8363B tipi mikrodalga vektör network analizöre (VNA) bağlanmıştır. Test düzeneğinde kullanılan koaksiyel kablolar, konnektörler vb. elemanlardan kaynaklanan kayıpları önleyerek ölçümlerin doğruluğunu arttırmak için VNA'e kalibrasyon yapılmıştır. Ayrıca, ortamda bulunan EM dalgaların test sistemine etkisini azaltmak için FSY'nin etrafına poliüretan köpük bazlı piramit soğurucular yerleştirilmiştir. Şekil 6.1.b'de test düzeneğine ait fotoğraf verilmiştir.



Şekil 6.1. Düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin elektriksel testlerinde kullanılan serbest uzay ölçüm düzeneğine ait (a) şematik gösterim ve (b) fotoğraf.

Düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin elektriksel testleri sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim parametre değerleri nümerik analiz sonuçları ile Şekil 6.2.'de karşılaştırılmıştır. Şekil 6.2.'de verilen karşılaştırmadan elektriksel test sonuçları ile nümerik analiz sonuçlarının oldukça benzer çıktığı görülmüştür.

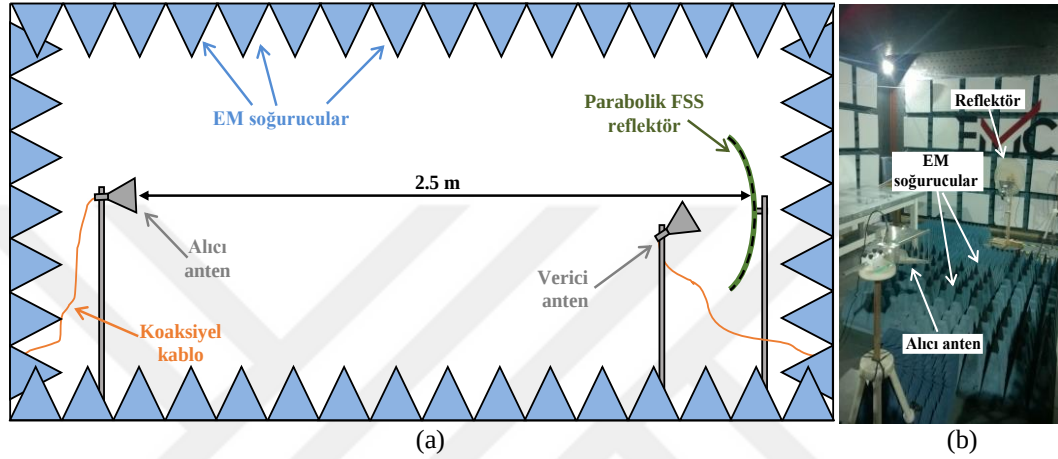


Şekil 6.2. Düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin ölçümler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim parametre değerlerinin simülasyonlar ile karşılaştırılması.

6.2. Parabolik Yüzeye Sahip FSY'nin Elektriksel Testleri

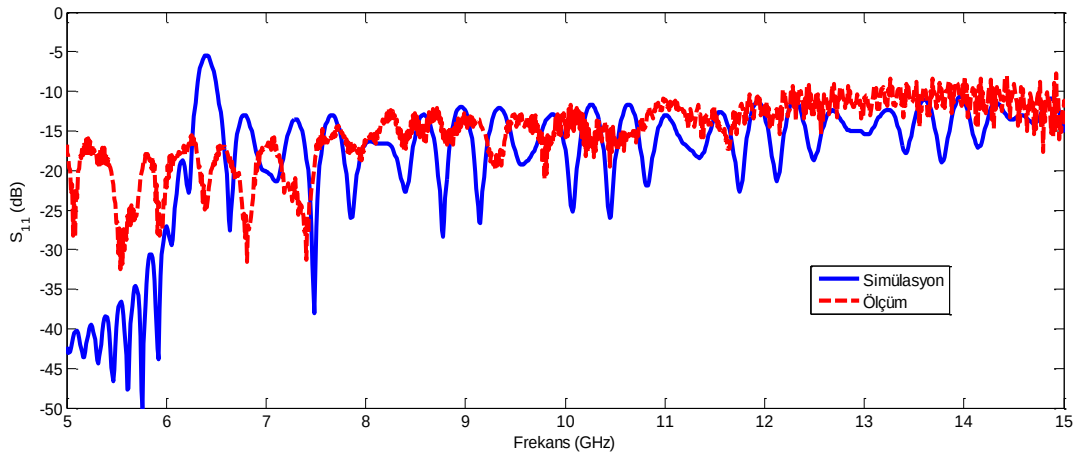
Parabolik yüzeye sahip FSY'nin elektriksel testlerine başlamadan önce üretimlerde kullanılan metal reflektör anten kalıbının geri dönüş kaybı ve ışıma diyagramı Şekil 6.3.a'da gösterilen tam yansız oda test düzeneği kullanılarak ölçülmüştür. Bilindiği gibi tam yansız odaların duvarları içerideki EM dalgaları soğurarak

tekrar geri yansımalarını önlerler. Bu sayede oda içindeki çoklu yansıma etkileri kontrol altına alınarak antenlerin hem geri dönüş kayıplarının hem de uzak alan ışıma örüntü testlerinin kontrollü olarak yapılmasına olanak sağlanmış olur. Şekil 6.3.a’da gösterildiği gibi elektriksel testlerde alıcı ve verici olmak üzere iki anten kullanılmıştır. Verici anten metal parabolik reflektörün odak noktasına yerleştirilirken alıcı anten reflektörün 2,5 m uzağına konumlandırılmıştır.



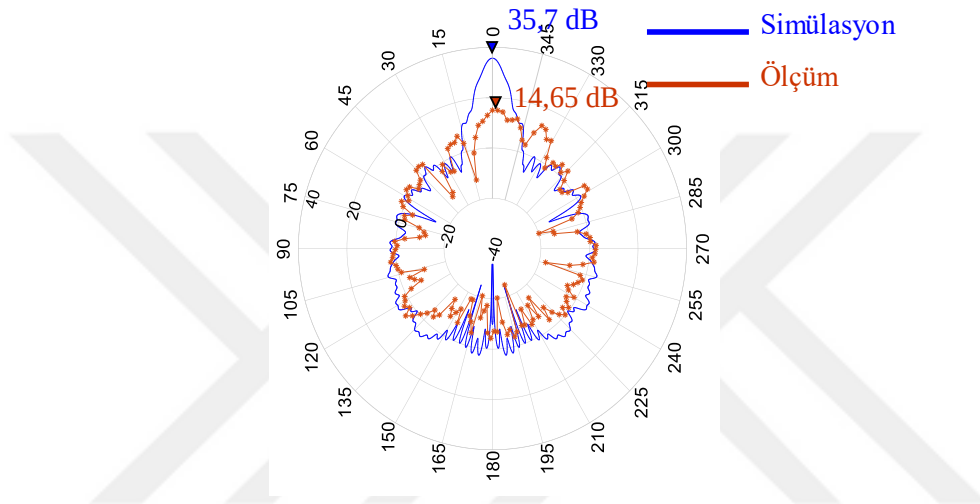
Şekil 6.3. Parabolik reflektörlerin elektriksel testlerinde kullanılan tam yansısız oda ölçüm düzeneğine ait (a) şematik gösterim ve (b) fotoğraf.

Elektriksel testler sonucu elde edilen metal reflektörün frekansa bağlı geri dönüş kaybı Bölüm 4’ de verilen nümerik analiz sonuçları ile Şekil 6.4’ de karşılaştırılmıştır. Şekil 6.4.’ den görüldüğü üzere iyi bir uyum yakalanmıştır.



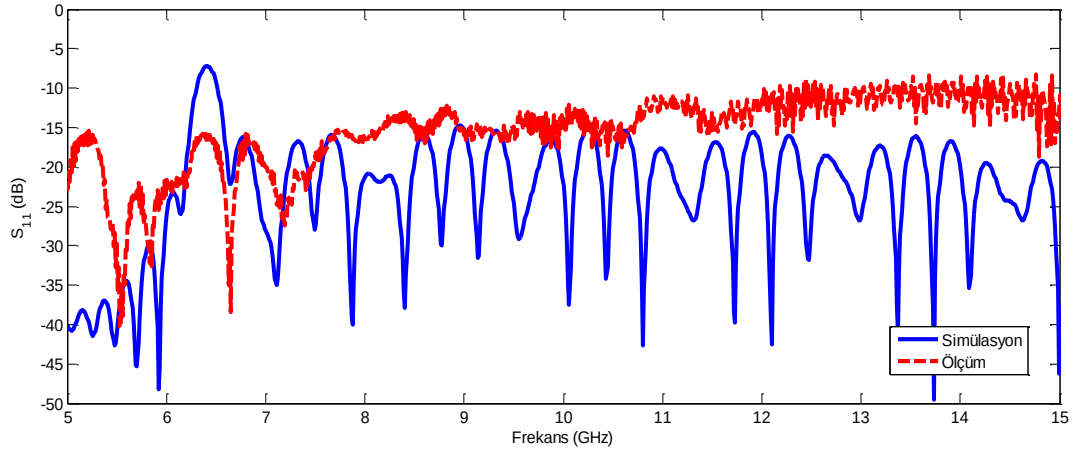
Şekil 6.4. Metal parabolik reflektörün ölçümler sonucu elde edilen geri dönüş kaybının simülasyonlar ile karşılaştırılması.

Çalışmanın devamında antenin ışıma örüntüsünün elde edilmesi için metal reflektör kendi eksenini etrafında 360° döndürülerek ardışıl ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerde alıcı ve verici antenler koaksiyel kablolar ile VNA'ye bağlanarak 10 GHz frekans değeri için metal reflektörün ışıma örüntüsü elde edilmiştir. Şekil 6.5.'te verilen karşılaştırmadan ışıma örüntüsünün ölçüm sonucunun nümerik analiz sonuçları ile benzer olduğu görülmüştür. Nümerik analizlerden 35,7 dB anten kazancı elde edilirken, üretilen antenin gerçek kazancı 14,65 dB olarak ölçülmüştür.



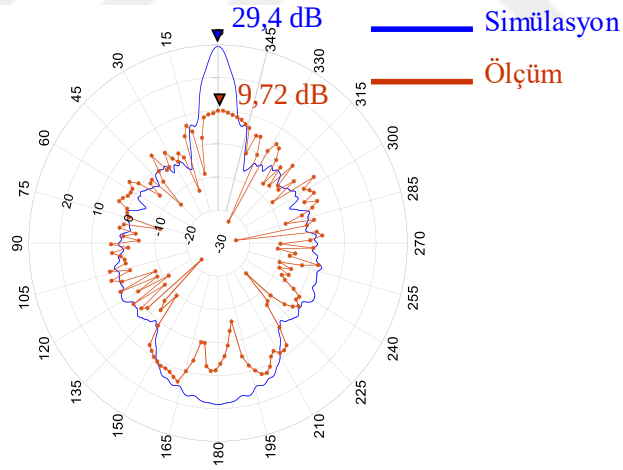
Şekil 6.5. Metal parabolik reflektörün ölçümler sonucu elde edilen ışıma örüntüsünün simülasyonlar ile karşılaştırılması.

Tez çalışmasının devamında Şekil 6.3'te verilen tam yansımaz oda test düzeneği kullanılarak parabolik yüzeye sahip FSY'nin frekansa bağlı geri dönüş kaybı ile çalışma frekansındaki ışıma örüntüsü elde edilmiştir. Parabolik yüzeye sahip FSY'nin ölçümler sonucu elde edilen frekansa bağlı geri dönüş kaybı nümerik analiz sonucu ile Şekil 6.6.'da karşılaştırılmıştır. Şekil 6.6.'dan ölçüm sonucunun nümerik analiz sonucuna yakın çıktığı görülmüştür.



Şekil 6.6. Parabolik yüzeye sahip FSY'nin ölçümler sonucu elde edilen geri dönüş kaybının simülasyonlar ile karşılaştırılması.

Tez çalışması kapsamında son olarak parabolik yüzeye sahip FSY'nin çalışma frekansındaki ışıma örüntüsü Bölüm 4'te verilen nümerik analiz sonuçları ile Şekil 6.7.'de karşılaştırılmıştır. Şekil 6.7.'de verilen karşılaştırmadan görüldüğü üzere nümerik analizlerden 29,4 dB anten kazancı elde edilirken, üretilen antenin gerçek kazancı 9,72 dB olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.7. Parabolik bant durdurucu FSY reflektörünün ölçümler sonucu elde edilen ışıma örüntüsünün simülasyonlar ile karşılaştırılması.

BÖLÜM 7. SONUÇ

Tez çalışması kapsamında ilk olarak epoksi tutucu malzeme içine süreksiz metal fiber takviyelerin periyodik dizilimi ile oluşturulan 10 GHz merkez frekansında bant durduran filtre karakteristiğine sahip düzlemsel FSY tasarlanmıştır. Tasarımlarda takviye ve tutucu malzemelerin fiziksel ve elektriksel parametre değerlerinin çalışma frekansı üzerindeki etkileri nümerik olarak incelenerek parametre analizleri yapılmıştır. Daha sonra 10 GHz merkez frekansı için elde edilen düzlemsel FSY'nin parametre değerleri kullanılarak parabolik yüzeye sahip FSY modeli tasarlanmış ve geri dönüş kaybı grafiği elde edilerek çalışma frekansı için 2D ve 3D uzak alan ısıma örüntüleri çizdirilmiştir. Tez çalışmasının ikinci aşamasında nümerik analiz sonuçlarının doğrulanması için elle yatırma yöntemi kullanılarak düzlemsel yüzeye sahip FSY üretimi yapıp serbest uzay ölçüm düzeneği ile frekansa bağlı iletim parametre değerleri elde edilmiştir. Düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin ölçümlerden elde edilen çalışma frekans değeri nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında maksimum bağıl hata oranının %0,19 olduğu görülmüştür. Düzlemsel yüzeye sahip FSY'nin nümerik analiz sonuçları doğrulandıktan sonra tez çalışmasının üçüncü aşamasında parabolik yüzeye sahip FSY'nin prototip üretimine geçilmiştir. Tez çalışmasının dördüncü ve son aşamasında ise prototip üretimi tamamlanan parabolik yüzeye sahip FSY'nin elektriksel testleri tam yansız oda test düzeneği kullanılarak yapılmış ve elde edilen ölçüm sonuçları nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalardan ölçüm sonuçlarının nümerik analiz sonuçları ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Stutzman, W.L. Ve G.A. Thiele. 1998. Antenna Theory And Design. Usa: John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Bayatpur, F. 2009. Metamaterial – Inspired Frequency – Selective Surfaces. Doktora Tezi, The University Of Michigan.
- [3] Monni, S., Gerini, G., Neto, A., Ve Tijhuis, A. G. 2007. Multimode Equivalent Networks For The Design And Analysis Of Frequency Selective Surfaces. Ieee Transactions On Antennas And Propagation. 55(10), S.2824-2835.
- [4] Munk, B.A. 2000. Frequency Selective Surfaces – Theory And Design. Usa: John Wiley & Sons, Inc.
- [5] Erdemli Y.E., Gilbert R.A. Ve Volakis J.L. 2004. A Reconfigurable Slot Aperture Design Over A Broad-Band Substrate/Feed Structure Ieee Transactions On Antennas And Propagation. 52(11), S.2860-2870.
- [6] Potgieter B.R. 2010 Experimental Modal Analysis And Model Validation Of Antenna Structures, Yüksek Lisans Tezi, University Of Stellenbosch.
- [7] Huang, Y. Ve K. Boyle. 2008. Antennas From Theory To Practice. Usa: John Wiley & Sons, Inc.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis And Design*. New York: Wiley, 1997.
- [9] Çekingen M. 2011. Yapay Manyetik İletken Toprak Yüzeyle Genişbant Mikroşerit Anten Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [10] Wade, P. 1995,1998. Offset – Fed Parabolic Dish Antennas. N1bwt, Bölüm 5.
- [11] Wade, P. 1994,1998. Parabolic Dish Antennas. N1bwt, Bölüm 4.
- [12] Cerqueira A., Mologni J.F. Ve Bogoni A. 2017. Fss-Based Dual-Band Cassegrain Parabolic Antenna For Radarcom Applications, IEEE.
- [13] Sung, H.H. 2006. Frequency Selective Wallpaper For Mitigating Indoor Wireless Interference. Doktora Tezi, The University Of Auckland.
- [14] Omar A.A., Ve Shen Z. 2016. Multiband High-Order Bandstop 3-D Frequency-Selective Structures Ieee Transactions On Antennas And Propagation. 64(6) S.2217-2226.

- [15] Mittra R., Chan C.H. Ve Cwik T. 1988. Techniques For Analyzing Frequency Selective Surfaces-A Review Proceedings Of The Ieee, 76(12), S.1593-1615.
- [16] Bayatpur F. Ve Sarabandi K. 2009. Tuning Performance Of Metamaterial-Based Frequency Selective Surfaces Ieee Transactions On Antennas And Propagation. 57(2) S.590-592.
- [17] Vatangül E. 2008 Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Ansys 10 Programı ile Isıl Gerilme Analizi. Bitirme Projesi.
- [18] Onat A. 2015 Kompozit Malzemeler Ders Notu. Sakarya Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalürji Programı.
- [19] <https://www.nj.com/monmouth/>, Son Erişim Tarihi: 24 Şubat 2019
- [20] CST-Computer Simulation Technology. “CST Microwave Studio”. <https://www.cst.com/product/estmws>, Son Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2019

ÖZGEÇMİŞ

Hacı Kadir KAYAĞ, 24.02.1993'te İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2012 yılında Kocasinan Şehit Samet Kırbaş Anadolu Teknik Lisesi'nden mezun oldu. 2012 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü 2016 yılında bitirdi. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Makel Firmasında ARGE Tasarım Mühendisi olarak çalışmaya başladı. Akabinde yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde devam etti. Halen MAKEL firmasında ARGE Tasarım Mühendisi olarak görev yapmaktadır.