



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**RADAR KESİT ALANININ AZALTILMASI
İÇİN ULTRA GENİŞ BANTLI FREKANS
SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI**

Yağmur BARIŞ ALTAY

Yüksek Lisans Tezi

**RADAR KESİT ALANININ AZALTILMASI İÇİN
ULTRA GENİŞ BANTLI FREKANS SEÇİCİ YÜZEY
TASARIMI**

Yağmur BARIŞ ALTAY



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RADAR KESİT ALANININ AZALTILMASI İÇİN ULTRA GENİŞ BANTLI
FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI**

Yağmur BARIŞ ALTAY
0000-0002-0303-0198

Doç. Dr. Uğur YALÇIN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Yağmur BARIŞ ALTAY tarafından hazırlanan “RADAR KESİT ALANININ AZALTILMASI İÇİN ULTRA GENİŞ BANTLI FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Uğur YALÇIN

Başkan :	Doç. Dr. Uğur YALÇIN 0000-0002-4160-9774 Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı	İmza
Üye :	Prof. Dr. Hüsnü Deniz Başdemir 0000-0002-2797-3772 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı	İmza
U.Ü.		
Üye :	Doç.Dr. Enes Yiğit 0000-0002-0960-5335 Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././.....

Bilimsel Etik Bildirim Sayfası

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

01/11/2022

Yağmur BARIŞ ALTAY

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı
Tarih

Doç. Dr. Uğur YALÇIN
01.11.2022

Öğrencinin Adı-Soyadı
Tarih

Yağmur BARIŞ ALTAY
01.11.2022

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

RADAR KESİT ALANININ AZALTILMASI İÇİN ULTRA GENİŞ BANTLI FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Yağmur BARIŞ ALTAY

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Uğur YALÇIN

Frekans seçici yüzeyler (FSY), belirlenen frekans aralığında yüzeye gelen elektromanyetik dalgaların iletim, yansıma veya soğurma özelliği göstermesini sağlayan periyodik yapılardır. Bu çalışmada birden fazla frekans bandını kapsayacak şekilde (C-bandı (4-8 GHz) ve X bandı (8-12 GHz)), ultra geniş bant aralığına sahip, halka ve kesikli artı şekillerinin birleştirilmesiyle elde edilen yeni UGB FSY ile radar kesit alanının (RKA) azaltımı amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk kısımlarında halka ve kesikli artı şekilli yapılar tek tek analiz edilmiştir. Analiz sonucunda en verimli olan iki yapı birleştirilerek elde edilen yeni FSY ile -10 dB kazanç değerinde bant genişliği arttırılmıştır. Önerilen yapı üzerinde temel parametreleri değiştirerek, ultra geniş bantlı (UGB) radar sistemlerinde kullanılabilir iyi zayıflama düzeyine sahip, dalgaın geliş açısından bağımsız ve bant durduran filtre karakteristiğine sahip yapı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: C-Bandı, X-Bandı, Frekans Seçici Yüzey (FSY), Tek Katman, Bant Durduran Filtre, Ultra Geniş Bant (UGB), Radar Kesit Azaltımı (RKA)

2022, viii + 87 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

ULTRA-WIDE BAND FREQUENCY SELECTIVE SURFACE DESIGN FOR RADAR CROSS-SECTIONAL REDUCTION

Yağmur BARIŞ ALTAY

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Dr. Uğur YALÇIN

Frequency selective surfaces (FSS) are periodic structures that allow electromagnetic waves arriving on the surface to show transmission, reflection or absorption properties in the determined frequency range. In this study, radar cross section with the new UGB FSY was obtained by combining ring and dashed cross shapes with ultra-wide band gap, covering more than one frequency band (C-band (4-8 GHz) and X-band (8-12 GHz)). In the first part of the study, the ring and dashed crosshairs were analyzed one by one. As a result of the analysis, the bandwidth has been increased by -10 dB gain with the new FSY obtained by combining the two most efficient structures. FSY designs with a good attenuation level that can be used in ultra-wideband (UGB) radar systems have been carried out. Simulation and analysis of the design were carried out with the CST Studio Suite 3D electromagnetic simulation program.

Key words: C-Band, X-Band, Frequency Selective Surface (FSS), Single-Layer, Band Stop Filter, Ultra-Wide Band (UWB), Radar Cross Section Reduction (RCSR)

2022, viii + 87 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdikleri destek ve yardımlarından dolayı değerli hocalarım Doç. Dr. Uğur YALÇIN, Doç.Dr. ENES YİĞİT, Prof. Dr. H. Deniz BAŞDEMİR'e ve her zaman yanımda olan sevgili aileme içten teşekkürlerimi sunarım.

Yağmur BARIŞ ALTAY
01/11/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1.GİRİŞ	1
2.KURUMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Radar	9
2.2. Radar Kesit Alanı (RKA)(Radar Cross Section, RCS).....	16
2.2.1. Alçak Frekans Bölgesi	18
2.2.2. Rezonans Bölgesi (Mie Bölgesi).....	18
2.2.3. Yüksek Frekans Bölgesi.....	18
2.3. Radar Kesit Alanı Azaltımı.....	19
2.3.1. Pasif İptal Etme	20
2.3.2. Aktif İptal Etme.....	21
2.3.3. Fiziksel Şekillendirme ile RKA Azaltma.....	21
2.3.4. Radar Soğurucu Malzemeler (RAM) Yardımıyla RKA Azaltma.....	22
2.3.4.1. Dereceli Arayüzler- Empedans Eşleştirme	26
2.3.4.1.1. Piramit Yöntemi ile Empedans Uyumlama.....	26
2.3.4.1.2. Konik Yöntemi ile Empedans Uyumlama	26
2.3.4.1.3. Uyumlu RAM Tekniği ile Empedans Uyumlama.....	27
2.3.4.2. Rezonant Malzemeler	28
2.3.4.2.1. Dallenbach Katmanı.....	28
2.3.4.2.2. Salisbury Tabakası	29
2.3.4.2.3. Jaumann Katmanı.....	30
2.4. Frekans Seçici Yüzey (FSY) (Frequency Selective Surface, FSS).....	31
2.4.1. Frekans Seçici Yüzey Parametreleri	32
2.4.1.1. Frekans Seçici Yüzeyin Geometrik Şekli ve Boyutu.....	33
2.4.1.2. Birim Hücreler Arasındaki Mesafe	37
2.4.1.3. FSY Tasarımında Kullanılan Dielektrik Tabakalar	37
2.4.1.4. FSY Tasarımında Kullanılan Elemanların İletkenliği.....	38
2.4.1.5. Dalgaların Geliş Açısı ve Kutuplanma	39
2.4.2. Frekans Seçici Yüzeylerin Analizinde Kullanılan Teknikler.....	40
2.4.2.1. Zaman Domeninde Sonlu Farklar Yöntemi (ZDSF) (Finite Difference Time Domain, FDTD)	41
2.4.2.2. Moment Yöntemi (MoM)	42
2.4.2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) (Finite Element Method, FEM).....	43
2.4.3. Floquet Model Fonksiyonu	44
2.4.3.1. Floquet Serisi	45
2.4.3.2. Vektör Floquet Harmonikleri.....	46
2.4.3.3. Normalize Floquet Gerilim Dalgaları	48
2.5. FSY İçerikli Yapılar Kullanarak RKA 'nın Azaltılması	50

3. MATERYAL VE YÖNTEM	51
3.1. Modellemede Kullanılan Eşitlikler	51
3.2. Birim Hücre Tasarımı	52
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	53
4.1. Halka Geometrik Şekil Kullanarak Tasarlanan FSY'in Analizi	53
4.2. Kesikli Artı Geometrik Şekil Kullanarak Tasarlanan FSY'in Analizi.....	61
4.3. İki Geometrik Şeklin Birleşİ İle Oluşturulan Yeni FSY'nin Analizi.....	69
5. SONUÇ	80
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
p_t	Verinin antenden yaydığı güç
G	Anten kazancı
S_t	Hedefe çarpan güç yoğunluğu
R	Hedef ile arasındaki mesafe
P_S	Hedeften yayılan toplam güç
S_{min}	Sinyal gücünün minimum değeri
B	Bant genişliği
k	Boltzmann sabiti ($1,38 \times 10^{-2}$)
T_e	Kelvin cinsinden etkin gürültü sıcaklığını
F	Gürültü faktörü F
$(SNR)_i$	Giriş sinyal gürültü oranı
$(SNR)_o$	Çıkış sinyal gürültü oranı
S_i	Giriş sinyal gücü
S_o	Çıkış sinyal gücü
N_i	Giriş gürültü gücü
N_o	Çıkış gürültü gücü
R_{max}	Maksimum radar mesafesi
σ	hedefin radar kesit alanı
θ_i, ϑ_i	Gelen dalganın yönü
θ_s, ϑ_s	Yansıyan dalganın yönü
E_s	Hedeften saçılan elektrik alan
E_r	Hedefe çarpan elektrik alan
f_0	Rezonans frekansı
$\Delta f = BG$	Bant genişliği
Γ	Yansıma katsayısı
T	İletim katsayısı
H	Katman kalınlığı
Φ, θ	Düzlem dalga geliş açısı
n_0	Boş uzayın empedansı
n	Ortamın empedansı
μ_0	Boş uzayın manyetik geçirgenliği ($\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} H/m$)
ϵ_0	Boş uzayın elektrik geçirgenliği ($\epsilon_0 = 8,854 * 10^{-12} F/m$)
ϵ_r	Bağıl elektrik geçirgenliği
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenliği
$\tan \delta_\mu$	Manyetik kayıp tanjantı
$\tan \delta_\epsilon$	Elektrik kayıp tanjantı
Z_A	Göreceli empedans
Z_u	Uyumlaştırma katmanı öz empedansı
Z_0	Ortamdaki empedans
Z_1	Katmanın etkin empedansı
Z_m	Soğurucu malzemenin öz empedansı,
γ_2	Soğurucu malzemenin bulunduğu düzlemdeki dalga yayılım sabiti

d_2	Malzemenin kalınlığı
λ_0	Rezonans frekansına karşılık gelen dalga boyu
f_r	Rezonans frekansı
ϵ_{eff}	İki yama arasındaki statik kapasitans değışimi
k_{zmn}	Dalga sayısı
k	Ortamın yayılma sabiti
t_x	x boyunca birim hücre boyutu
t_y	y boyunca birim hücre boyutu
V	Akım yoğunluğu
V^S	Kaynak akımı
V^I	Bilinmeyen akım
P_f	Kaynak tarafından iletilen ileri güç
P_r	Sonlandırmada alınan güç
$f_{üst}$	Üst kesim frekansı
f_{alt}	Alt kesim frekansı
x	Birim hücre boyutu
sub_h	Dielektrik katman kalınlığı
r_out	Dairesel şeklindeki yamanın yarıçapı
met_h	Dairesel şeklindeki yamanın yüksekliği
w	Dairesel şeklindeki yamanın kalınlığı
Θ	Dalga geliş açısı

Kısaltmalar Açıklama

FSY	Frekans seçici yüzeyler
FSS	Frequency selective surfaces
RKA	Radar kesit alanı
RCS	Radar cross section
UGB	Ultra geniş bantlı
UWB	Ultra wide-band
RFID	Radyo frekansı ile tanımlama
EM	Elektromanyetik
RF	Radyo Frekansı
MEADS	Erken uyarı radarları
GPR	Yer radarları (Ground Penetrating Radar)
SAR	Yapay açıklıklı radar (Synthetic Aperture Radar)
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
FEM	Finite element method
ZDSFY	Zaman Domeninde Sonlu Farklar Yöntemi
FDTD	Finite Difference Time Domain
MoM	Moment Yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Temel radar blok diyagramı.....	9
Şekil 2.2. a) Monostatik radar b) Bistatik radar.....	13
Şekil 2.3. Üç frekans bölgesinde kürenin radar kesit alanı (Ergün Yardım, 2012)...	19
Şekil 2.4. Elektromanyetik dalğanın hedef ile etkileşimi (Özden ve diğ., 2016)	20
Şekil 2.5. Uyumlu RAM tekniği ile malzeme Ttsarımı (Özer, 2018).....	27
Şekil 2.6. Dallenbach katmanı (Özer, 2018).....	29
Şekil 2.7. Salisbury tabakası (Özer, 2018).....	30
Şekil 2.8. Jaumann katmanı (Özer, 2018).....	31
Şekil 2.9. Dört çeşit filtre karakteristiği (Boyalı yerler, iletken kısmı temsil eder) a) Bant durduran b) Bant geçiren c) Alçak geçiren d) Yüksek geçiren (Sung,2006).....	32
Şekil 2.10. Yama ve oyuk tipinde hac geometrik şekilli FSY (Angun, 2017).....	33
Şekil 2.11. FSY tasarımında kullanılan elemanlar (Göksel, 2018)	35
Şekil 2.12. a) 2D FSY Gösterimi b) 3D FSY Gösterimi.....	36
Şekil 2.13. Farklı geometrik şekillerin iletim karakteristikleri (Uçar, 2007).....	37
Şekil 2.14. Periyodik iletken yamaların gösterimi (Bayatpur, 2009).....	38
Şekil 2.15. Dalga geliş açısının gösterimi.....	39
Şekil 2.16. a) İndüklenmiş elektronun filtre yüzeyindeki düşük geçirgenliğini b) Elektrik alan vektörü ile dipol elemanın birbirine dik düzlemlerde olduğu örnek bir durum (Hooberman, 2005).....	40
Şekil 2.17. a) Alan bileşenlerinin YEE hücresinde yerleşimi b) Hücrelerin noktalara ayrıştırılması.....	41
Şekil 2.18. Homojen olmayan geometriye sahip bir cisim.....	43
Şekil 2.19. Geometrinin üçgensel elemanlara ayrıştırması (Karaca, 2013).....	43
Şekil 2.20. 1D elemanlardan oluşmuş sonlu elemanlar modelinin gösterimi (Kırmızı noktalar “düğüm noktalarını”, sarı çizgiler “elemanları” ifade eder) (Selvitopi, 2016).....	44
Şekil 3.1. CST Simülasyon programı çalışma alanı sekmesi.....	52
Şekil 4.1. a) Halka şekilli FSY birim hücre geometrisi b) Halka şekilli FSY dizisi.	53
Şekil 4.2. Halka geometrik şekilli FSY’nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri	54
Şekil 4.3. Halka geometrik şekilli FSY’nin dielektrik katman kalınlığının (h) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	55
Şekil 4.4. Halka geometrik şekilli FSY’nin iletken yüzey kalınlığı (c) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakterisikteri.....	56
Şekil 4.5. Halka geometrik şekilli FSY’nin iletken yüzey yarıçapının (r) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	57
Şekil 4.6. Halka geometrik şekilli FSY’nin iletken yüzey kalınlığı (w) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	58
Şekil 4.7. Halka geometrik şekilli FSY’nin dalga geliş açısı (phi) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	59
Şekil 4.8. Halka geometrik şekilli FSY ‘nin iletim karakteristiktği	60
Şekil 4.9. a) Kesikli artı şekilli FSY birim hücre geometrisi b) Kesikli artı şekilli FSY dizisi).....	61

Şekil 4.10.	Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	62
Şekil 4.11.	Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (h) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	63
Şekil 4.12.	Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey yüksekliği (c) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	64
Şekil 4.13.	Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin dalga geliş açısı (phi) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	65
Şekil 4.14.	Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey uzunluğu (p) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri	66
Şekil 4.15.	Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey genişliği (l) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	67
Şekil 4.16.	Kesikli artı geometrik şekilli FSY 'nin iletim karakteristiktği.....	68
Şekil 4.17.	a) Halka şekilli FSY b) Kesikli artı şekilli FSY c) Önerilen UGB FSY...	69
Şekil 4.18.	a) Önerilen FSY birim hücresi b) Önerilen FSY dizisi.....	69
Şekil 4.19.	Önerilen UGB FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	70
Şekil 4.20.	Önerilen UGB FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (sub_h) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri	71
Şekil 4.21.	Önerilen UGB FSY'nin iletken yüzey yüksekliği (cop_h) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	72
Şekil 4.22.	UGB değerinin değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	73
Şekil 4.23.	Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki halka şeklinin kalınlığının (w) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	74
Şekil 4.24.	Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki artı şeklinin genişliğinin (l) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	75
Şekil 4.25.	Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki artı şeklinin uzunluğunun (p) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri.....	76
Şekil 4.26.	Önerilen UGB FSY'nin dalga geliş açısının (phi) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri	77
Şekil 4.27.	Önerilen UGB FSY 'nin iletim karakteristiktği.....	78
Şekil 4.28.	Halka, kesikli artı şekli ve önerilen FSY 'lerin iletim karakteristiktği....	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Radarların frekans ve savunma sanayisinde kullanım alanları.....	11
Çizelge 4.1. Halka geometrik şekilli FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	54
Çizelge 4.2. Halka geometrik şekilli FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (h) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	55
Çizelge 4.3. Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey kalınlığı (c) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	56
Çizelge 4.4. Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey yarıçapının (r) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	57
Çizelge 4.5. Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey kalınlığı (w) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	58
Çizelge 4.6. Halka geometrik şekilli FSY'nin dalga geliş açısı (phi) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	59
Çizelge 4.7. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	62
Çizelge 4.8. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (h) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	63
Çizelge 4.9. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey yüksekliği (c) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	64
Çizelge 4.10. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin dalga geliş açısı (phi) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	65
Çizelge 4.11. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey uzunluğu (p) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	66
Çizelge 4.12. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey genişliği (l) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	67
Çizelge 4.13. Önerilen UGB FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	70
Çizelge 4.14. Önerilen UGB FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (sub_h) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	71
Çizelge 4.15. Önerilen UGB FSY'nin iletken yüzey yüksekliği (cop_h) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	72
Çizelge 4.16. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki halka şeklinin yarıçap (r_out) değerinin sonucu elde edilen sonuçlar.....	73
Çizelge 4.17. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki halka şeklinin kalınlığının (w) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	74
Çizelge 4.18. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki artı şeklinin genişliğinin (l) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	75
Çizelge 4.19. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki artı şeklinin uzunluğunun (p) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	76
Çizelge 4.20. Önerilen UGB FSY'nin dalga geliş açısının (phi) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	77

1. GİRİŞ

Radarin çalışma prensibi, vericiden gönderilen sinyalin bir hedefe çarpması sonucunda bir kısmının geri yansıyor, alıcı tarafından tespit edilmesidir. Alıcı, yansıyan sinyal ile hedefin yönünü, hızını ve hedefe olan uzaklığını belirler (Pozar, 2012). Günümüzde radar sistemleri askeri uygulamalarda, gökbilim, haritalama-görüntüleme vb. bilimsel uygulamalarda ve polis hız ölçümü, hava radarı, güvenlik alarmları vb. sivil uygulamalarında kullanılmaktadır.

Radar sistemlerinin gelişimi 1940'lı yıllardan başlayıp, günümüze kadar gelerek birçok ülkenin ilgisini çekti ve bu alanda sayısızca araştırmalar yapıldı. Radar sistemlerinin geliştirilmesi için radar frekanslarındaki elektromanyetik dalgalar ile çeşitli malzemeler arasındaki etkileşim incelenerek başlanmıştır. Bu incelemeler doğrultusunda hedeflenen ilk durum cisme çarpıp, geri yansıyan sinyali azaltmanın yollarını belirlemektir (Gaylor, 1989). Bu düşman tarafından tespit edilmeyip, düşmana karşı üstünlük sağlanma açısından çok önemlidir.

Radarı kesit alanını (RKA) azaltmak için birçok yöntem denenmiştir. Bu yöntemlerden biri de frekans seçici yüzey (FSY) içeren yapılar kullanmaktır. FSY içeren yapılar belirlenen çalışma frekansı aralığında saydam olup, tehdit radar frekanslarında ise ışın geçirmez olarak RKA'yı azaltmaktadır.

FSY istenilen frekans aralığında yüzeye gelen elektromanyetik dalgaların yansıma, iletim veya saçılma özelliği gösterdiği periyodik yapıdır (Topcuoğlu, 2018). Kalkanlama etkinliği denilen yapı ile istenen frekanslarda sistemin çalışmasını sağlayıp, istenmeyen frekansları engelleyerek, frekans değerine göre bant durduran ya da bant geçiren filtre özelliği göstermektedir (Munk, 2000; O'Nians ve diğ., 1966). Bant geçiren filtre karakteristiği göstererek istenen frekanslarda sistemin çalışmasını sağlayıp, bant durduran filtre karakteristiği göstererek istenmeyen frekansları engelleyerek kayıpları en aza indirger (Munk, 2000; Wu, 1995).

FSY, askeri alanlarda, radar kesit alanının azaltılmasında, radyo frekansı ile tanımlama (RFID) uygulamalarında, emici yüzey (absorber) tasarımında, mikrodalga ve anten sistemlerinde, uzay ve uydu haberleşmesinde ve kablosuz ağ güvenliği gibi pek çok alanda filtreleme amacıyla kullanılmaktadır (Munk, 2000; Mittra ve diğ., 1988; Hu ve Tennant, 2012).

FSY'lerin gündelik yaşamda en çok karşımıza çıkan kullanım alanı olarak mikrodalgalar gösterilmektedir. Mikrodalga fırınlarının camlarında kalkan olarak kullanılarak, işaretin istenen frekans aralığına dışarıya çıkması engeller ve içerisindeki malzemenin ısınmasını sağlamaktadır. Bu işlem için yapı yüksek geçiren filtre olarak tasarlanmaktadır. Ayrıca FSY'lerin mikrodalga endüstrisinde kullanılmasıyla yapının bant genişliği ve anten kazancı gibi parametreleri de olumlu yönde etkilenir (Kocakaya, 2018; Qing ve diğ., 2001).

FSY'lerin kullanım yerlerinden biri de uzay araçlarıdır. Güneş kalkanı olarak kullanılarak, zararlı ışınları önleyip, radyo frekansı (RF) dalgalarını geçirerek sistem etkinliği en uygun hale getirmektedir (Wu, 1995). Son yıllarda ise baz istasyonlarının neden olduğu gürültü ve sinyal kirliliğinin çözümü ve tiyatro, kütüphane vb. cep telefon ile görüşülmemesi gereken yerlerde sinyallerin engellenmesi gibi pek çok alanda da kullanılmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

FSY'ler üzerine yapılan ilk çalışma 1919 yılında Marconi ve Franklin'in icat etmiş olduğu "Kablosuz Telgraf ve Telefon için Reflektör" yapısıdır (Marconi ve Franklin, 1919; Göksel 2018).

İkinci Dünya Savaşı öncesinden bu yana, radar sistemlerinin gelişimi hala devam etmektedir. İlk radar çalışması Birleşik Devletler 'de ve İngiltere'de başladı. 1940'ta İngiltere'nin çok yüksek frekans kaynakları kullanılarak magnetron tüplerini icat etmesiyle büyük bir atılım başladı (Pozar, 2012).

1970 yıllarında ise görünmezlik teknolojisi birçok ülkenin ilgisini çekmeye başladı. Dolayısıyla askeri alanda yapılan çalışmalar artarak, sayısızca araştırmalar yapıldı. FSY'lerin askeri alanlarda uygulanmasına yönelik çalışmalar da bu yıllarda başladı (Döken, 2011). FSY'ler ile ilgili birçok araştırma ve çalışmalar yapılarak, FSY'lerin çok geniş ve farklı uygulanma alanları ortaya çıkmıştır. 1973 yılında FSY'nin çift bantlı reflektör anten tasarımı için hiperbolik alt yansıtıcı olarak kullanımı incelenerek, FSY'lerin antenlerde kullanımı ilk kez ele alınmıştır (Topçuoğlu, 2018; Schenum, 1973).

1991 yılında yapılan çalışmada FSY, antenin ikincil yansıtıcı yüzeyi olarak kullanılmıştır. X – bandı ve Ka – bandı için Cassegrain anten yapısını ifade ederken, S – bandı ve Ku – bandı için eksen – simetrik parabolik reflektör anten yapısını ifade etmektedir (Topçuoğlu, 2018) .

Kutlu ve diğ. (2004) çalışmalarında izotropik taban üzerine kare ve dairesel halka şekilli yamaları periyodik olarak yerleştirerek iki farklı tasarım oluşturmuştur. Çalışmaları 0.1-2.5 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.

Bu yapıdaki manyetik ve elektrik alanların incelenmesi için floquet modlarından yardım alınmıştır. Akabinde bilinmeyen akım yoğunluğunun bulunması için momentler metodu kullanılmıştır. Son olarak yansıyan ve iletilen alan bileşenleri bulunarak, kalkanlama etkinlikleri hesaplanmıştır. Farklı ϵ_r değerlerine göre iki geometrik şekil kullanılarak tasarlanan yapılar incelendiğinde; dairesel halka yapının bant genişliğinin, kare halka yapıya göre daha geniş olduğu görülmüştür. Fakat kalkanlama etkinlikleri olarak incelendiğinde ise durumun tam tersi olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca dalga geliş açısının rezonans frekansı bant genişliğine etkisi incelendiğinde, geliş açısının artmasıyla TE modunda rezonans frekansı bant genişliği artarken, TM modunda azaldığı görülmektedir. Bu doğrultuda, bu çalışma ile TE ve TM dalgaların bant genişliği ile doğrudan ilişkili olduğu ifade edilmiştir.

Delihacioğlu (2012) FSY tasarımında dielektrik tabaka üzerine yerleştirilen periyodik yamaların S şeklinde iletkenlerin kullanılmasının TE modunda frekansa etkisini incelenmiştir. Rezonans frekansının yamaların şekli, uzunluğu ve birim hücre boyutu gibi temel parametrelerle doğrudan ilişkili olduğunu gözlemlemiştir. Tasarım X (8-12 GHz), Ku (12-18GHz), K (18-26 GHz) ve Ka (26-40GHz) bantlarında gerçekleştirilmiştir. S-şekilli FSY, Ku -bandında bant geçiren filtre karakteristiğine sahipken, çok bantlı (X, Ku, K ve Ka bantları) yapılarda bant durduran filtre karakteristiğine sahiptir.

Tian ve diğ. (2013) çalışmalarında belirlemiş oldukları çalışma bandının dışından geriye doğru RKA azaltmak için kapalı bir antene sahip bant geçiren FSY anten tasarımı gerçekleştirir. FSY içeren kapalı bir antenin, RKA değerinin önemli bir ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Bant dışı düşük frekansta yaklaşık olarak maksimum RKA değeri -15 dB ölçülmüştür.

Fakharian ve diğ. (2014) katlanmış kademeli empedans rezonatör (SIR) yama yuvası konfigürasyonunu temel alan, değişken boyutlu bir yansıtıcı dizi anten tasarımı gerçekleştirmiştir.

Bant durduran FSY içeren bir yansıtıcıyla sadece katı düzlem içeren yansıtıcı arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Benzetim sonuçları incelendiğinde 11.5 GHz çalışma bandında aynı boyutta katı bir metal zemin düzlemi ile FSS destekli yansıtıcı dizi karşılaştırıldığında RKA'nın bant-dışında azaldığı görülmektedir. 19 GHz frekansında 13 dB 'e kadar azalma gösterdiği görülmüştür.

Kutlu (2014) yapmış olduğu çalışmada, floquet modları kullanarak, belirli geometrideki yapıların elektrik ve manyetik alanları çözümlenmiştir. Kare ve dairesel halka şekilli yamalar kullanarak, farklı geometrik şekiller ve farklı geliş açılarının kalkanlama etkinliğine olan etkisi analiz edilmiştir. Tasarlanan iki farklı geometrik yapıda elde edilen sonuçları incelendiğinde, dairesel halka yama kullanarak tasarlanan yapının, kare halka yama kullanarak tasarlanan yapıya göre daha yüksek kalkanlama etkinliğine ve daha geniş banda sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla dairesel halka ile tasarlanan yapının kararlılık oranının, kareye oranla daha iyi olduğu kanısına varılmıştır.

Angun (2017) X-bandında çalışan üç boyutlu frekans seçici yüzey tasarımı gerçekleştirmiştir. Çalışmanın merkez frekansı 10 GHz dır. Tasarımda farklı geometrik şekiller kullanarak iki boyutlu olarak tasarlanan yapıda iletken yüzeyin yüksekliğini arttırarak yeni 3D FSY yapılar elde edilmiştir.

Bodur ve diğ. (2018) çalışmalarında RKA azaltımı için yansıtıcı dizi antende yeni bir frekans seçici yüzey (FSY) konfigürasyonu önermiştir. 9×9 elemanlı bir FSY, aynı ölçülere sahip yansıtıcı dizi anten arkasına yerleştirilmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde FSY destekli yansıtıcı dizi antenin hem bant içinde (8-12 GHz) hem de bant dışında (2-7 GHz ve 13-18 GHz) RKA değerini azalttığı görülmüştür. Maksimum RKA değeri yaklaşık olarak 5 GHz frekansında -15 dB değerindedir.

Topçuoğlu (2018) çalışmasında X bandında çalışan FSY radom tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu yapı, 8 ile 12 GHz frekans aralığında çalışarak eğimli yüzeylerde kullanılabilir. Tasarlanan radomun performans analizini yapabilmek için aynı frekans bandında çalışan horn ve vivaldi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen FSY radom yapısı bu antenler ile test edilerek, anten üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Tasarlanan FSY, bant geçiren filtre karakteristiği göstermektedir ve 3x3 elemanlı birim hücreden oluşmaktadır. Analiz sonuçlarını inceleyecek olursak; bant geçiren filtre karakteristiği gösteren FSY, istenilen frekans aralığında hüzmeyi daraltarak kazancı artırırken, diğer frekanslarda sinyal alımını engellemektedir. Bu sayede tasarlanan yapıyla anten performansını iyileştirerek oldukça kullanışlı bir yapı elde edilmiştir.

Habergötüren Ateş (2018) çalışmasında Apollonius çemberleri ile çoklu bant çalışmalarında kullanılan ve kablosuz iletişimde bant durduran kararlı bir yapıya sahip olan iki farklı tasarım önermiştir. Apollonius çemberleri harmonik orana sahip üçgen şekiller kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan bu üçgen yapıların iç içe geçirilmesiyle Apollonius çemberlerinden fraktal yapılar elde edilmiştir. Tasarlanan yapılardan ilki, geliş açısına göre düşük frekanslarda kararlı olmasından dolayı anten sistemlerinde kullanılmaya uygun olduğu ifade edilmiştir. Tasarlanan ikinci yapının ise WLAN bandında bir bant durduran filtre özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Merkez frekansı 2.4 GHz olan bu yapının dalga geliş açısına göre TE ve TM modlarında kararlı yapıda olduğu ifade edilmiştir.

Teşneli ve diğ. (2019) X bandında ve merkez frekansı 10 GHz olan bir FSY tasarımı gerçekleştirmiştir. İletken yama olarak sekizgen biçimli halka seçilmiştir. Çalışmada tasarlanan yapıyı üç boyutlu yapıya çevirerek FSY'nin frekans tepkisi analiz edilmiştir.

Tasarlanan yapıda iletken yüksekliğinin arttırılmasının frekans tepkisine etkisini incelenecek olursa; yüksekliğin rezonans frekansı ile doğru orantılı olduğu görölmektedir. Yükseklik 6mm'ye kadar arttırıldığında bant genişliğine bir etkisi olmazken, 8 mm'ye ulaştığında FSY'nin filtre karakteristik özelliğinin değıştiğı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bant durduran filtre özelliğı gösterirken yükseklik 8 mm 'ye ulaştıktan sonra bant geçiren filtre özelliğı göstermeye başlamıştır. İletken yüksekliğı daha da arttıka bant geçiren FSY'nin rezonans frekansı azalmakta olduğu görölmektedir. Sonuç olarak tasarlanan 3D sekizgen FSY'de iletken yüksekliğinin değışiminin filtre karakteristiğı ile doğrudan etkili olduğu görölmüştür.

Kocakaya ve diğ. (2020) tarafından tasarlanan FSY'nin; tek katmanlı, ultra geniş bantlı (UGB), açısız kararlı ve polarizasyondan bağımsız özgün bir yapı olduğu ifade edilmiştir. Çalışma aralığı 3,5 GHz-11 GHz olarak belirtilmiştir. Tasarlanan yapıda elde edilen sonuçları inceleyecek olursak; yapının küçük birim hücreye sahip olması ve simetrik yapısında dolayı, 60°'ye kadar kararlı ve polarizasyondan bağımsız olduğu ifade edilmiştir. Önerilen tek katmanlı yapıda zayıflama düzeyi maksimum 57 dB değerine kadar ulaşmaktadır. Bu çalışma ile FSY'nin elektromanyetik dalğanın geliş açısından bağımsız olarak kalkan ve soğurucu gibi işlevini yerine getirebildiğı gösterilmiştir.

Zayıflama düzeyleri bakımından literatürdeki dairesel halka kullanarak tasarlanan 2 boyutlu yapılardan bazıları incelendiğinde; Gökçen ve diğ. (2005) 60 dB değerinde, Gökçen ve diğ. (2005) diğ. bir çalışmada 64 dB değerinde, Azemi ve Rowe (2011) -60 dB değerinde, Azemi ve diğ. (2012) diğ. bir çalışmada -54 dB değerinde ve Angun (2017) -59 dB değerinde olduğu görölmektedir.

Bu çalışmada, -10 dB kazanç değerinde, daha yüksek bant genişliği elde ederek, birden fazla frekans bandını kapsayacak şekilde (C-bandı (4-8 GHz) ve X-bandı (8-12 GHz)), görünmezlik teknolojilerinde kullanılmak üzere UGB FSY tasarlayarak, RKA değerini azaltmak amaçlanmıştır.

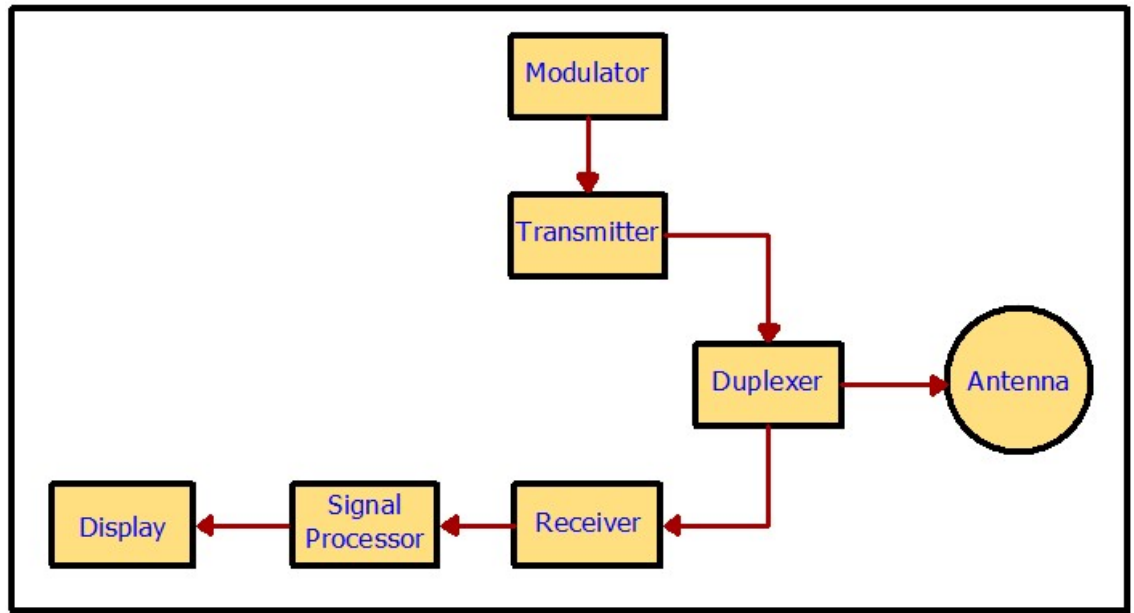
UBG sistemleri için, 3.1 GHz-10.6 GHz frekansları (7 GHz genişliğinden daha fazla bir frekans) kullanılabilir. Her radyo kanalı, merkez frekansına bağlı olarak 500 MHz'den fazla bir bant genişliği gösterebilir (Wong ve diğ., 2014).

Çalışmanın ilk bölümünde radar alanında çalışmaların nasıl başlandığı, FSY'nin kullanım alanları ve RKA azaltma yöntemi olarak FSY içeren yapıların kullanılmasından bahsedilmiştir. Bir sonraki bölümde literatürdeki frekans seçici yüzeyler ve bunların radar kesit alanının azaltımına etkilerini inceleyen çalışmalar özetlenmiştir. Akabinde yapılan bazı çalışmaların zayıflama düzeyleri ve performansları karşılaştırılmıştır. Tezin bir sonraki bölümünde radar kesit alanının tanımı, radar kesit alanının azaltma yöntemleri, FSY'leri etkileyen parametreler, FSY tasarımında elektrik ve manyetik alanların hesaplanması için Floquet modları ve son olarak FSY içerikli yapılar kullanarak RKA değerinin azaltılması hakkında bilgiler verilmiştir. Çalışmanın 3. Bölümünde C (4-8 GHz) ve X (8-12 GHz) bantlarını kapsayan, düşük dielektrik sabitli ve yüksek verimli olan Rogers RT5885 dielektrik tabaka kullanarak CST programı yardımıyla birim hücre tasarımlarının nasıl yapılacağı ifade edilmiştir. 4. Bölümde ise halka ve kesikli artı şekilleriyle oluşturulan yapılar, tek tek analiz edilip, tasarlanan yapılar üzerinde temel parametreleri değiştirerek rezonans frekansı bant genişliğini arttırmak için çalışmalar yapılmıştır. Ortaya çıkan bu iki yapı birleştirilerek daha yüksek verimli, ultra geniş bantlı (UGB) radar sistemlerinde kullanılacak iyi zayıflama düzeyine sahip, dalganın geliş açısından bağımsız yeni bir UGB FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Çalışma aralığı özellikle sağanak yağışa eğilimli bölgelerde, büyük bant genişliğine ihtiyaç duyulan yerlerde, orta menzilli hava savunma sistemi erken uyarı radarlarında (MEADS), meteoroloji alanındaki rüzgâr profillerinde (Windprofiler), arkeolojik araştırmalardaki yer radarlarında (GPR) ve birçok uydu iletişimlerinde kullanılmak için ayrılmış olan C-bandı (4-8 GHz) ve askeri uygulamalarda çok küçük antenlere ihtiyaç duyulan yerlerde, uçak radarlarında (Airborne Radar), uyduya takılı Yapay Açıklıklı Radarlarda (Synthetic Aperture Radar, SAR), askeri araştırmalarda ve yer yüzeyinin coğrafik ölçümlenmesinde kullanılmak için ayrılmış olan X-bandını (8-12 GHz) kapsamaktadır. (Orhan ve diğ., 2016; [www.radartutorial.eu/Waves and Frequency Ranges](http://www.radartutorial.eu/Waves%20and%20Frequency%20Ranges)).

2.1 Radar

Radar sistemlerinde temel olarak şekil 2.1’de gösterildiği gibi transmitter (gönderici), receiver (alıcı), zaman kontrol (senkronizasyon) ve sinyal işleme blokları bulunur.



Şekil 2.1. Temel radar blok diyagramı

Modülör, vericiye (transmitter) elektromanyetik dalgayı yayacağı süreyi ve elektromanyetik dalganın ne zaman yayılacağını bildirir. Radar sistemlerinde genelde tek bir anten kullanıldığı için gelen ve gönderilen sinyalleri birbirinden ayırmak için şekil 2.1’de görülen duplexer birimi tarafından, darbenin yayıldığı anda vericiyi ve alıcıyı ardışık iki darbe arasındaki zamanda antene bağlar.

Alıcı ve verici arasındaki uyum zaman kontrol birimi sayesinde sağlanır. Darbelerin gönderim zamanının bilinmesi radar ile menzil ölçümü yapmak için çok önemlidir. Anten tarafından gönderilen zayıf sinyaller alıcı tarafından yükseltilir.

Alıcıdan çıkan sinyaller sinyal işleme birimi tarafından incelenerek, hedefin tespiti, takibi ve uzaklığını belirlenir. İnceleme sonucu bilgiler display (gösterim cihazı) yardımıyla operatörün yorumuna sunulur.

Radarlar, çizelge 2.1 ‘de görülen elektromanyetik spektrumda yer alan radar bantlarını kullanarak çalışırlar. Dalga frekansı, dalgadaki enerji miktarı doğru orantılıdır. Bu yüzden düşük frekanslı dalgaların enerjisi düşük olurken yüksek frekanslı dalgaların enerjileri yüksek olur. Yüksek frekanslı dalgalar aynı zamanda yüksek bant genişliği sağlar. Bant genişliği veri aktarımıyla doğru orantılıdır. Bant genişliği arttıkça cihazlar arasındaki veri aktarımı daha kısa sürede ve çok daha fazla veri gönderimi şeklinde gerçekleşir. Bunun da çözünürlüğe etkisi pozitif yöndedir.

Yüksek frekanslı bir radar ile menzilden feragat edilerek hedefi daha net görülebilmekte veya teşhis edilebilmektedir. Çizelge 2.1’ de görüldüğü gibi uzun menzilli hava savunma radarlarının genellikle S-bant ve L-bandındadır. Özetle frekans, dalga boyu ve anten büyüklüğü radarların kullanım alanlarını doğrudan etkilemektedir.

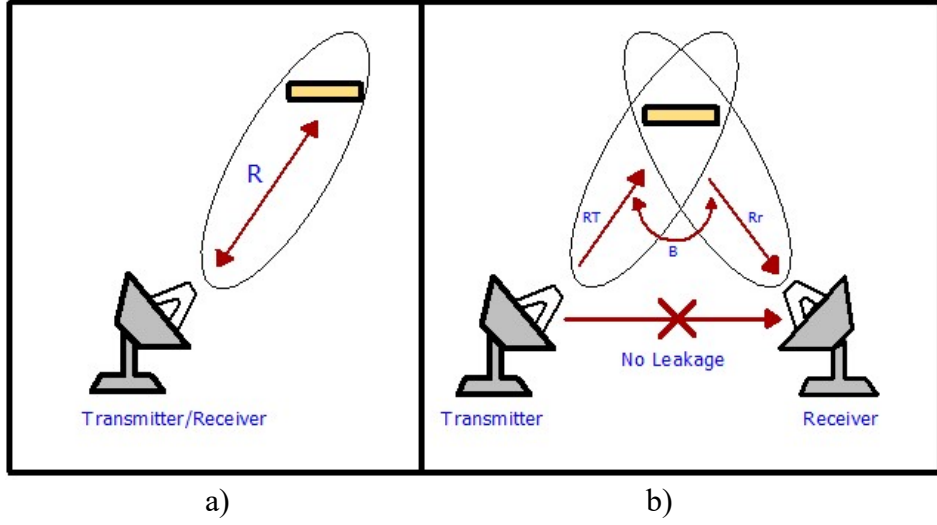
Çizelge 2.1. Radarların frekans ve savunma sanayisinde kullanım alanları

BANT	FREKANS	KARA	DENİZ	HAVA
VLF	3-30 KHz		YAKAMOS Karnaya Monteli Soner Sistemi	
LF	30-300 KHz			
MF	300-3000 KHz			
HF	3-30 MHz			
VHF	30-300 MHz			
UHF	300-1000 MHz			
L	1-2 GHz	Serhat havan tespit radarı, Havaalanı trafik radar sistemi		
S	2-4 GHz	Uzun menzilli erken ihbar ve ÇAFRAD uzun menzil radarı, Havaalanı trafik radar sistemi, ASELSAN silah tespit radarı	SMART S- MK2 radarı	

Çizelge 2.1. Radarların frekans ve savunma sanayisinde kullanım alanları (devam)

C	4-8 GHz			
X	8-12 GHz	KALKAN 1-2 MAR3D, ÇAFRAD aydınlatma, Mobil arama radarı	MAR-D 3D radarı, ALPER keşik gözetleme radarı, AKR-D blok atış kontrol	SARPER sentetik açıklıklı radar
Ku	12-18 Ghz	AKR atış kontrol radarı, ACAR-K	AKR-D blok A1-A2 atış kontrol radarı	m-SAR sentetik açıklıklı radar
K	18-27 Ghz	ASELSAN çevre güvenlik radarı		
Ka	27-40 Ghz	Reinar PRT-X çevre gözetleme radaru	AKR-D blok B1 atış kontrol radarı X-Ka Bant	
W	40-300 Ghz			MİLDAR atış kontrol radarı

İki temel radar sistemi vardır. Monostatik radarlarda iletim ve alma için aynı anteni kullanırken, bistatik radarlarda bu iki işlem için ayrı antenler kullanılır. Dolayısıyla bistatik radarlar, gönderici istasyonu ile aralarında uzaklık ve açı farkı çok olan bir ya da daha fazla alıcı istasyonundan meydana gelir.



Şekil 2.2. a) Monostatik radar b) Bistatik radar

Monostatik antenlerde hedefe çarpan güç yoğunluğu, verinin antenden yaydığı güç (p_t) ve antenin kazancı (G) ile doğru orantılıdır.

$$S_t = \frac{P_s}{4\pi R^2} G \quad (2.1)$$

Burada R hedef ile arasındaki mesafe, P_s hedeften yayılan toplam güç ve S_t hedefe gelen güç yoğunluğudur. Hedeften dağıtılan güç kaynağı sonlu boyutlu olduğu için saçılan alanın güç yoğunluğu ($1/(4\pi R^2)$) şeklinde azalmalıdır. Bu azalmadan dolayı alıcı antendeki güç yoğunluğu aşağıdaki denklemdeki gibi olmalıdır.

$$S_r = \frac{P_t G}{(4\pi R^2)^2} \sigma \quad (2.2)$$

Bir antenin maksimum etkin açıklık alanının antenin yönlülüğüyle ilişkili olduğu aşağıdaki denklemdeki gibi gösterilir.

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (2.3)$$

Etkin açıklık alanından yola çıkarak anten kazancı (G) aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.4)$$

Saçılan alanın güç yoğunluğundaki azalmadan dolayı antenin etkin alanı için (2.4) no'lu eşitlik kullanarak alınan güç aşağıdaki gibi bulunur.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \quad (2.5)$$

(2.5) no'lu denklem "Radar Denklemi" olarak adlandırılır (Pozar 2012). Bu denklem ile yayılan elektromanyetik alan sayesinde hedefin boyu, yönü, şekli ve hangi malzemeden yapıldığı gibi sorulara cevap bulunur.

Radarın maksimum mesafesi,

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 S_{min}} \sigma \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.6)$$

Burada S_{min} sinyal gücünün minimum değerini ifade eder. Radar mesafelerinin hesabında diğer bir etkende gürültüdür. Bu doğrultuda kayıpsız bir antende giriş gürültü gücü aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$N_i = k T_e B \quad (2.7)$$

B bant genişliğini, k $1,38 \times 10^{-23}$ Boltzmann sabitini, T_e Kelvin cinsinden etkin gürültü sıcaklığını ifade eder. S_{min} gürültüden büyük olmalıdır. Gürültü faktörü F eşitlik (2.8)'deki gibi gösterilir.

$$F = \frac{(SNR)_i}{(SNR)_o} \quad (2.8)$$

Burada $(SNR)_i$ giriş sinyal gürültü oranını, $(SNR)_o$ çıkış sinyal gürültü oranı ifade eder. Gürültü faktörünün diğer bir gösterimi ise aşağıdaki gibidir.

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \quad (2.9)$$

S_i giriş sinyal gücünü, S_o çıkış sinyal gücünü, N_i giriş gürültü gücünü, N_o çıkış gürültü gücünü ifade eder.

$$S_i = kT_eBF(SNR)_o \quad (2.10)$$

(2.10) no'lu eşitlik S_i giriş sinyal gücü denklemini olarak tanımlanır. Bu denklem doğrultusunda minimum algılanabilir sinyal gücü,

$$S_{min} = kT_eBF(SNR)_{omin} \quad (2.11)$$

Şeklinde elde edilir. Elde edilen bu eşitlik, (2.12) denklemindeki maksimum radar mesafesi eşitliğine eklenirse, maksimum radar mesafesi aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 kT_eBF(SNR)_{omin}} \sigma \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.12)$$

2.2 Radar Kesit Alanı (RKA) (Radar Cross Section, RCS)

Bir hedefin radar kesit alanı, radardaki görünürlük miktarı veya elektromanyetik (EM) dalgaların geri yansıma miktarı olarak ifade edilir. Geri yansıyıp, saçılan bu elektromanyetik dalgalar radar kesit alanı hesabının temelini oluşturur (Knott ve diğ., 1993).

$$\sigma = \frac{\text{Hedeften saçılan güç } (P_s)}{\text{Hedefte gelen güç yoğunluğu } (S_t)} [m^2] \quad (2.13)$$

Belirli bir yönde saçılan gücün gelen güç yoğunluğuna oranı, hedefin radar kesit alanı (σ) olarak tanımlanır. (2.13) no'lu denklemde radar kesit alanının gelme ve yansıma açılarının yanında, gelen ve yansıyan dalgaların polarizasyonuna da bağlı olduğu görülür. Hedeften dağıtılan güç kaynağı sonlu boyutlu olduğu için saçılan alanın güç yoğunluğu ($1/(4\pi R^2)$) şeklinde azalarak, radar denklemini oluşturur. Bu ifade doğrultusunda radar kesit alanı, (2.14) no'lu eşitliğe dönüşür.

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{P_{\text{saçılan}}}{S_{\text{gelen}}} \quad (2.14)$$

Bu durumda uzak alanda ($R \rightarrow \infty$) radar kesit alanı (2.15) no'lu eşitlik ile ifade edilir.

$$\sigma = 4\pi R^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{P_s}{S_t} \quad (2.15)$$

Küresel koordinatlarda;

(θ_i, ϑ_i) =Gelen dalganın yönü

(θ_s, ϑ_s) =Yansıyan dalganın yönü ifade eder. Bu ifadeleri kullanarak monostatik ve bistatik radar kesit alanının gösterimi eşitlik (2.16) ve (2.17) ile ifade edilir.

Monostatik olması için aşağıdaki eşitlik sağlanmalıdır.

$$\theta_i = \theta_s, \vartheta_i = \vartheta_s \quad (2.16)$$

Tam tersi durumda ise bistatik radar kesit alanı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\theta_i \neq \theta_s, \vartheta_i \neq \vartheta_s \quad (2.17)$$

Bu durumda toplam RKA ifadesi (2.18) no'lu eşitlikteki gibi elde edilir (Kopan 2007).

$$\sigma_t = \frac{1}{4\pi} \int_{\vartheta_s=0}^{2\pi} \int_{\theta_s=0}^{\pi} \sigma(\theta_s, \vartheta_s) \sin\theta_s d\theta d\vartheta_s \quad (2.18)$$

RKA, radarın hedef ile arasındaki mesafeye (R) bağlıdır. Gelen dalga düzlemsel dalga olarak seçilerek, hedefin radardan çok uzakta olduğu düşünülür. Bu durumda hedefin uzak alanında saçılan alanın mesafe 1/R oranına yaklaşır. Dolayısıyla radar kesit alanı mesafeden bağımsız hale gelir (Ant, 2010).

RKA'da hedefin saçılma parametreleri gelen dalganın frekansına göre farklılık gösterir. Bu farklılıklar, gelen dalganın alçak frekans, rezonans ve yüksek frekans bölgelerinde bulunmasına göre değişiklik göstermektedir. Bu yüzden hedefin RKA değerleri hesaplanırken belirlenen polarizasyonda her bir frekans, açı bağımlılığı için ve antenin monostatik ve bistatik durumuna göre ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Radar kesit alanı hesaplamalarında yansıyan dalga için belirli sınır koşullarında diferansiyel ve integral denklemlerine sahip elektromanyetik dalga problemlerinin çözülmesi gerektiğinden kullanılan nesnelere basit şekilde bile olsa hesaplama ve modellenmesi oldukça sordur. Bu yüzden tam modelleme işlemi yapılırken analitik ve nümerik yaklaşım yöntemlerinden yararlanılır.

2.2.1 Alçak Frekans Bölgesi

Dalganın boyunun hedefin boyundan büyük olduğu bölgeler alçak frekans bölgesi olarak ifade edilir. Bu bölgede dalganın faz dağılımının hedef boyundan küçük olduğundan dolayı hedefin indüklenen akım ve faz değeri yaklaşık olarak sabittir. Alçak frekans bölgesinde dalganın fiziksel şekli önemli değildir.

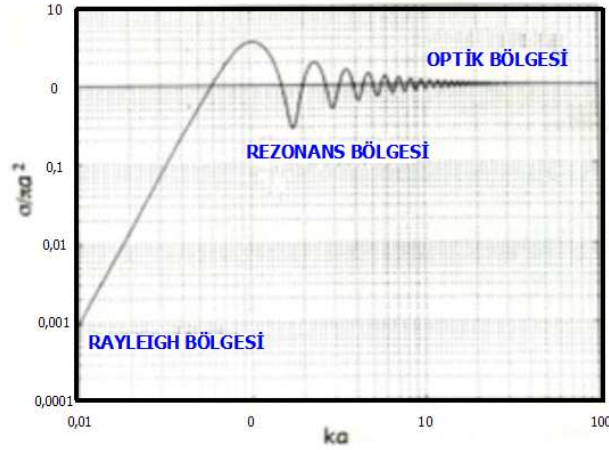
2.2.2 Rezonans Bölgesi (Mie Bölgesi)

Rezonans bölgesinde, hedefin indüklenen akımın faz değeri değişkendir. Dolayısıyla, bu bölgede matematiksel modellerin uygulanabilmesi için birçok analitik ve nümerik hesaplama yöntemleri bulunmaktadır.

2.2.3 Yüksek Frekans Bölgesi

Yüksek frekans bölgesinde, hedefin indüklenen akımının faz değişimi, fazla sayıda döngü içermesinden dolayı saçılma alanının açısı bağımlılığı yüksektir. Bu bölgede dalganın saçılması izole edilmiş parçalara göre değişiklik gösterir.

Bu yüzden hedefin hangi bölgesindeki saçılma parametreleri hesaplanacaksa sadece o parçası baz alınır. Bu bölgede de rezonans bölgesinde olduğu gibi matematiksel modellerin uygulanabilmesi için birçok analitik ve nümerik hesaplama yöntemleri gerekmektedir (Ergün Yardım, 2012).



Şekil 2.3. Üç frekans bölgesinde kürenin radar kesit alanı (Ergün Yardım, 2012)

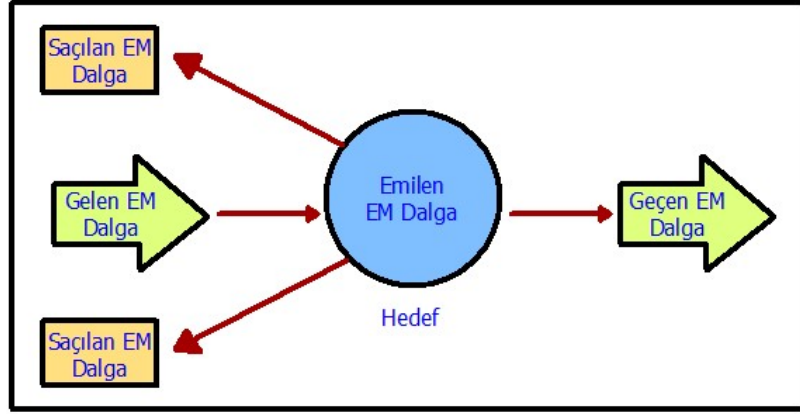
2.3 Radar Kesit Alanı Azaltımı

Askeri uygulamalarda (uçak, gemi) hedef platformların radarlar tarafından tespit edilememesi çok önemlidir. Görünmezlik teknolojisiyle birlikte nesnelerin radara yakalanma olasılıkları da azaltılmıştır.

Maksimum görünmezlik sağlanması için RKA 'nın azaltılması büyük bir önem arz etmektedir. RKA değeri ne kadar küçük olursa nesnenin tespit edilme oranı o kadar azalmaktadır. Radar kesit alanı hedefin geometrik şekli ve malzemesi, radarın yönü, saçılan sinyalin polarizasyonu ve sinyal frekansına bağlıdır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, alçak frekans bölgesinde RKA yüksek değerlere ulaşırken, yüksek frekans bölgesinde ise RKA değerinin düştüğü görülmektedir (Dikmen, 2015). RKA değerinin, hedeften saçılan elektrik alan (E_s) ve hedefe çarpan elektrik alan (E_i) değerleri cinsinden ifadesi (2.19) no'lu eşitlikteki gibi gösterilir (Barrick ve diğ., 1970).

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{(E_s)^2}{(E_i)^2} \quad (2.19)$$



Şekil 2.4. Elektromanyetik dalganın hedef ile etkileşimi (Özden ve diğ., 2016)

Radar kesit alanını minimuma indirmek için dört temel yöntem vardır.

1. Pasif iptal etme
2. Aktif iptal etme
3. Fiziksel şekillendirme ile RKA azaltma
4. Radar sönümleyici malzemeler yardımıyla RKA azaltma

2.3.1 Pasif İptal Etme

Pasif iptal etme temelde, başka bir enerji kaynağını iptal etmek için genliği ve fazı ayarlanabilen bir enerji kaynağı tanıtmaktır. Pasif iptal tekniği empedans yüklemesi tekniğini kullanır. Bu teknik sadece dar frekans bandı üzerinde etkisini gösterir. Savunma sanayisinde yüzlerce dalga boyuna ve enerji kaynağına sahip silah platformları kullanılır. Buradaki her enerji kaynağına farklı farklı pasif iptal etme tekniği uygulayarak RKA azaltmak pek pratik değildir.

2.3.2 Aktif İptal Etme

Aktif iptal etme, fiziksel şekillendirme ve radar sönümleyici malzemeler kullanımının oldukça zor olduğu düşük frekans RKA için en verimli yöntem olarak görülmektedir. Bu yöntemde hedef, yoğunluk olarak eşit ancak faz olarak radardan geri gelen yansımasına zıt bir radar sinyali üretir. Bu şekilde radardan gelen yansımayı taklit etmiş olacaktır. Böylece radar hiç geri dönüş alamayacaktır. Çok düşük güç kullanarak hedefin varlığını saklamasından dolayı avantajlıdır. Fakat düşük frekanslarda uygulaması zor olduğundan bu teknikle ilgili araştırmalar devam etmektedir (Shaeffer ve diğ., 2004).

2.3.3 Fiziksel Şekillendirme ile RKA Azaltma

Radar kesit alanını azaltmak için kullanılan en bilindik ve en önemli yöntemlerden biri cisimlere fiziksel şekillendirme yapmaktır. Geleneksel uçaklar çoğunlukla yuvarlak bir şekle sahiptir. Bu onları aerodinamik yapar, dolayısıyla radar sinyali yuvarlak bir şekle çarptığında sinyalin bir kısmını geri yansıtır. Bu yüzden geleneksel yuvarlak şekilli uçaklar çok verimli bir radar reflektörü oluşturur. Şekillendirme ile radar kesit alanı azaltma yöntemlerinde yuvarlak kenarların aksine cisimlerin kenar ve uç noktaları sivrileştirilir.

Günümüz teknolojisinde, bistatik radar kullanarak rasgele saçılan sinyalleri tespit etme olanağı artmaktadır. Bu durum cisimlerin radarda gizlenmesini zorlaştırmaktadır. Fiziksel biçimlendirmenin bir dezavantajı da geometrik yapıdır. Askeri bir aracın, geminin veya uçağın toplam boyutu göz önüne alındığında şekillendirme açısından çok fazla değiştirilemez ve geometrik yapısı kolaylıkla değiştirilemez. Değiştirilse bile cismin aerodinamik performansını bozabilir ve manevra kabiliyeti problemlerine yol açabilir.

2.3.4 Radar Soğurucu Malzemeler (RAM) Yardımıyla RKA Azaltma

Soğurma, elektrik ya da fotoelektrik malzemelerin, elektromanyetik alana yerleştirilmesiyle, elektromanyetik dalgaların gücünün ısıya dönüşerek azalmasıdır. Radar soğurucu malzemelerde soğurma mekanizmasını kullanarak radar tarafından gönderilen elektromanyetik enerjinin bir kısmını sönmülemesiyle ısı enerjisine dönüştürerek geri yansıyan ya da saçılan enerjiyi azaltan kayıplı ve malzemenin radarda tespitini güçleştiren malzemelerdir.

Uyumlaştırma katmanları, kademeli ve/veya sürekli empedans geçiş ara yüzleri, kayıplı dielektrik malzemeler, dirençli filmler, devreye bağlı yapılar ve bu yapıların tek başına veya birlikte kullanılması oluşan yapılar radar emici yapıları arasındadır. Radar soğurucu yapı tasarlarken aşağıdaki değişkenler dikkat edilmelidir (Özer, 2018).

- Rezonans Frekansı, f_0
- Bant Genişliği, Δf
- Yansıma Katsayısı, Γ
- Katman kalınlığı, H
- Düzlem Dalga Geliş Açısı, Φ, θ

Radar soğurucu malzeme ile kaplanan bölgelerde, yüzeydeki manyetik, elektrik ve mikrodalga özelliklileri değişir. Radar soğurucu malzemeler genellikle karbondan üretilir. Fakat karbonlarda, elektrik kayıplarının yanı sıra manyetik kayıplar da meydana geldiğinden karbonun yerine ferritler veya karbonil demir içeren malzemeler tercih edilmeye başlandı (Shaeffer ve diğ., 2004).

Fakat maliyet, uygulama kolaylığı, çalışma frekansının aralığı gibi unsurlar dikkate alındığında bu tür malzemeler kullanılarak üretilen RAM'lerin kullanımının sınırlı olduğu görülmektedir. Bu yüzden iletken polimer kullanılarak, daha kararlı, esnek ve hafif malzemeler üretildi. Ayrıca iletken polimerlerin direnci metallere göre yüksektir. İletken polimerlerin elektromanyetik özellikleri (geçirgenlik, geçirgenlik ve iletkenlik) sentez sırasında modüle edilebilir bu sayede RAM'lerin kullanımında daha geniş bir yelpazeye olanak sağlar.

Radar soğurucu malzemeler kullanılarak, radar kesit alanını azaltmanın üç yöntemi vardır.

1. Dereceli Arayüzler – Empedans Eşleştirme Yöntemi
2. Rezonant Malzemeler Yöntemi
3. Analog Emici Malzemeler Yöntemi

Radar soğurucu malzemeler, yüzeye gelen elektromanyetik dalganın ısıya dönüştürülerek yüzey tarafından emilip, geri yansımamasına bağlıdır. Boş uzayda gelişigüzel bir ortamdan dik gelen düzlem dalganın bir yansıması olmaktadır. Bu yansıyan dalganın, yansıma katsayısı (Γ) ,eşitlik (2.20) ile gösterilmektedir.

$$\Gamma = \frac{n-n_0}{n+n_0} \quad (2.20)$$

$n_0 = 1$ 'e eşit olduğu durumda boş alandaki yansıma katsayısı (2.21) no'lu eşitlik ile ifade edilir.

$$\Gamma = \frac{n-1}{n+1} \quad (2.21)$$

Burada n_0 boş uzayın empedansını, n ortamın empedansını ifade eder. Boş uzayın öz empedansı ise (2.22) no'lu eşitlik gibi gösterilmektedir.

$$n = \frac{\omega\mu}{k} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega \quad (2.22)$$

Burada μ_0 boş uzayın manyetik geçirgenliğini ($\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} H/m$), ϵ_0 boş uzayın elektrik geçirgenliğini ($\epsilon_0 = 8,854 * 10^{-12} F/m$) ifade etmektedir. Yüzeyin, uzaydan gelen dalgayı geriye yansıtması için gereken üç özel durum vardır. İlk durum, yansımanın olmaması için boş uzayın empedansı ile ortamın empedansının birbirine eşit olması ($n = n_0$) ile gerçekleşmektedir. İkinci durum, ortam ile boş uzayın tam uyumlu olması için bağıl elektrik geçirgenliğin (ϵ_r) ve bağıl manyetik geçirgenliğin (μ_r) birbirlerine eşit olmasıdır. ($\epsilon_r = \mu_r$) Bu koşul sadece bu iki değişkendeki malzemenin elektrik ve manyetik enerji depolama yeteneğini ifade eden reel kısım ile malzemenin elektrik ve manyetik enerji kaybını ifade eden imajiner kısımlarının birbirine eşit olmasıyla gerçekleşir (Özer, 2018).

$$\epsilon_I = \epsilon'_I - J\epsilon''_I, \quad \mu_I = \mu'_I - J\mu''_I \quad \left\{ \begin{array}{l} k_I = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0\mu_1\epsilon_1} = \pm k' \pm jk'' \\ n_1 = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_1}{\epsilon_0\epsilon_1}} = \pm n' \pm jn'' \end{array} \right. \quad (2.23)$$

Gelen dalganın genliğinin bire eşit olduğu varsayarsak (2.23) no'lu eşitlik düzenlemeler sonucu eşitlik (2.24) elde edilir (Oraizi ve Abdolali, 2009).

$$\epsilon = 0 - J\epsilon''_I, \quad \mu = 0 - J\mu''_I \quad \left\{ \begin{array}{l} k = \omega\sqrt{-\mu_1\epsilon_1} = 0 - jk'' \quad (k' = 0) \\ 0 = \sqrt{\frac{\mu''}{\epsilon''}} = +n' + j0 \quad (n'' = 0) \end{array} \right. \quad (2.24)$$

Üçüncü ve son durum ise elektrik ve manyetik kayıp tanjantlarının yüksek olmasıdır. Manyetik kayıp tanjantı ($\tan \delta_\mu$) ve elektrik kayıp tanjantı ($\tan \delta_\epsilon$) sırasıyla eşitlik (2.25) ve (2.26)'da gösterilmektedir.

$$\tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (2.25)$$

$$\tan \delta_\epsilon = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.26)$$

Göreceli empedans ifadesi ise eşitlik (2.27) ile ifade edilmektedir.

$$Z_A = \left(\frac{\mu'}{\epsilon'}\right)^{1/2} \left(\frac{1 + ita \epsilon - itan\delta_\mu + tan\delta_\epsilon ta \mu_1}{1 + tan^2\delta_\epsilon}\right)^{1/2} \quad (2.27)$$

Yansıma katsayısının sıfıra eşit olduğu düşünülürse (2.28) no'lu eşitlik elde edilir.

$$\epsilon' \mu' \text{ ve } tan\delta_\mu = tan\delta_\epsilon \quad (2.28)$$

Bu durumda radar kesit alanını azaltmak için kullanılan emici malzemenin maksimum soğurma sağlaması için ϵ ve μ değerlerinin yüksek olması gerektiği görülmektedir (Gaylor, 1989). Tanjant değeri artarken dielektrik kayıptan kaynaklı zayıflama sabitinin arttığı görülmektedir. Bu yüksek elektrik ve manyetik kayıplı malzemelere metal, karbon, ferrit, iletken polimerler ve polianilin bileşenleri örnek olarak gösterilir (Shami, 2016). İncelediğimiz üç özel durumdan dikkate alındığında maksimum soğuruculuğu elde etmek için aşağıdaki koşullar göz önünde bulundurulmalıdır.

1. $n = n_0$
2. $\epsilon_r = \mu_r$
3. Manyetik kayıp tanjantın yüksek olması

2.3.4.1 Dereceli Arayüzler – Empedans Eşleştirme

Belirli bir yüzeye çarpıp, geri yansıyan dalga, gelen ile iletilen ortamdaki empedans farkıyla doğru orantılıdır. Dolayısıyla empedans farkı ne kadar yüksekse, yüzeyden geri yansıyan dalga o kadar yüksektir. Bu durumu önlemek için empedans uyumlama işlemi yapılmalıdır. Üç çeşit (piramidal, konik ve uyumlu RAM tekniği) empedans uyumlama teknikleri bulunmaktadır (Pozar, 2012).

2.3.4.1.1 Piramit Yöntemi ile Empedans Uyumlama

Empedans uyumunu sağlamak için kullanılan bu soğurucular, yüzeye dik olan piramidal veya koni yapıları olan kalın malzemelerdir. Bu malzemeler soğurucunun empedansı ile yüzey empedans arasında kademeli bir geçiş sunarak empedans uyumunu sağlamaktadır. Fakat bu malzemeler kalın ve kırılgen yapıda olduğu için kapladıkları yüzeyi daha da kalınlaştırarak cisimlerin daha da ağırlaşmasına neden olur. Genellikle yankısız odalar için kullanılır (Pozar, 2012).

2.3.4.1.2 Konik Yöntemi ile Empedans Uyumlama

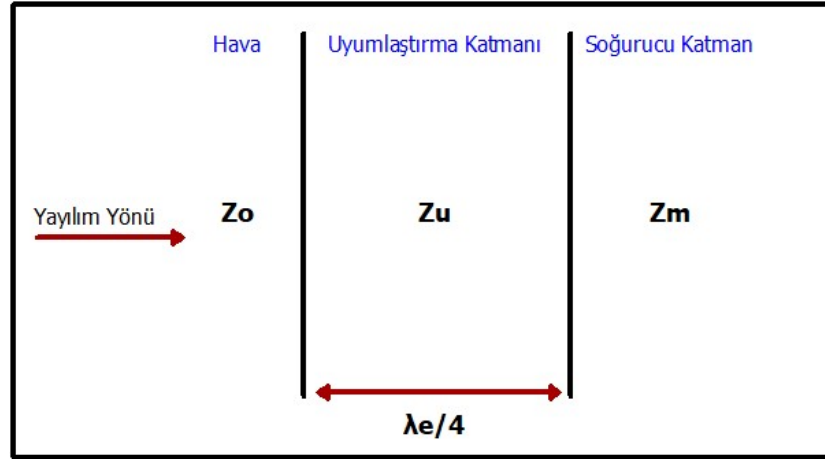
Konik yönteminde kullanılan malzemeler düşük ve yüksek kayıplı malzemelerin karışımından oluşan bir levhadır. Bu malzemeler piramitlere göre daha hafif ve incedir. Fakat radar soğurma performansı düşüktür.

2.3.4.1.3 Uyumlu RAM Tekniği ile Empedans Uyumlama

Bu yöntemde temel amaç empedans ile yüzey arasında kademeli geçiş işlemine yaparken kullanılan malzemelerin kalınlığını azaltmaktır. Soğurucu katman, gelen ve soğuran ortam arasına yerleştirir ve geçiş bölgesi olarak tanımlanır.

Geçiş bölgesinde empedans uyumunu sağlamak için kullanılan katman kalınlığı ilgili frekanstaki çeyrek dalga boyuna eşitlenir. Dalga uyumlaştırıcıların dar soğurucu olarak kullanılmasının nedenlerinden biri de kalınlığın çeyrek dalga boyuna eşitlenmesidir. Uyumlaştırma katmanı öz empedansı (2.29) no'lu eşitlik ile ifade edilir (Cheng, 1989).

$$Z_u = \sqrt{Z_0 Z_m} \quad (2.29)$$



şekil 2.5. Uyumlu RAM Tekniği ile Malzeme Tasarımı (zer, 2018)

2.3.4.2 Rezonant Malzemeler

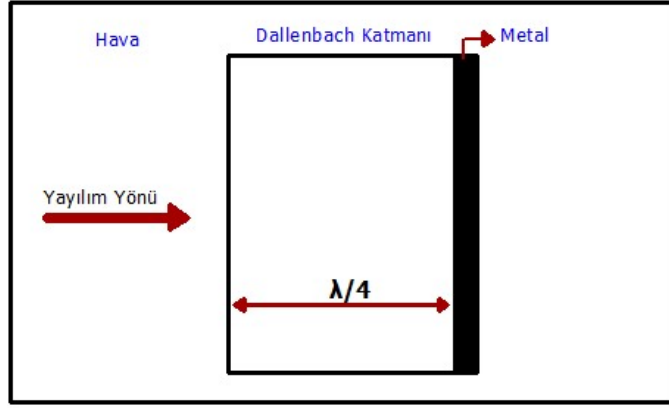
Bu teknikte gelen ve soğuran ortam arasına kullanılan malzemelerin çok ince olduğundan dolayı empedans uyumlama yapılamamaktadır. Bu nedenle gelen dalganın tamamı emilemediğinden geri yansıma ve iletim meydana gelir. İletilen dalga soğurucu ortamdan geçerek metal cisme çarpıp geri yansıtılır.

Yansıyan ikinci dalganın, ilk yüzeyden yansıyan dalga ile fazları ters düşer. Ayrıca ilk dalganın kat etiği mesafe dalga boyunun yarısı ve çift katlıysa, fazları da birbirlerinin tersi olduğu için yansıyan bu iki dalga birbirlerini sönmüleyecektir (Saville, 2005). RKA azaltma işlemini rezonant malzemelerle gerçekleştirmek için üç yöntem vardır.

1. Dallenbach katmanı
2. Salisbury tabakası
3. Jaumann katmanları

2.3.4.2.1 Dallenbach Katmanı

Dallenbach tabakası iletken düzlemdeki bir soğurucu katmandır. Kullanın katman çeyrek dalga boyu kalınlığında seçilerek yansıtıcılığı minimum düzeyde tutacak şekilde seçilir. Bu katmanı tasarlarken sadece manyetik kaybı yüksek (ferrit) malzemeler değil aynı zamanda elektrik kayıplara sahip malzemelerde (karbon parçacıkları, silikon karbür, karbon siyahı vb.) kullanılır. Tabakadan yansıyan ilk dalga ile ve iletilen dalga soğurucu ortamdan geçerek metal cisme çarpıp geri yansıyan ikinci dalganın faz farkının 180^0 olmasından dolayı bu iki dalganın birbirini sönmülemesi prensibine dayanmaktadır.



Şekil 2.6. Dallenbach Katmanı (Pay, 2018)

Geri yansıyan dalganın minimum düzeyde olması için, dalganın geldiği ortamdaki empedans (Z_0) ile katmanın etkin empedansı (Z_1) eşitlenerek geri yansıyan dalga minimum düzeyde tutulur. Soğurucu katman metal yüzeyin önünde olduğunda Dallenbach katmanı (2.30) denklemindeki gibi tanımlanır.

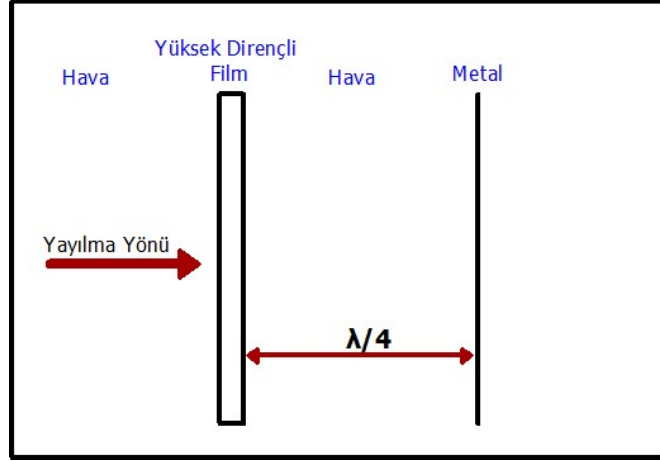
$$Z_1 = Z_m \tanh(\gamma_2 d_2) \quad (2.30)$$

Burada $Z_m = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}}$ soğurucu malzemenin öz empedansı, γ_2 soğurucu malzemenin bulunduğu düzlemdeki dalga yayılım sabitini, d_2 malzemenin kalınlığını ifade etmektedir.

2.3.4.2.2 Salisbury Tabakası

Salisbury tabakası, rezonans tekniğiyle çalışır. Fakat soğurucu malzemelerin aksine dielektrik katsayısı ve kayıp parametrelere bağlı değildir. Yansımayı dirençli levhalar yardımıyla azaltmayı hedefler (Salisbury 1952). Bu dirençli levhalar, hava boşluğuyla ayrılmış metal yüzey üzerine Şekil 1.8 'de ki gibi çeyrek dalga boyu olacak şekilde yerleştirilir.

Katman kalınlığını azaltmak için hava boşluğu yerine dielektrik malzemeler de kullanılır. Fakat bu şekilde bant genişliğini azaltarak geniş bantlı uygulamalarında kullanmayı zorlaştırır.



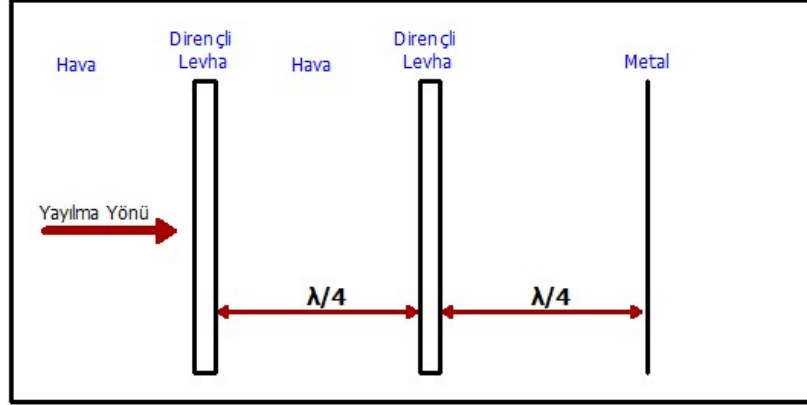
Şekil 2.7. Salisbury tabakası (Özer, 2018)

2.3.4.2.3 Jaumann Katmanı

Jaumann katmanları, Salisbury tabakasının geniş bantlarda elverişli olmamasından dolayı ortaya çıkmış bir tekniktir. Bu teknikte iki ya da daha fazla düşük kayıplı dielektrik levhalar kullanarak Salisbury tabakasında olduğu gibi hava boşluğuyla ayrılmış metal yüzey üzerine çeyrek dalga boyu olacak şekilde yerleştirilir.

Bu işlem birden fazla dirençli levha ile yapıldığı için bant genişliği artırılarak, geniş bantlı uygulamalarda da yüksek emicilik sağlayabilmektedir (Savilla, 2005). Dielektrik levhalar kullanarak oluşturulan tabakaların kalınlık $\lambda/\sqrt{\epsilon_r}$ olur. Fakat dielektrik ve manyetik soğurucular birlikte kullanıldığında oluşan tabakanın kalınlık ifadesi $\lambda/(\sqrt{\epsilon_r\mu_r})$ şeklinde olur (Güler ve Şen, 2012). Bu ifadeler doğrultusunda ϵ_r değeri azaldıkça katmanın kalınlığının arttığı görülmektedir. Bu yüzden kalınlığı azalmak için birçok araştırma yapılmıştır. Bunlardan biri düşük ϵ_r değerine sahip seramik ferroelektriklerdir.

Çok ince kaplamalı malzemeler ile soğurma işlemi gerçekleştirilmesine rağmen hava boşluğu ile metal yüzey arasında empedans uyumluluğu sağladığı için Jaumann Katmanında olduğu gibi çok katmanlı yapılarda kullanılabilir (Bayraktar, 2011).

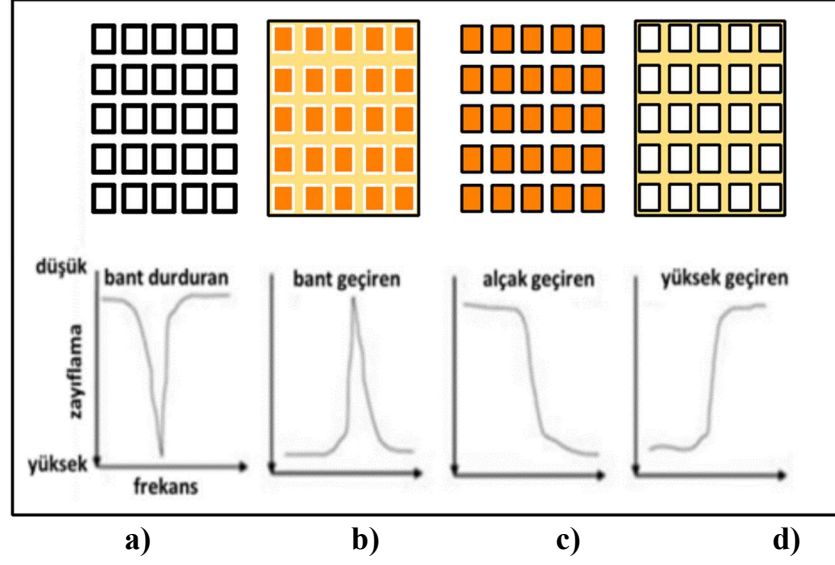


Şekil 2.8. Jaumann Katmanı (Özer, 2018)

2.4 Frekans Seçici Yüzey (FSY) (Frequency Selective Surface, FSS)

Yüzeğe gelen elektromanyetik dalgaların belirlenen frekans aralığına bağlı olarak, iletim veya yansıma özelliği gösteren tek veya çift katmanlı periyodik yapılara frekans seçici yüzey (FSY) denir (Topcuoğlu, 2018). FSY'ler kalkanlama etkinliği denilen yapı ile istenen frekanslarda sistemin çalışmasını sağlayıp, istenmeyen frekansları engelleyerek filtre özelliği göstermektedir (Munk, 2000; O'Nians ve diğ., 1966).

Frekans seçici yüzeyler, alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durduran filtre olmak üzere dört farklı filtre karakteristiği gösterir.



Şekil 2.9. Dört çeşit filtre karakteristiği (Boyalı yerler, iletken kısmı temsil eder)
a) Bant durdurucu b) Bant geçiren c) Alçak geçiren d) Yüksek geçiren (Sung, 2006)

FSY'lerin zayıflama düzeyleri bakımından kalkanlama etkinlikleri dört şekilde sınıflandırılır. En düşük kalkanlama etkinliği 10-30 dB arasında, orta seviye 30-60 dB arasında, iyi seviye 60-90 dB arasında, çok iyi düzeyde kalkanlama etkinliğine sahip olanlar ise 90 dB üzeri zayıflamaya sahip olan yapılardır (Gökçen ve diğ., 2005).

2.4.1 Frekans Seçici Yüzey Parametreleri

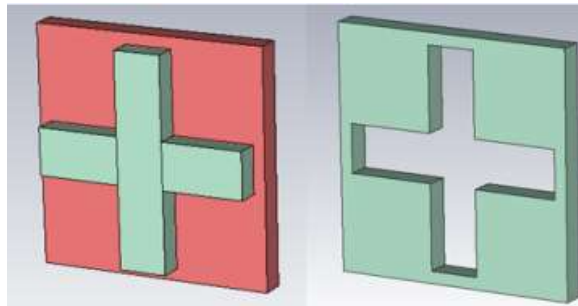
Munk (2000) yansımaya-iletim karakteristiğini ve frekansın özelliklerini belirleyen en önemli etkenlerin, tasarımda kullanılan birim hücre geometrisi, elemanların iletkenliği, dielektrik levhaların etkileri, elemanlar aralarındaki boşluk mesafesi, yüzeye gelen elektromanyetik dalganın geliş açısı ve yüzey malzemenin kalınlığı olduğunu ifade etmiştir.

FSY tasarımı polarizasyondan bağımsız bir şekilde yapılmalıdır. Bu sayede birim hücreler yatay ve düşeyde simetrik olurlar. Kocakaya ve Çakır (2020) çalışmalarında birim hücrelerin küçüldükçe geliş açısı ve bant genişliği artacağından daha iyi bir rezonans kararlılığı elde edilmek için tasarımda kullanılan birim hücrelerin çok küçük olması gerektiğini belirtmiştir. Belirlenen frekansın dalga boyunun yaklaşık olarak dörtte biri ($\lambda/4$) olacak şekilde birim hücre boyutu hesaplanabilmektedir (Alpaslan ve diğ., 2016).

2.4.1.1 Frekans Seçici Yüzeyin Geometrik Şekli ve Boyutu

FSY'lerin filtre karakteristiğini belirleyen en önemli etkenlerden biri geometrik yapısıdır. FSY, farklı geometrik şekillere sahip iletken üzerindeki periyodik yarıklar veya dielektrik tabakalar üzerine periyodik olarak yerleştirilmiş iletken yamalardan oluşmaktadır (Kiermeier ve Biebl, 2007). Birim hücrelerin yama (patch) ya da oyuk (aperture) şeklinde olmasına göre FSY'nin karakteristik özelliği değişmektedir.

Tasarlanan yapılarda iletken yamalar kullanılması durumunda alçak geçiren filtre özelliği gösterirken, periyodik yarıklar kullanılarak oluşturulan yapı ise yüksek geçiren filtre özelliği göstermektedir. Zamanla yapılan araştırmalar ve geliştirmeler doğrultusunda FSY tasarımı için daire, kare, altıgen ve fraktal gibi çok sayıda farklı geometrik şekiller kullanılarak bant durduran ve bant geçiren periyodik elemanlar ortaya çıkarak toplamda dört farklı filtre karakteristiği meydana gelmiştir (Göksel, 2018; Taylor ve diğ., 2011; Li ve diğ., 2011; Zheng ve diğ., 2010).



Şekil 2.10. Yama ve oyuk tipinde hac geometrik şekilli FSY (Angun, 2017)

Bant durduran ya da bant geçiren filtre özelliğini belirleyen en önemli unsur ise iletken kaplanan yüzey miktarıdır. Yüzeyin çoğu iletken tabaka ile kaplanmışsa bant geçiren, kaplanan kısım az ise bant durduran karakteristiği göstermektedir (Özdin, 2020).

FSY tasarımında kullanılan elemanlar dört gruba ayrılır.

1. N – kutuplu ya da merkeze bağlı yapılar; dipol, üçlü kutuplar (tripoles), köşeli çapraz kutuplar (the Jerusalem cross) gibi geometrik yapılardır. Bu yapılarda tam yansıtma (rezonans) sağlanması için FSY'nin uzunluğunun yaklaşık olarak dalga boyunun yarısı kadar olması gerekmektedir. Genellikle dar bantlı yapılardır (Munk, 2000)

2. Döngü yapılar; üç ya da dört bacaklı elemanlar (three –or four – legged loaded elements), dairesel döngüler (circular loops), kare ve altıgen döngüler (square and hexagonal loops) gibi geometrik yapılardır. Bu yapılarda tam yansıtma sağlanması için FSY'nin uzunluğunun yaklaşık olarak dalga boyuna eşit olması gerekmektedir. N kutuplu yapılara göre daha geniş bantlı yapılardır.

3. Yama tipi yapılar; daire, kare, altıgen gibi geometrik yapılardır. Bu yapılarda tam yansıtma sağlanması için FSY'nin uzunluğunun dalga boyuna yakın olması gerekmektedir. Yama tipi yapılarda elektromanyetik dalgaların geliş açısına göre kararlılık özelliğinin artmasından dolayı avantajlı olmaktadır.

4. Hibrit yapılar; bu yapılar yukarıdaki üç yapının birleştirilmesiyle oluşturulduğu için rezonans frekansı diğer yapılar gibi belirlenmemektedir.



1.Grup: N – kutuplu ya da merkeze bağlı yapılar



2.Grup: Döngü yapılar



3.Grup: Yama tipi yapılar



4.Grup: Hibrit yapılar

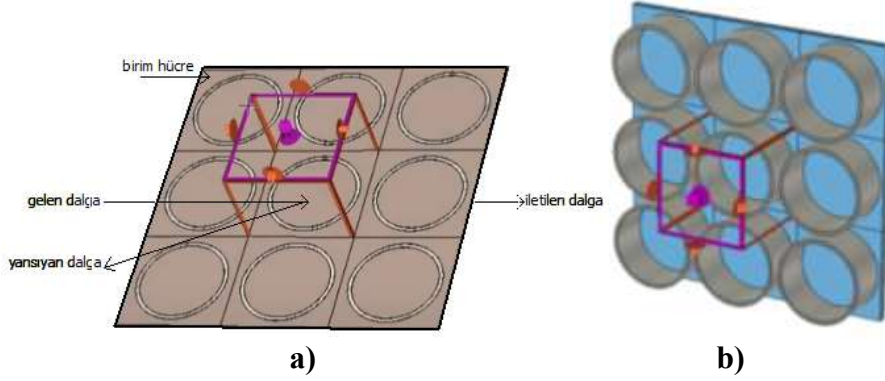
Şekil 2.11. FSY tasarımında kullanılan elemanlar (Göksel, 2018)

Aynı geometrik şekle sahip FSY'lerin temel parametrelerinin farklı olması rezonans frekansı, bant genişliği ve s parametresi gibi sonuçları etkilemektedir. Dolayısıyla yapının şekli dışında boyut ölçüleri de çok önemlidir.

Malzeme kalınlığı FSY'nin iki boyutlu (2D) ya da üç boyutlu (3D) olmasını belirlemektedir (Wu, 1995; Güngör, 2012). Tasarımında kullanılan yüzey malzemenin kalınlığı ile rezonans frekansındaki dalga boyuna (λ_0) oranına göre kalın ya da ince olarak nitelendirilir.

İletken yüzey kalınlığı, rezonans frekansına karşılık gelen dalga boyunun (λ_0) 0,001 katından küçük olan yapılar 2D FSY (ince) olarak kabul edilir. Kesim frekansındaki dalga boyundan büyük olan yapılar ise 3D FSY (kalın) olarak adlandırılır (Azemi ve Rowe, 2011; Angun, 2017).

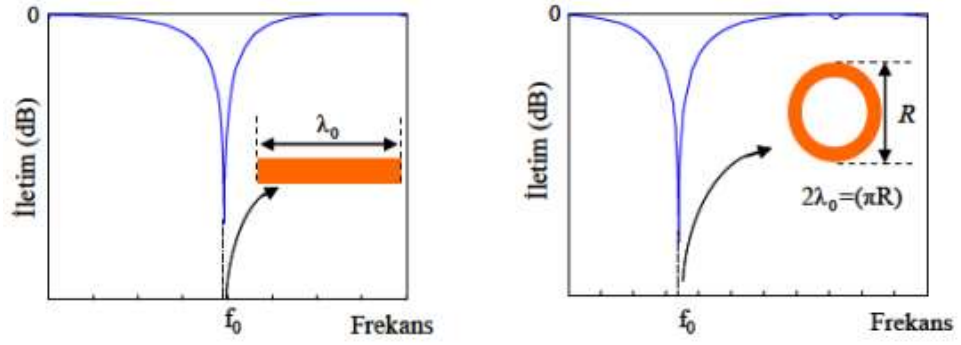
2D FSY'ler hafif ve küçük olduğundan düşük maliyetli ve yapımı kolaydır. Daha basit devrelerde kullanılır. Kalın yapılar, ince yapılara göre daha maliyetli ve üretimi zordur fakat birçok uydu haberleşmesinde kullanılmaktadır. Halka yama kullanarak tasarlanan 2D ve 3D FSY gösterimi şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12. a) 2D FSY Gösterimi b) 3D FSY Gösterimi

FSY'nin en küçük elemanı birim hücre olarak adlandırılır. FSY tasarımı polarizasyondan bağımsız bir şekilde yapılmalıdır. Bu sayede birim hücreler yatay ve düşeyde simetrik olurlar. Birim hücreler küçüldükçe geliş açısı ve bant genişliği artacağından daha iyi bir rezonans kararlılığı elde edilmek için tasarımda kullanılan birim hücrelerin çok küçük olması gerektiğini belirtmiştir (Kocakaya ve Çakır, 2018). Belirlenen frekansın dalga boyunun yaklaşık olarak dörtte biri ($\lambda/4$) olacak şekilde birim hücre boyutu hesaplanabilmektedir (Alpaslan ve diğ., 2016).

Yapıda kullanılan malzemelerin uzunluğu rezonans durumunu etkilemektedir. Merkeze bağlı yapılarda uzunluk yaklaşık olarak dalga boyunun yarısı kadar olması gerekmektedir. Döngü yapılarda ise çevre uzunluğu yaklaşık olarak dalga boyuna eşit olduğu durumlarda tam yansıtma özelliği sergilemektedir (Wu, 1995; Angun, 2017).



Şekil 2.13. Farklı geometrik şekillerin iletim karakteristikleri (Uçar, 2007)

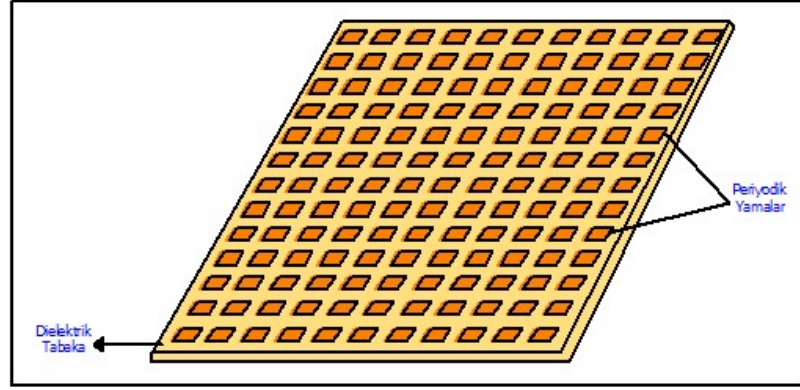
Tasarımda kullanılan iletken malzemenin farklılığı yapının eşdeğer modelindeki direncini de etkilemektedir (Güngör, 2012).

2.4.1.2 Birim Hücreler Arasındaki Mesafe

Birim hücreler, dielektrik tabaka üzerine x-y yönlerinde periyodik olarak yerleştirilmesiyle elde edilir (Göksel, 2018; Habergötüren Ateş, 2018). Hücreleri katman üzerine yerleştirilirken aralarındaki mesafe " $w \cdot \cos \theta$ " eşitliğine uygun olmalıdır. Bu doğrultuda rezonans frekansı ve bant genişliği, elektromanyetik dalganın geliş açısına (θ) göre değişim göstermektedir (Munk, 2000). Daha kararlı bir yapı elde etmek için yapılar arasındaki mesafe kısa tutulmalıdır (Sung ve Neve, 2006).

2.4.1.3 FSY Tasarımında Kullanılan Dielektrik Tabakalar

Tasarımda kullanılan dielektrik tabaka rezonans frekansının belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. (Munk, 2000). Dielektrik alt tabakanın kalınlığı azaltıldığında rezonans frekansı serbest alan rezonans frekansına doğru sürünmeye başlar. Bu da rezonans frekansı tahminini güçleştirir (Callaghan ve diğ., 1991).



Şekil 2.14. Periyodik iletken yamaların gösterimi (Bayatpur, 2009)

Rezonans frekansı (f_r) ve ϵ_r değeri, iki yama arasındaki statik kapasitans değişimi (ϵ_{eff}) ile ifade edilebilir. Bu eşitlikler incelendiğinde ϵ_r ile rezonans frekansına karşılık gelen dalga boyunun (λ_0) ters orantılı olduğu görülmektedir (Nauman ve diğ. 2016). Dolayısıyla kapasitif elemanın artmasıyla rezonans frekansı azalmaktadır.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (2.31)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.32)$$

Rezonans frekansı ile dielektrik malzemelerin elektrik geçirgenliği çoğu zaman ters orantılıdır. ϵ_r değerinin artması, rezonans frekansında azalmaya neden olabilir (Wu, 2000; Topçuoğlu, 2018).

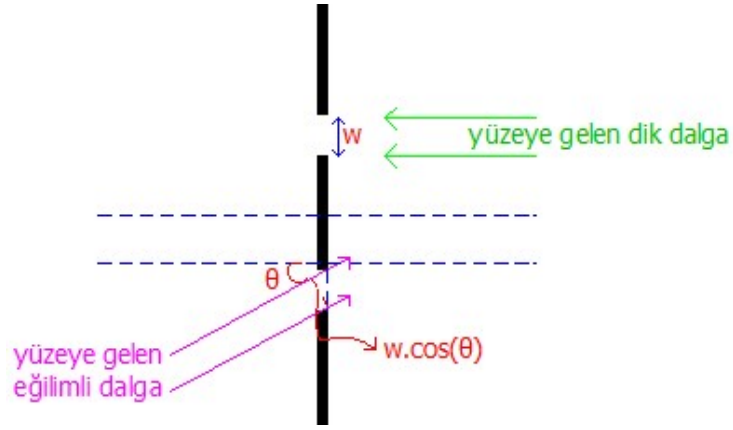
2.4.1.4 FSY Tasarımında Kullanılan Elemanların İletkenliği

Frekans seçici yüzey tasarımında seçilen iletken yüzeyin farklılığı yapının eşdeğer devre modelindeki direncinin değişimine neden olur. Bu da frekans seçici yüzeyin farklı karakteristik yapıda olmasını sağlar (Güngör, 2012).

Tasarlanan FSY 'nin performansı malzemenin iletkenliği ile doğru orantılıdır. İletkenliğin azalması sonucu gelen dalga enerjisini kaybederek ısıya dönüşür. Bu da istenilen verimi alamamaya neden olur.

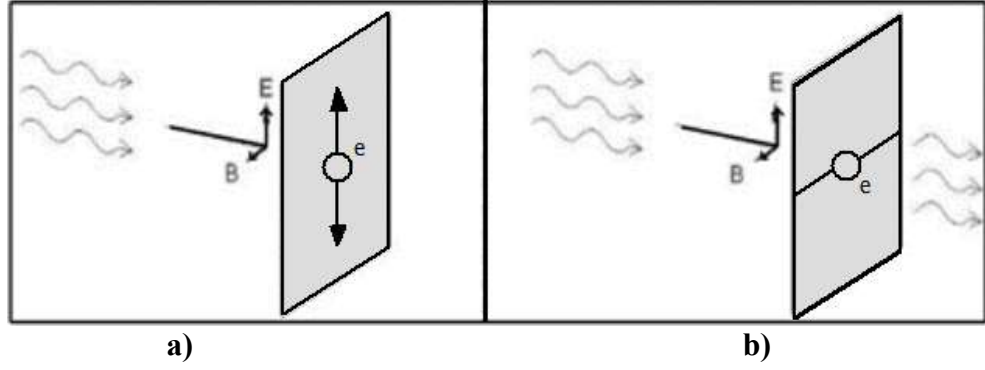
2.4.1.5 Dalgaların Geliş Açışı ve Kutuplanma

Periyodik yamalar katman üzerine yerleştirilirken " $w \cdot \cos \theta$ " eşitliğine uygun olarak yerleştirildiği için dalga geliş açısındaki (θ) değişim, mesafeyi de etkilemektedir. Bu yüzden geliş açısındaki farklılıklar, FSY 'nin rezonans frekansı, bant genişliği ve s parametreleri gibi karakteristiklerini değiştirir.



Şekil 2.15. Dalga geliş açısının gösterimi

Yüzeye gelen dik ya da eğilimli dalgaların kutuplanmasına göre rezonans frekansı, bant genişliği ve s parametreleri gibi FSY'nin temel karakteristiklerinde değişiklik göstermektedir. Kutuplanma TE (Transverse Electric) ve TM (Transverse Magnetic) modları şeklinde olur (Hooberman, 2005).



Şekil 2.16. a) İndüklenmiş elektronun filtre yüzeyindeki düşük geçirgenliğini **b)** Elektrik alan vektörü ile dipol elemanın birbirine dik düzlemlerde olduğu örnek bir durum (Hooberman, 2005)

Şekil 2.16'da kaynağın elektrik alan vektörüyle aynı düzlemde olduğu bir görsel mevcuttur. Burada gelen dalga düzleme çarpması sonucunda ne olduğu incelenmiştir. Düzlemde duran elektrona, elektrik alan vektörünün kuvvet uygulaması sonucunda elektrik alan salınım yapmaya başlayacaktır. Salınımın devam edebilmesi için gelen dalganın bir kısmını iletir, kalan kısımları ise emmektedir. Fakat gelen dalganın tamamı, yüzeydeki elektron tarafından emilirse, iletim olmayacağı için filtreden geçen dalga olmayacaktır. Bu olay indüklenmiş salınım (düşük geçirgenlik) olarak adlandırılır. İndüklenmemiş salınım (yüksek geçirgenlik) ise kaynağın elektrik alana dik olduğu durumda gerçekleşir. Bu durumda elektron, kuvvetin uygulandığı yöne dik olur. Dolayısıyla elektronun hareketi azalacağı için kaynaktaki kinetik enerjinin az bir kısmı kullanılır. Gelen dalga, elektron tarafından fazla emilmeyip, karşı tarafa az bir kayıpla iletilir (Hooberman, 2005).

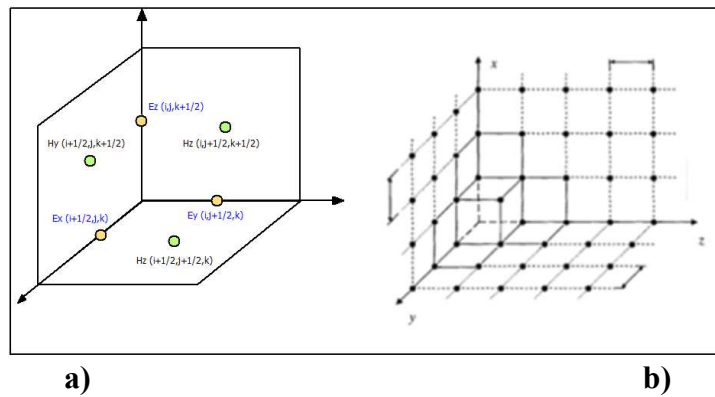
2.4.2 Frekans Seçici Yüzeylerin Analizinde Kullanılan Teknikler

FSY'lerin ölçülmesinde nümerik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları şu şekildedir.

1. Zaman Domeninde Sonlu Farklar Yöntemi (ZDSF) (Finite Difference Time Domain, FDTD)
2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) (Finite Element Method, FEM)
3. Eşdeğer devre modeli (Equivalent Circuit (EC) Models)
4. Moment Yöntemi (MoM)

2.4.2.1 Zaman Domeninde Sonlu Farklar Yöntemi (ZDSF) (Finite Difference Time Domain, FDTD)

Zaman domeninde sonlu farklar yönteminde sonlu farklar denkleminde yararlanılarak, diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümüne ulaşılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminden farkı olarak bu yöntemde yapılan analizler zaman domeninde yapılmaktadır. Bu yöntemde Yee Hücresi kullanılarak çözüm uzayı hücreler ve noktalar şeklinde ayrıştırılır veya sonlu adıma bölünür. Ayrıştırılan noktaların çözümü sonlu farklar şeklinde ifade edilerek diferansiyel denklemler çözüme kavuşturulur. ZDSF yöntemi, büyük matris yapıları içermediğinden dolayı ulaşılan çözümlerin doğruluk olasılığı çok yüksektir.



Şekil 2.17. a) Alan bileşenlerinin YEE hücresinde yerleşimi **b)** Hücrelerin noktalara ayrıştırılması

2.4.2.2 Moment Yöntemi (MoM)

Açık alan problemlerinde genellikle integral denklemlerinin çözümü için tercih edilen bu yöntemde Green fonksiyonları kullanılarak elde edilir. Bu yöntemde yapı sonlu parçalara ayrılır ve doğrusal bir matris denklemi elde edilerek bilinmeyen katsayılar çözülür. Elde edilen matris sisteminin boyutu segment sayısı arttıkça artar. Bu durum bilinmeyenleri çözmeyi zorlaştırır. Moment yönteminde çözüm büyük matrislerden oluşur ve matris ters almadaki sayısal zorluklar bu yöntem için bir dezavantaj oluşturur. Bu yöntem dielektrik tabakalar ile yapılan frekans seçici yüzeydeki elektromanyetik saçılmaları analiz etmek için oldukça kullanışlıdır fakat homojen olmayan yapılarda ve daha karmaşık geometrilere sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemi tercih edilmelidir.

Green fonksiyonun $a \leq x \leq b$ olduğu durumda seri formda gösterimi;

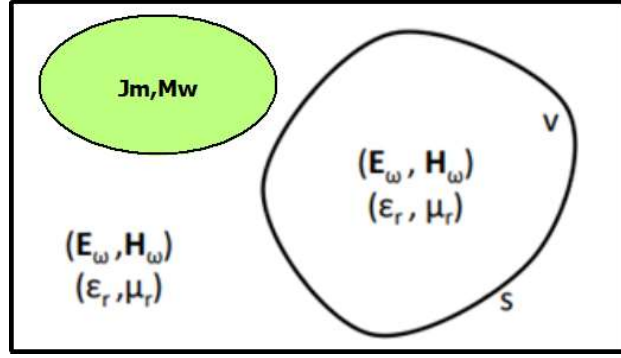
$$G(x, x') = \sum_n \frac{\Psi_n(x)\Psi_n(x')}{a-a_n} \quad (2.33)$$

Burada $\varphi_n(x)$ sınır koşullarını fonksiyonları ifade eder. Green fonksiyonun integral formda gösterimi (2.34) no'lu eşitlikteki gibi ifade edilir (Aksoy, 2020).

$$G(x, x') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-jk(x-x')}}{k_0^2 - k^2} dk \quad (2.34)$$

Green fonksiyonu çözümlerinde çoğunlukla (2.35) no'lu eşitlik biçiminde diferansiyel denklemler kullanılır (Aksoy, 2020).

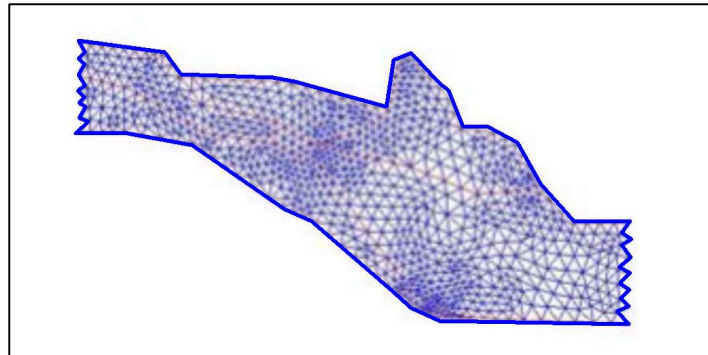
$$\frac{d}{dx} \left[p(x) \frac{dy}{dx} \right] - q(x)y(x) = f(x) \quad (2.35)$$



Şekil 2.18. Homojen olmayan geometriye sahip bir cisim

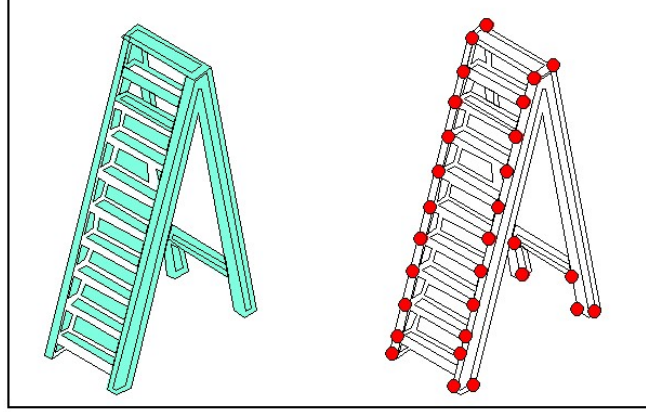
2.4.2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) (Finite Element Method, FEM)

Sonlu elemanlar yöntemi yapısal analiz, akışkanlar mekaniği, ısı- kütle aktarımı ve elektromanyetik, vb. gibi problemlerin çözümlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin matematiksel olarak ilk 1943 yılında ortaya çıkmasına rağmen elektromanyetik saçılma problemlerinde uygulanması 1960'lı yılların sonuna doğru olmuştur (Angun, 2017; Güngör, 2012). Bu yöntemde eleman türünün belirlenerek, belirlenen elemanın türüne göre ilgili bölge problem geometrisi sonlu elemanlara bölünerek ayrıştırılır. Ayrıştırma işlemi genellikle şekil 2.19'daki gibi üçgensel elemanlara bölünerek gerçekleştirilir. Böylece, ayrıştırılan bölgeler üzerinde yapılan sade yaklaşımlar elde edilir.



Şekil 2.19. Geometrinin üçgensel elemanlara ayrıştırması (Karaca, 2013)

Ayrıştırılan elemanlar “düğüm” adı verilen noktalarda 1,2 ve 3 boyutlu şekiller olarak tekrar bir araya getirilir. Burada oluşan şekillere “eleman” adı verilir. Şekil 2.20’de kırmızı noktalar ile gösterilen kısımlar ayrıştırma noktaları olarak adlandırılır. Bu noktalar, seçimin düğüm noktaları üzerinde olmayıp, elemanın belirli noktalarında seçilmesiyle oluşur (Selvitopi, 2016).



Şekil 2.20. 1D elemanlardan oluşmuş sonlu elemanlar modelinin gösterimi (Kırmızı noktalar “düğüm noktalarını”, sarı çizgiler “elemanları” ifade eder) (Selvitopi, 2016)

Oluşturulan elemanlardan doğrusal bir matris elde edilir. Elektromanyetik enerjinin minimum olduğu çözümü elde etmek için matris, kısmi diferansiyel denklemlerden oluşan sınır değer problemleri yardımıyla düğüm noktalarındaki elektrik veya manyetik alan ifadelerini bulunur. Bu ifadeleri elde ederken oluşturulan kısmi diferansiyel denklemleri için bilgisayar programları kullanılmaktadır (Kaplan, 2013; Selvitopi, 2016).

2.4.3 Floquet Model Fonksiyonu

FSY tasarımında, yamalar dielektrik tabaka üzerine periyodik olarak yerleştirildi için elektrik ve manyetik alanların hesaplanması için Floquet modları kullanılır. Floquet modları yardımıyla Maxwell denklemleri çözümlenmek için periyodik yapıların sonsuz olarak kabul edilmesi gerekmektedir. FSY tasarımda kullanılan periyodik yapılar sonsuz olarak kabul edilerek, Floquet modları yardımıyla Maxwell denklemleri çözümlenmektedir.

Periyodik yapılar sonsuz olduğunda, ilerleyen dalğanın analizi için Maxwell denklemlerinin çözümlenmesinde ilk öncelik Fourier dönüşümü olacaktır. Fakat Fourier serileri, aynı genlik ve faz periyodikliğe sahiptir. Bu yüzden Maxwell denklemlerini çözümlenmede, periyodik yapı olarak farklı genlik ve faz değerlerine sahip Floquet serilerini kullanmak daha avantajlıdır. (Bhattacharyya, 2006; Habergötüren Ateş, 2018).

Floquet teoreminde dielektrik tabaka üzerine x-y yönlerinde periyodik olarak yerleştirilen yapılardaki her bir elemanın, düzlemsel dalga yayılım katsayıları aynıdır. (Ekici ve Yazgan, 2008). Yansıma katsayısı, floquet bağlantı noktalarını, z ekseninde hem maksimum (Z_{max}) hem de minimum (Z_{min}) değerlerinin tanımlanmasıyla elde edilir. Bu sayede düzlemsel dalga modeline ulaşılır (Yiğit ve Duysak, 2019).

2.4.3.1 Floquet Serisi

Farklı genlik ve faz değerlerine sahip periyodik yapılar, $h(x)$ fonksiyonu ile ifade edilebilir.

$$h(x) = \sum_n^{\infty} = -\infty f(x - na) \exp(-jn\vartheta) \quad (2.36)$$

Burada $f(x)$, x gerçel değişkeninin kompleks bir fonksiyonudur ve φ gerçel bir sabittir.

Floquet model analizini yaparken ilk önce Fourier dönüşümü yaparak, Fourier serileri incelenmektedir. Dolayısıyla $h(x)$ fonksiyonu üzerinde Fourier dönüşümü yaparak (2.37) no'lu denklem elde edilir.

$$\tilde{h}(k_x) = \frac{1}{2\pi} \sum_n^{\infty} \exp(-jn\vartheta) \int_{-\infty}^{\infty} f(x - na) \exp(jk_x x) dx \quad (2.37)$$

(2.37) no'lu denklemi $x' = x - na$ eşitliğine göre düzenlenerek, (2.38) no'lu dirac delta fonksiyonu yerine yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sum_n^{\infty} = -\infty \exp(jnk_x \alpha) = \frac{2\pi}{\alpha} \sum_n^{\infty} = -\infty \delta\left(k_x - \frac{2n\pi}{\alpha}\right) \quad (2.38)$$

$$\tilde{h}(x) = \frac{2\pi}{\alpha} \tilde{f}(k_x) \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(k_x - \frac{2n\pi}{\alpha} - \frac{\vartheta}{\alpha}) \quad (2.39)$$

Elde edilen (2.39) no'lu denklem Fourier dönüşümünü ifade etmektedir. Bu denklemde $\varphi = 0$ olduğu durumda ise Fourier serisi elde edilmektedir (Ekici ve Yazgan, 2008).

2.4.3.2 Vektör Floquet Harmonikleri

(z) yönünde ve iki polarizasyonda (TE, TM) hareket eden, elektrik ve manyetik alanların, Floquet harmonikleri açısından gösterimi, (2.40) ve (2.41) no.lu eşitliklerle ifade edilir. (Mittra ve diğ., 1988).

$$\vec{E}(x, y, z) = \sum_{pmn} a_{pmn}^{\pm} [e_{tpmn}(x, y) + ze_{zpmn}(x, y)] e^{\pm jk_{zmn}z} \quad (2.40)$$

$$\vec{H}(x, y, z) = \sum_{pmn} a_{pmn}^{\pm} [h_{tpmn}(x, y) + zh_{zpmn}(x, y)] e^{\pm jk_{zmn}z} \quad (2.41)$$

Burada k_{zmn} dalga sayısı, k ise ortamın yayılma sabitidir. FSY tasarımında, dielektrik tabakanın birim hücre boyutları için Floquet harmoniklerinin enine bileşenini, aşağıdaki eşitlikle bulunur (Mittra ve diğ., 1988).

$$\Psi_{mn}(x, y) = \frac{1}{(t_x t_y)^{1/2}} e^{j(k_{xm}x + k_{yn}y)} \quad (2.42)$$

FSY tasarımındaki x ve y boyunca birim hücre boyutları t_x ve t_y şeklinde ifade edilmiştir. (2.42) no.lu eşitlik TE ve TM polarizasyonları açısından düzenlenirse;

$$\vec{e}_{tTE,mn}(x, y) = -\nabla \cdot z \Psi_{mn}(x, y) \quad (2.43)$$

$$\vec{h}_{tTM,mn}(x, y) = -\nabla \cdot z \Psi_{mn}(x, y) \quad (2.44)$$

(2.43) ve (2.44) no.lu vektör harmonikleri eşitliklerine ulaşılır (Mittra R. ve diğ., 1988). (+n) yönünde yayılan elektrik ve manyetik alan vektörlerinde düzlem-dalga ilişkisini kurarak daha basite indirgenerek, (2.45) ve (2.46) no.lu eşitlikler elde edilir (Mittra ve diğ., 1988).

$$n \times \vec{e}_{tTE,mn} = \pm \eta_{TE,mn} \vec{h}_{tTE,mn}; \quad \eta_{TE,mn} = \frac{\omega \mu}{k_{zmn}} \quad (2.45)$$

$$\vec{h}_{tTM,mn} \times n = \pm \frac{1}{\eta_{TM,mn}} \vec{e}_{tTM,mn}; \quad \eta_{TM,mn} = \frac{k_{zmn}}{\omega \varepsilon} \quad (2.46)$$

Burada η harmonik empedanstır. Düzlem-dalga ilişkisi aynı şekilde z bileşeni için (2.47) ve (2.48) no'lu denklemler ile elde edilir.

$$\vec{h}_{zTE,mn}(x, y) = \frac{1}{j\omega\mu} (k^2 - k_{zmn}^2) \Psi_{mn}(x, y) \quad (2.47)$$

$$\vec{e}_{zTM,mn}(x, y) = \frac{1}{j\omega\varepsilon} (k^2 - k_{zmn}^2) \Psi_{mn}(x, y) \quad (2.48)$$

Snell yasası ile yayılma vektörü bileşenleri aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$k_{zmn} = (k^2 - k_{x_m}^2 - k_{y_n}^2)^{1/2} \quad (2.49a)$$

$$k_{x_m} = \frac{2\pi}{t_x} m + k \sin\theta^i \cos\varphi^i \quad (2.49b)$$

$$k_{y_n} = \frac{2\pi}{t_y} n + k \sin\theta^i \cos\varphi^i \quad (2.49c)$$

Vektör harmonik ilişkileri ise denklem (2.5) ve (2.51)'deki gibi gösterilmektedir.

TE harmonikleri;

$m, n = m', n'$ ise

$$\int \vec{e}_t \times \vec{h}_t^* \cdot (n) ds = \frac{1}{n^*} \int e_t \times (n x \vec{e}_t^*) nds = \frac{1}{n^*} \int \vec{e}_t \vec{e}_t^* ds = \frac{1}{n_{TE,mn}^*} \|\vec{e}_{tTE,mn}\|^2 \quad (2.50)$$

$$m, n \neq m', n' \text{ ise } 0 \quad (2.50a)$$

TM harmonikleri;

$m, n = m', n'$ ise

$$\int \overrightarrow{e_{tTM,mn}} \cdot \overrightarrow{h_{tTM,mn}^*} (n) ds = n_{TM,mn} \|\overrightarrow{h_{tTM,mn}}\|^2 \quad (2.51)$$

$$m, n \neq m', n' \text{ ise } 0 \quad (2.51a)$$

2.4.3.3 Normalized Floquet Gerilim Dalgaları

FSY tasarımında kullanılan dielektrik tabakaların ve periyodik yüzeylerin kaskad bağlantısının hesaplanmasında kullanılır. Floquet harmonikleri cinsinden ifade edilen elektrik ve manyetik alan bileşenleri üzerinde gerekli sınır şartları kullanılarak, kaynak matrisinin bilinmeyen akım yoğunluğu (V) bulunur (Gökçen ve diğ., 2005).

$$V_{TE,mn}^{\pm}(Z) = a_{TE,mn}^{\pm} \frac{1}{(\eta_{TE,mn}^*)^{1/2}} \|e_{tTE,mn}\| e^{\pm jk_{zmn}} \quad (2.52)$$

$$V_{TM,mn}^{\pm}(Z) = a_{TM,mn}^{\pm} (\eta_{TM,mn})^{\frac{1}{2}} \|h_{tTM,mn}\| e^{\pm jk_{zmn}} \quad (2.53)$$

Düzlemdeki saçılma parametrelerini, kaynak (V^S) ve bilinmeyen (V^I) akım cinsinden ifade ederek, (2.54) ve (2.55) no'lu eşitliklere ulaşılır (Mittra ve diğ., 1988).

$$V^S = V^I S \quad (2.54)$$

$$\begin{bmatrix} V^{S_1} \\ V^{S_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V^{I_1} \\ V^{I_2} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Yüzey simetrik olduğundan saçılma parametrelerinden $S_{21} = S_{12}$ ve $S_{11} = S_{22}$ şeklinde ifade edilir (Mittra ve diğ. 1988). Burada $S_{21} = S_{12}$ parametreleri iletim katsayısını, $S_{11} = S_{22}$ parametreleri ise yansıma katsayısını belirtir.

$$S_{21} = S_{12} = T \quad (2.56)$$

$$S_{11} = S_{22} = R \quad (2.57)$$

İletim (T) ve yansıma (Γ) katsayıları, kaynak ve bilinmeyen akım yoğunluğu cinsinden ifade edilirse aşağıdaki eşiklikler elde edilir (Mittra ve diğ., 1988).

$$T_{(pmn)i}^{(pmn)s}(Z) = \frac{V_{(pmn)s}^{S_2}(Z)}{V_{(pmn)i}^{I_1}(Z)} \quad (2.58)$$

$$\Gamma_{(pmn)i}^{(pmn)s}(Z) = \frac{V_{(pmn)s}^1(Z)}{V_{(pmn)i}^{I_1}(Z)} \quad (2.59)$$

Floquet teoreminde, kaynak tarafından iletilen ileri gücün (P_f), sonlandırmada alınan güce (P_r) oranı (2.60) no'lu eşitlikte belirtilir. (Farooq ve diğ., 2021).

$$SE_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_f}{P_r} \quad (2.60)$$

Denklemin $|S_{21}|$ parametresi açısından daha basit şekilde ifade edilerek, (2.61) no'lu eşitlik elde edilir (Farooq ve diğ., 2021).

$$|SE|_{dB} = -20 \log_{10} |S_{21}| \quad (2.61)$$

2.5 FSY İÇERİKLİ YAPILAR KULLANILARAK RKA 'NIN AZALTILMASI

Radar kesit alanını (RKA) azaltma yöntemlerinden biri de frekans seçici yüzey (FSY) içeren yapıları kullanmaktır. RKA azaltmak için gelen dalgayı farklı yönlere dağıtıp geri yansımaları engellenmelidir (Kim ve diğ., 2008; Choi ve diğ., 2014). Monostatik radarlar, iletim ve alma için aynı anteni kullandıkları için bu yöntem işe yarar, fakat iletim ve alma işlemi için ayrı radarları olan bistatik radarlarda bu yöntem işe yaramamaktadır. Bistatik radarlar, gönderici istasyonu ile aralarında uzaklık ve açı farkı çok olan bir ya da daha fazla alıcı istasyonundan meydana gelir. Dolayısıyla gelen dalganın geri yansımaları engellenmek bistatik, multistatik ve pasif radarlar için çok kullanılmamaktadır (Skolnik ve diğ., 2008). Bu tip çok alıcılı radarlarda gelen dalgayı farklı yönlere dağıtmaktan ziyade yansıtma olmadan enerjisini soğurup, duvarın diğer tarafına iletimi engellenmelidir. Bu yapı katmanlı frekans seçici yüzey yapılarıyla emici yüzey (absorber) tasarımı yaparak gerçekleştirilir. Bu sayede FSY'ler havacılık alanında anten performansını arttırmak ve RKA azaltma yöntemlerinden biri olarak kullanılır (Kushwaha ve diğ., 2014; Cruz ve diğ., 2010). Radar kesit alanını geniş bir frekans aralığında kontrol etmek zor olduğundan kaplama yapmak yerine FSY içeren bir yapı kullanmanın pek çok avantaj sağladığı görülmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Dielektrik tabaka özellikleri, FSY'nin açılmal etkilerini ve rezonans frekansını değiştirir (Sung ve Neve, 2006; Callaghan ve diğ., 1991). Tabaka malzemesinin, düşük dielektrik sabitine sahip olması, yüksek verim ve bant genişliği sağladığı için genellikle dielektrik sabiti $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığında olan malzemeler seğilmektedir (Balanis, 2005; Pozar, 1992). Çalışma kapsamında dielektrik taban malzemesi olarak, Erdemir ve Yılmaz (2014) çalışmasında ifade ettiği gibi yüksek verim sağlanması ve düşük dielektrik sabiti değerine sahip olmasından dolayı Rogers RT5885 ($\epsilon_r=2,2$, $\tan\delta=0,0009$) tercih edilmiştir. Çalışmada üç farklı geometrik şekle sahip FSY tasarımları gerçekleştirilmiştir. Halka ve kesikli artı şekilli yapılar, ilk olarak tek tek analiz edilmiştir. Analizler sonucu en verimli iki yapı birleştirilerek, -10 dB kazanç değerinde daha yüksek bant genişliği sahip yeni UGB FSY tasarlanmıştır.

3.1 Modellemede Kullanılan Eşitlikler

(2.49) ve (2.50) no.lu eşitliklerde rezonans frekansının (f_r), dielektrik sabiti (ϵ_r) değerine göre değişim gösterdiği görülmüştür. Bu eşitlikler incelendiğinde elektrik sabiti ile rezonans frekansına karşılık gelen dalga boyunun (λ_0) ters orantılı olduğu görülmektedir (Nauman ve diğ., 2016).

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (2.49)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.50)$$

İletken yüzey boyutları, seçilen malzemenin elektriksel sabiti ve rezonans frekansı dikkate alınarak hesaplanarak, bir tasarım oluşturulmuştur (Bogaerts ve diğ., 2012; Azemi ve diğ., 2012).

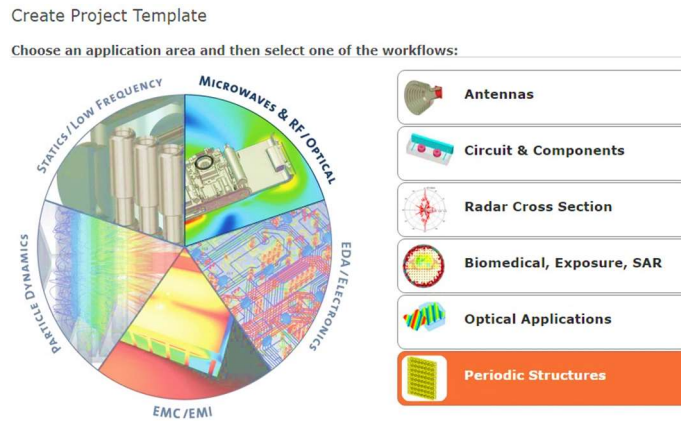
Bant genişliğindeki ($BG = f_{üst} - f_{alt}$) değişim yüzdesinin hesaplanması için eşitlik (2.51) kullanılır (Ozturk ve Coşkun, 2019).

$$BG (\%) = \frac{f_{üst} - f_{alt}}{f_0} \times 100 \quad (2.51)$$

3.2 Birim Hücre Tasarımı

FSY'ler, çalışma frekansı C-bandı (4-8 GHz) ile X-bandını (8-12 GHz) kapsayacak şekilde CST Studio Suite 3D elektromanyetik simülasyon programı kullanılarak tasarlanmıştır. CST mikrodalga stüdyosu (MWS), gerçek ölçüm sonuçlarına ulaşması ve birçok farklı modüllere sahip olmasından dolayı birçok uygulamada kullanılan bir EM simülasyon aracıdır (Yiğit ve Duysak, 2019).

Programda yeni bir FSY tasarımına başlarken NEW PROJECT kısmından sonraki adım çalışma alanını seçmektir. Şekil 3.1'de görülen kısımdan MICROWAVES & RF & OPTICAL bölümüne tıklayarak, sağ tarafta bulunan seçeneklerden PERIODIC STRUCTURES sekmesini seçilmelidir. Bu sekmeden sonra tasarlanan yapının analizinin nasıl yapılacağı, kullanmak istenilen ölçüm değerleri ve çalışılmak istenen frekans aralığı belirlenerek, geometrik tasarıma başlanır.

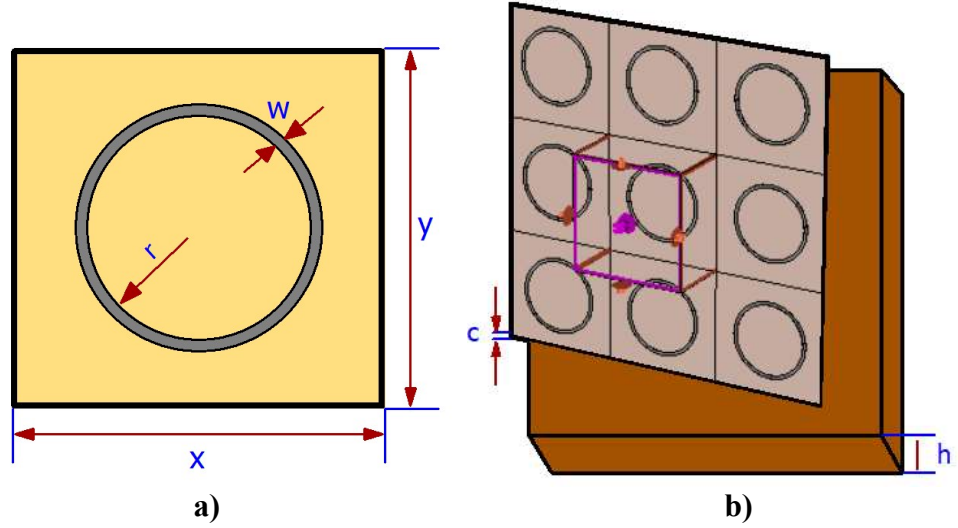


Şekil 3.1. CST Simülasyon programı çalışma alanı sekmesi

4. BULGULAR (BULGULAR ve TARTIŞMA)

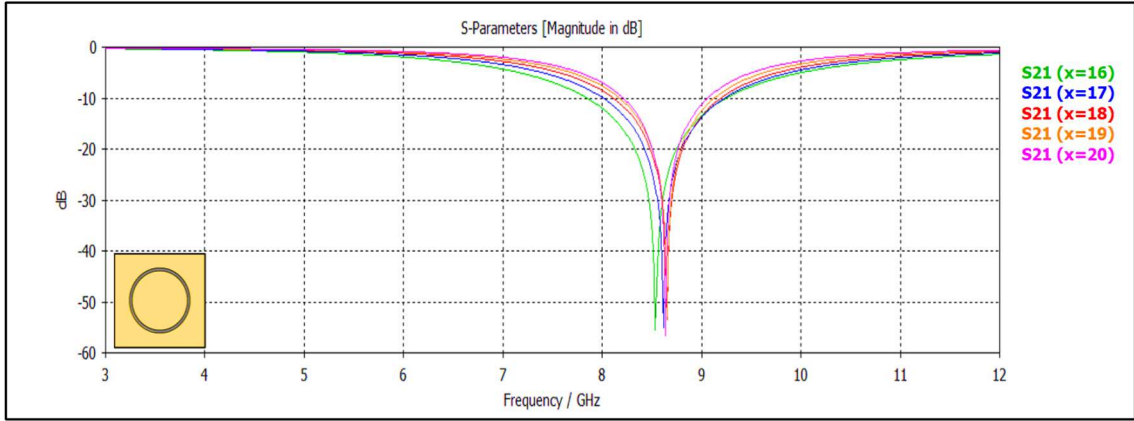
4.1 Halka Geometrik Şekil Kullanarak Tasarlanan FSY'in Analizi

Önerilen yapılar üzerinde temel parametre değerleri değiştirilerek, -10 dB kazanç değerinde maksimum bant genişliğine ulaşmak için CST Suite Studio 3D programı yardımıyla benzetimler gerçekleştirilerek, çıkan grafikler analiz edilmiştir. Halka geometrik şekil kullanılarak ilk yapı oluşturulmuştur. Oluşturulan yapının birim hücresi şekil 4.1a'da verilmiştir. Birim hücrelerin dielektrik tabaka üzerine x-y yönlerinde periyodik olarak yerleştirilmesiyle şekil 4.1b'de elde edilmiştir. Halka geometrik şekilli FSY'nin birim hücre boyutu $x=y=18$ mm, dielektrik katman kalınlığı $h=0.7$ mm, iletken yüzey et kalınlığı $c=0,035$ mm, iletken yüzey yarıçapı $r = 5,95$ ve iletken yüzey genişliği $w = 0,5$ mm'dir.



Şekil 4.1. a) Halka şekilli FSY birim hücre geometrisi b) Halka şekilli FSY dizisi

Belirlenen değerler kullanılarak tasarlanan halka şekilli FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değiştirilmesi sonucu elde edilen frekans tepkileri şekil 4.2 ve çizelge 4.1'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde birim hücre boyutu arttıkça rezonans frekansında artma meydana gelirken, bant genişliğinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Birim hücre boyutundaki 1 mm'lik artış bant genişliğinde yaklaşık olarak 147 MHz'lik bir azalmaya neden olmaktadır.

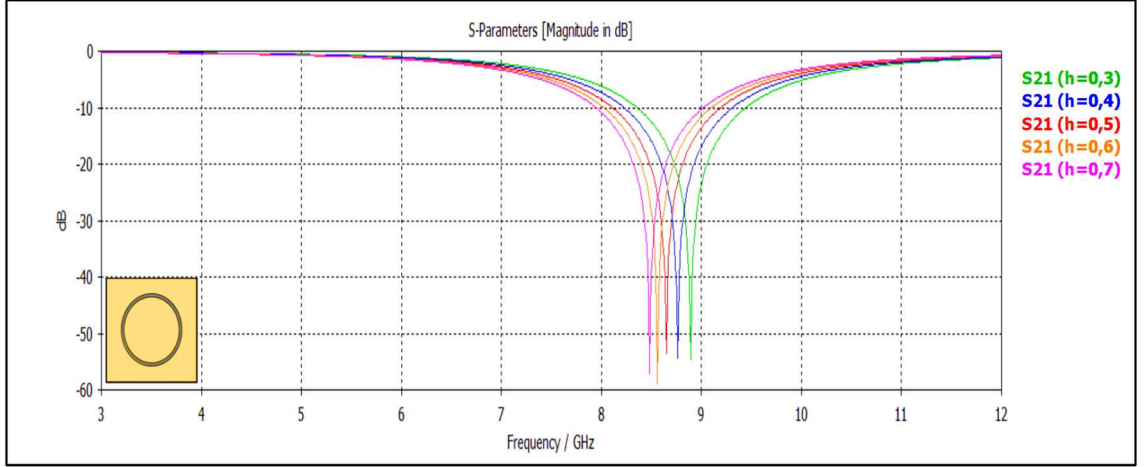


Şekil 4.2. Halka geometrik şekilli FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.1. Halka geometrik şekilli FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

x Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
16	7,8671	9,2369	8,535	1,3698	-55,49
17	8,0142	9,2369	8,616	1,2227	-54,93
18	8,1426	9,1727	8,652	1,0301	-53,3
19	8,1765	9,1162	8,652	0,9397	-52,76
20	8,2265	9,0614	8,654	0,8149	-56,6

Halka geometrik şekilli FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (h) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar şekil 4.3 ve çizelge 4.2'de verilmiştir. Katman kalınlığının artırılması rezonans frekansını negatif yönde etkilerken, bant genişliğini pozitif yönde etkilemektedir. Katman kalınlığındaki 0,1 mm'lik değişim, bant genişliğinde yaklaşık olarak 6,2 MHz'lik bir artış sağlamaktadır.

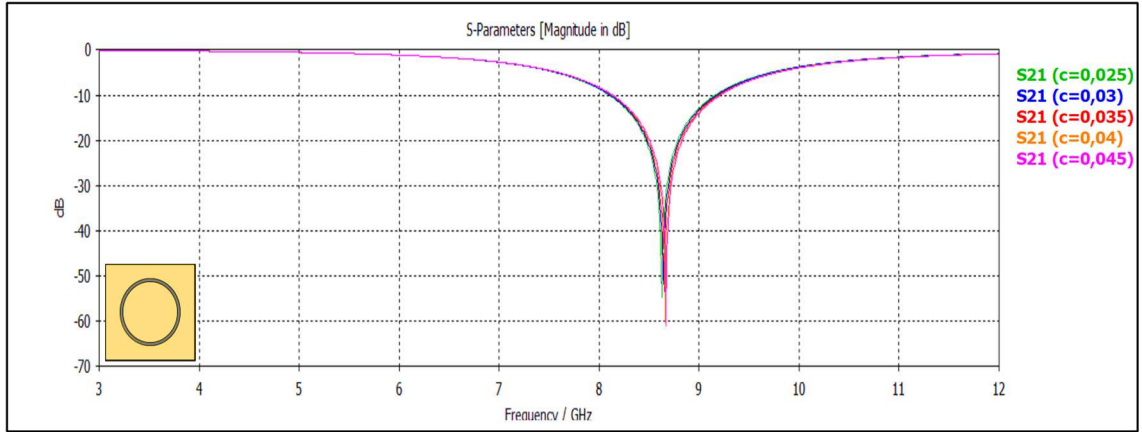


Şekil 4.3. Halka geometrik şekilli FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (h) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.2. Halka geometrik şekilli FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (h) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

h Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,3	8,363	9,4158	8,895	1,0528	-54,45
0,4	8,2392	9,2826	8,76	1,0568	-54,2
0,5	8,1153	9,1783	8,652	1,063	-53,3
0,6	8,0327	9,0968	8,562	1,0631	-58,81
0,7	7,9295	9	8,481	1,0648	-57,08

Şekil 4.4 ve çizelge 4.3'te iletken yüzey et kalınlığının (c) değişmesiyle, s parametrelerinin nasıl etkilendiği gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde iletken yüzey kalınlığının, rezonans frekansı ve bant genişliğiyle doğru orantılı olduğu görülmektedir.

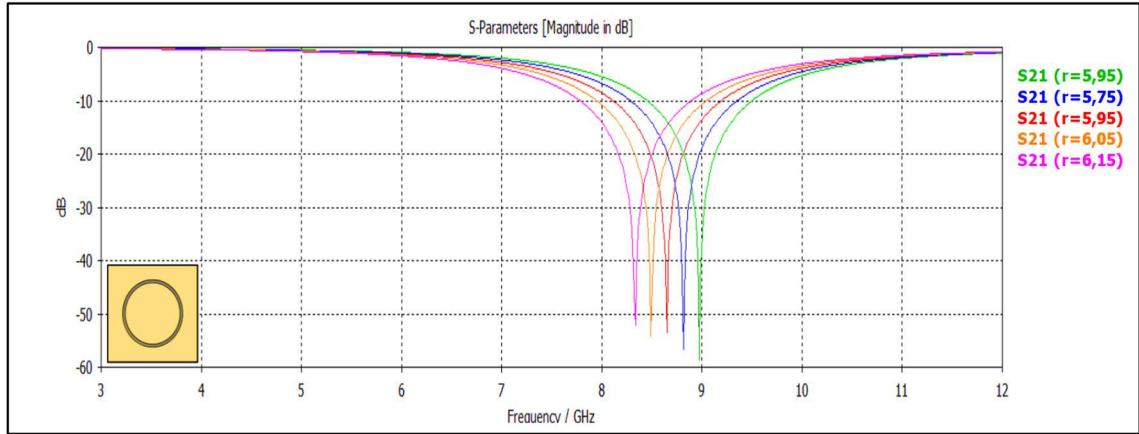


Şekil 4.4. Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey et kalınlığı (c) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.3. Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey et kalınlığı (c) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

c Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,025	8,1024	9,1592	8,625	1,0568	-54,69
0,03	8,1123	9,1714	8,643	1,0591	-51,73
0,035	8,1153	9,1783	8,652	1,063	-53,3
0,04	8,1153	9,2093	8,661	1,09	-60,3
0,045	8,1256	9,2197	8,67	1,0941	-61,01

Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey yarıçapının (r) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri şekil 4.5 ve çizelge 4.4'te verilmiştir. Yarıçap değerinin artması, bant genişliğini olumlu yönde etkilerken rezonans frekansını olumsuz yönde etkilemektedir. Yarıçap değerinin 0,1 mm artması, rezonans frekansında 162 MHz'lik bir sapmaya neden olmaktadır.

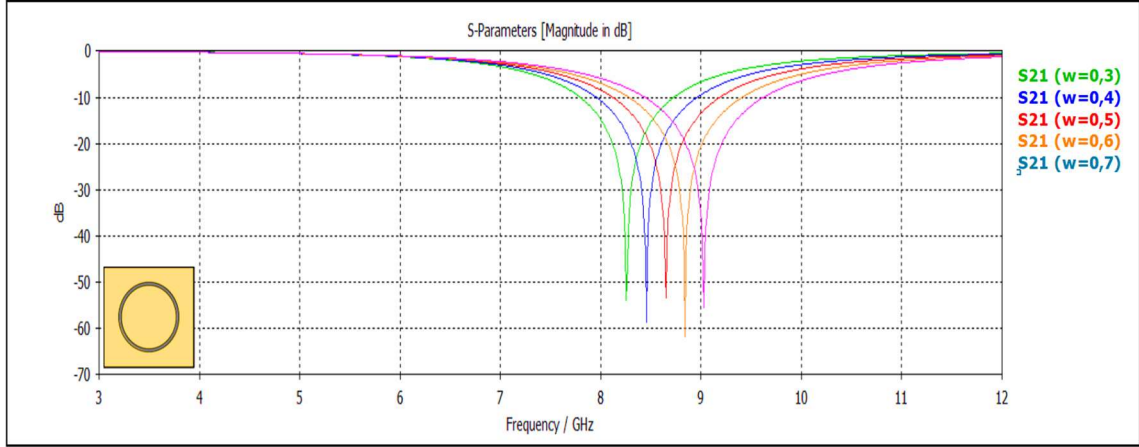


Şekil 4.5. Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey yarıçapının (r) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.4. Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey yarıçapının (r) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

r Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
5,75	8,4631	9,4835	8,976	1,0204	-58,48
5,85	8,2908	9,3332	8,814	1,0424	-56,62
5,95	8,1153	9,1783	8,652	1,063	-53,3
6,05	7,9501	9,0339	8,49	1,0838	-54,16
6,15	7,7952	8,8997	8,337	1,1007	-52,05

FSY'nin iletken yüzey kalınlığının (w) değışmesiyle, s parametrelerinin nasıl etkilendiği Şekil 4.6 ve çizelge 4.5'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde iletken yüzey kalınlığının rezonans frekansı ve bant genişliği ile doğru orantılı olduğu gürülmektedir.

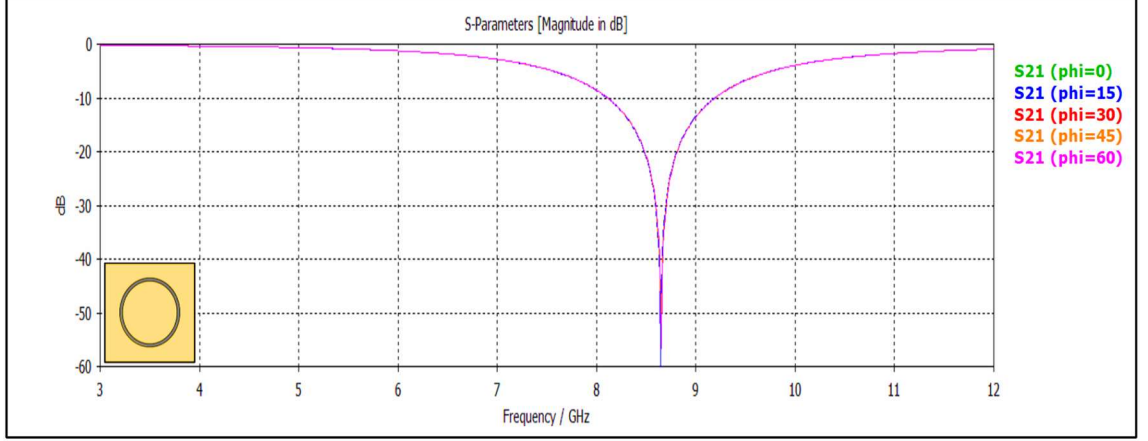


Şekil 4.6. Halka geometrik Şekli FSY'nin iletken yüzey kalınlığının (w) değışmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri

Çizelge 4.5 Halka geometrik Şekli FSY'nin iletken yüzey kalınlığının (w) değışmesi sonucu elde edilen sonuçlar

w Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,3	7,7851	8,733	8,256	0,9479	-53,91
0,4	7,7747	8,7346	8,454	0,9599	-58,71
0,5	8,1426	9,1727	8,652	1,0301	-53,3
0,6	8,2976	9,3955	8,841	1,0979	-61,68
0,7	8,4475	9,6239	9,03	1,1764	-55,37

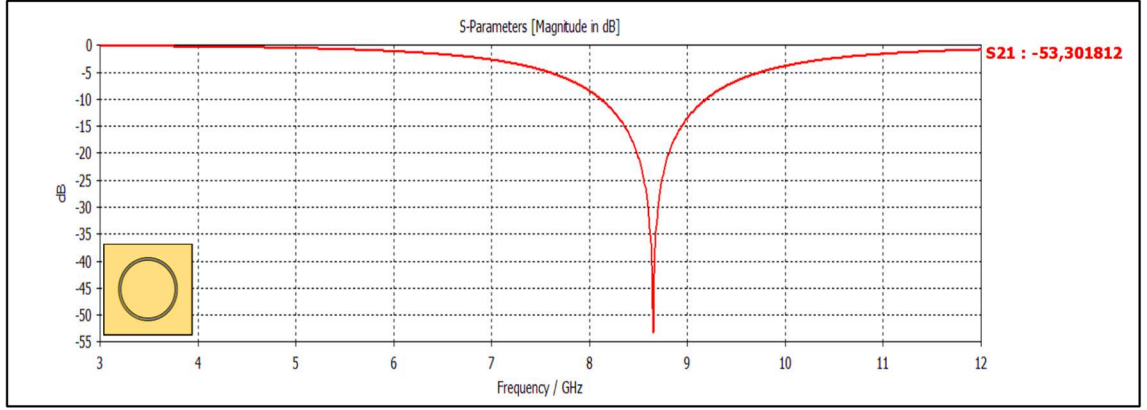
Şekil 4.7 ve çizelge 4.6’da dalga geliş açısı (Θ), 0° ’den 60° ’ye kadar, 15° aralıklarla artırılmıştır. Bu artışın rezonans frekansında ve bant genişliğinde bariz bir değişikliğe yol açmadığı görülmektedir. Dolayısıyla açı ve polarizasyondan bağımsız bir FSY elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Halka geometrik şekilli FSY’nin dalga geliş açısının (ϕ) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri

Çizelge 4.6 Halka geometrik şekilli FSY’nin dalga geliş açısının (ϕ) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

phi Parametre Değeri ($^\circ$)	Alt Kesim Frekans (GHz)	Üst Kesim Frekans (GHz)	Rezonans Frekans (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0	8,1426	9,1727	8,652	1,0301	-53,3
15	8,1102	9,1717	8,643	1,0615	-53
30	8,1103	9,1717	8,643	1,0614	-59,97
45	8,1204	9,1717	8,652	1,0613	-51,1
60	8,1102	9,1717	8,652	1,0615	-56,52

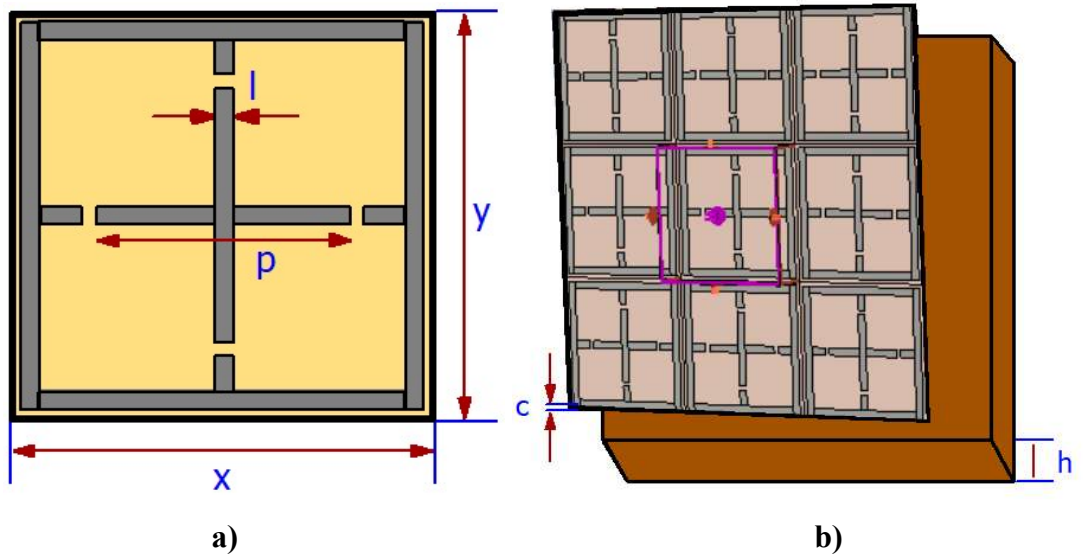


Şekil 4.8. Halka geometrik şekilli FSY ‘nin iletim karakteristiktği

Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda halka geometrik şekil kullanarak tasarlanan en verimli yapının sonuçları şekil 4.8’de verilmiştir. FSY’nin bant genişliği 1,13 GHz, maksimum yansıtma frekansı 8,65 GHz ve maksimum soğurma değeri - 52.30 dB olarak elde edilmiştir. Tasarlanan FSY’nin dalga geliş açısından bağımsız ve bant durduran filtre karakteristiği göstermektedir.

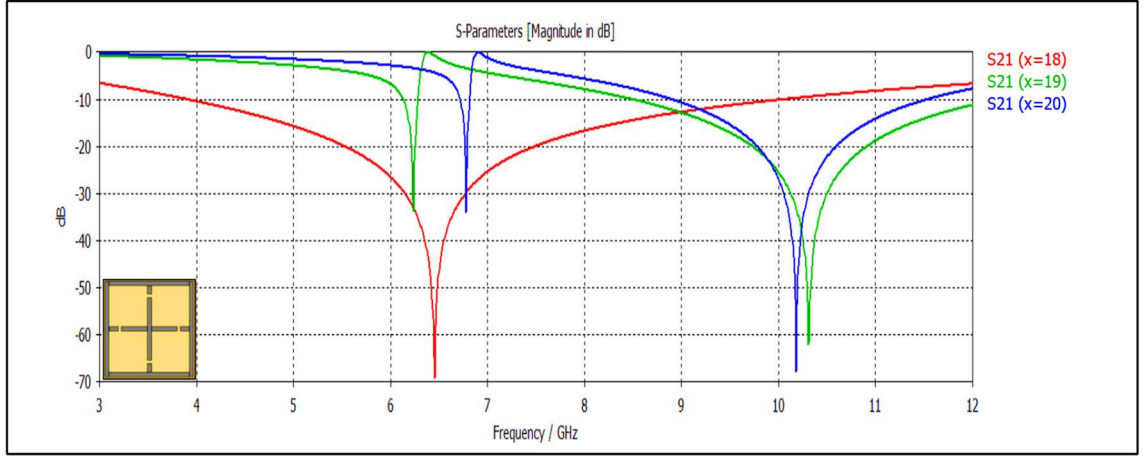
4.2 Kesikli Artı Geometrik Şekil Kullanarak Tasarlanan FSY'in Analizi

İkinci FSY tasarımında, kesikli artı geometrik şekli kullanılmıştır. Tasarlanan FSY'nin birim hücresi geometrisi şekil 4.9a'da verilmiştir. Birim hücrelerin dielektrik tabaka üzerine x-y yönlerinde periyodik olarak yerleştirilmesiyle elde edilen şekil 4.9b'de verilmiştir. Kesikli artı şekilli FSY'nin birim hücre boyutu $x=y=18$ mm, dielektrik katman kalınlığı $h=0.7$ mm, iletken yüzey et kalınlığı $c=0,035$ mm, iletken yüzey uzunluğu $p = 1,5$ mm ve iletken yüzey genişliği $l = 1,5$ mm'dir.



Şekil 4.9. a) Kesikli artı şekilli FSY birim hücre geometrisi **b)** Kesikli artı şekilli FSY dizisi

Tasarlanan kesikli artı şekilli FSY'nin birim hücrenin boyutunun (x) değiştirilmesi sonucu elde edilen frekans tepkileri şekil 4.10 ve çizelge 4.7'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde birim hücre boyutu arttıkça bant genişliğinde azalma meydana gelmektedir. Kalkanlama etkinliğini bakımından incelendiğinde en iyi zayıflama düzeyi, rezonans frekansı 6,456 GHz olduğunda elde edilmektedir.

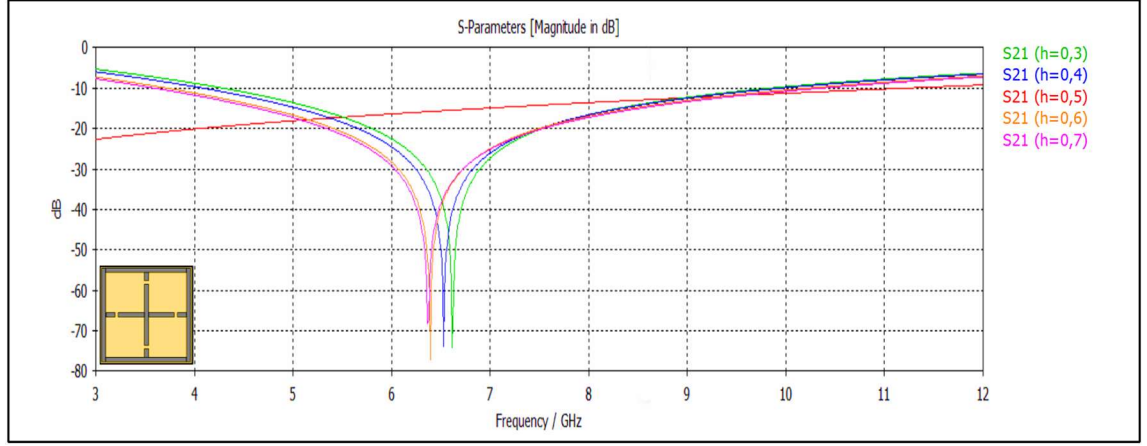


Şekil 4.10. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri

Çizelge 4.7. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

x Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
18	4	10	6,456	6	-69,03
19	8,508	12,2377	10,308	3,7397	-62,01
20	8,8688	11,518	10,182	2,6492	-67,8

Kesikli artı şekilli FSY üzerinde incelenen ikinci parametre ise dielektrik tabaka kalınlığıdır (h). Bu inceleme sonucunda elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri şekil 4.11 ve çizelge 4.8'de verilmiştir. Sonuçlara göre dielektrik tabaka kalınlığındaki artış, bant genişliğini olumlu yönde etkilerken rezonans frekansını olumsuz yönde etkilemektedir. Dielektrik katman kalınlığındaki 0.1 mm'lik artış, bant genişliğinde yaklaşık olarak 284 MHz' lik bir artışa neden olmaktadır.

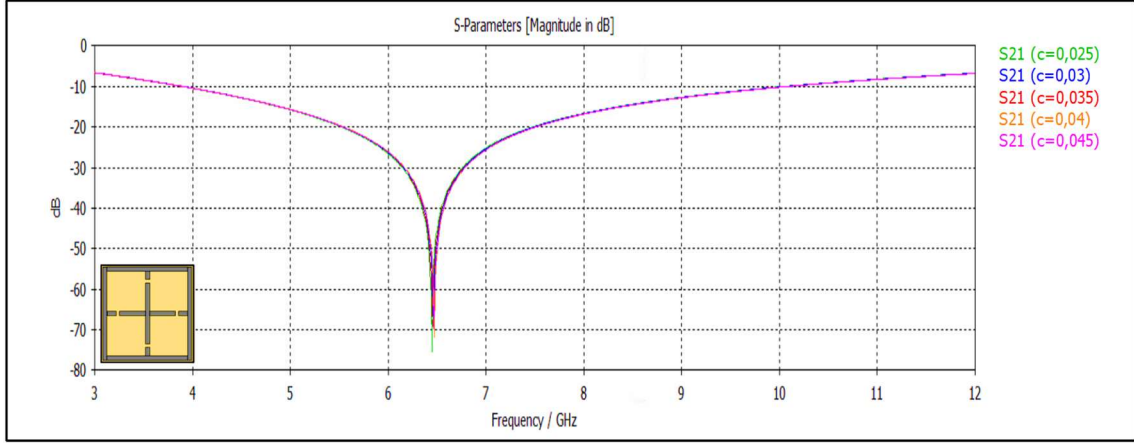


Şekil 4.11. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (h) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.8. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (h) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

h Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,3	4,3179	9,7521	6,618	5,4342	-74,04
0,4	4,1014	9,8204	6,528	5,719	-74
0,5	3,9497	10	6,456	6,05	-69,03
0,6	3,75	10,175	6,393	6,425	-77,30
0,7	3,6546	10,217	6,366	6,5624	-68,08

Şekil 4.12 ve çizelge 4.9’da iletken yüzey et kalınlığının (c) değişmesiyle, s parametrelerinin nasıl etkilendiği gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde iletken yüzey kalınlığının, bant genişliğiyle doğru orantılı olduğu görülmektedir.

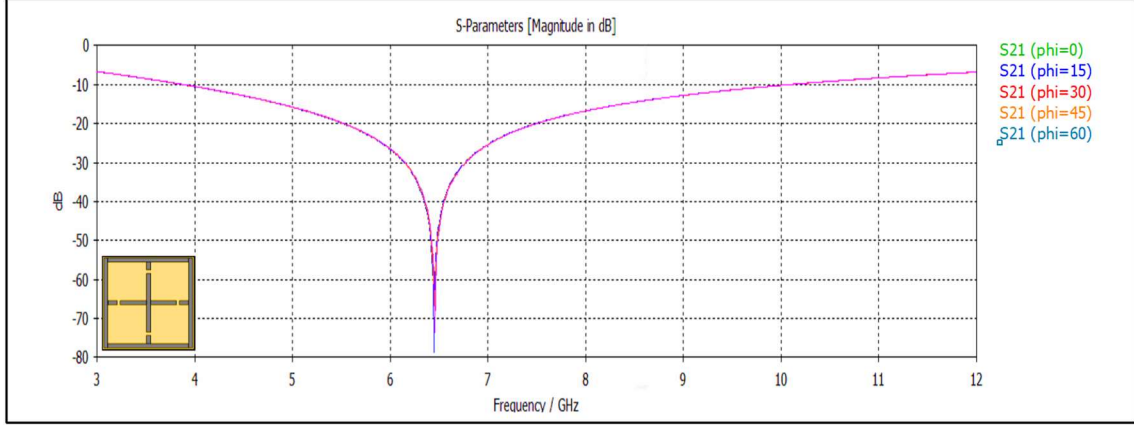


Şekil 4.12. Kesikli artı geometrik şekilli FSY’nin iletken yüzey et yüksekliğinin (c) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.9. Kesikli artı geometrik şekilli FSY’nin iletken yüzey et yüksekliğinin (c) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

c Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekans (GHz)	Üst Kesim Frekans (GHz)	Rezonans Frekans (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,025	4	9,9043	6,447	6,0485	-75,43
0,3	3,9499	10	6,465	5,0501	-66,66
0,35	3,9497	10	6,456	6,0503	-69,03
0,04	3,9453	10	6,474	6,0547	-71,78
0,045	3,9447	10	6,465	6,0553	-69,64

Şekil 4.13 ve çizelge 4.10’da dalga geliş açısı (Θ), 0° ’den 60° ’ye kadar, 15° aralıklarla arttırılmıştır. Bu artışın rezonans frekansında ve bant genişliğinde bariz bir değişikliğe yol açmadığı görülmektedir. Dolayısıyla açı ve polarizasyondan bağımsız bir FSY elde edilmiştir.

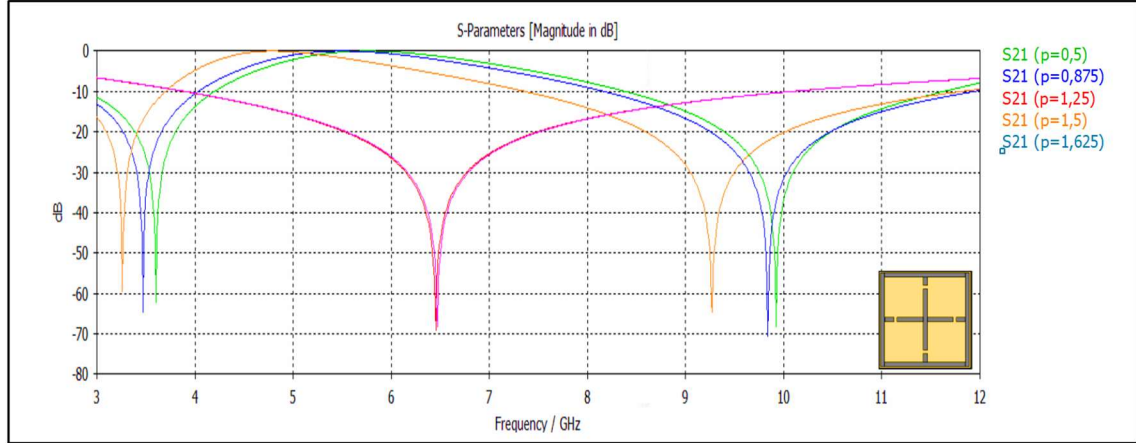


Şekil 4.13. Kesikli artı geometrik şekilli FSY’nin dalga geliş açısının (ϕ) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.10. Kesikli artı geometrik şekilli FSY’nin dalga geliş açısının (ϕ) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

phi Parametre Değeri ($^\circ$)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0	3,9497	10	6,456	6,0503	-69,03
15	4	10	6,456	6	-67,91
30	4	10	6,456	6	-68,19
45	3,8993	10	6,447	6,1007	-78,67
60	3,8995	10	6,456	6,1005	-73,71

Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey uzunluğunun (p) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri şekil 14 ve çizelge 4.11'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde iletken yüzey kalınlığındaki artışın, rezonans frekansını olumsuz yönde etkilerken bant genişliğini olumlu yönde etkilediği görülmektedir.

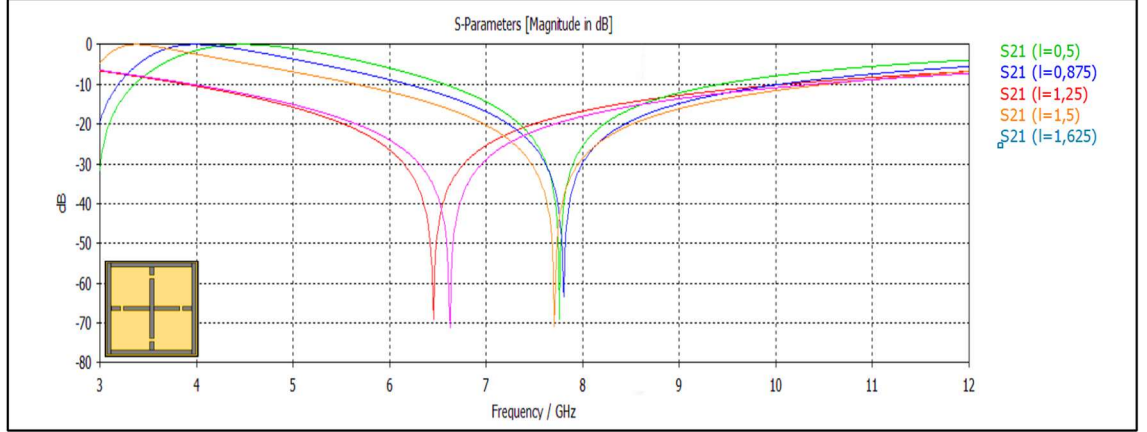


Şekil 4.14. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey uzunluğunun (p) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.11. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey uzunluğunun (p) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

p Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekans (GHz)	Üst Kesim Frekans (GHz)	Rezonans Frekans (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,5	8,44	11,573	9,921	3,133	-68,22
0,875	8,2005	11,887	9,84	3,6865	-70,59
1,25	7,4085	11,7336	9,273	4,3251	-64,47
1,5	3,9497	10	6,456	6,0503	-69,03
1,625	3,9378	9,9924	6,474	6,0546	-68,24

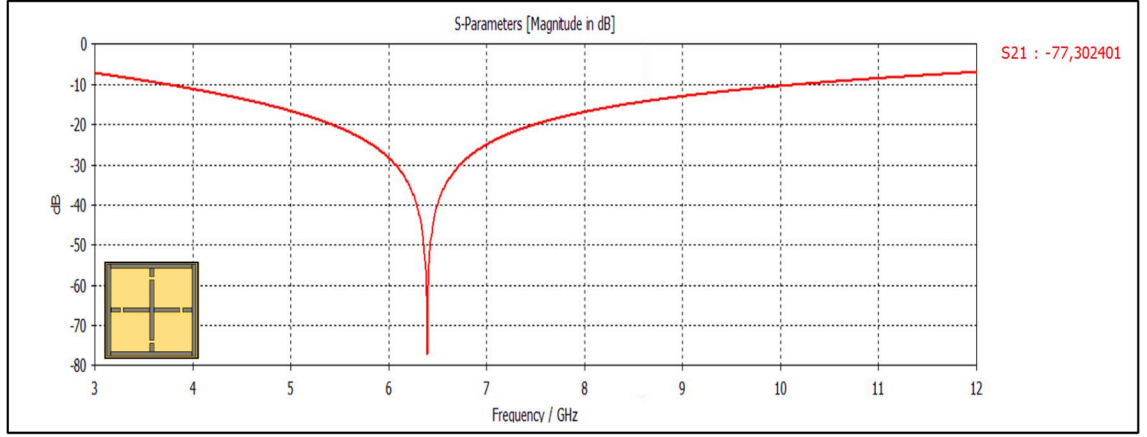
Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey genişliğinin (l) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri şekil 4.15 ve çizelge 4.12'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde iletken yüzey kalınlığındaki artışın, bant genişliğini olumlu yönde etkilediği görülmektedir.



Şekil 4.15. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey genişliğinin (l) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.12. Kesikli artı geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey genişliğinin (l) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

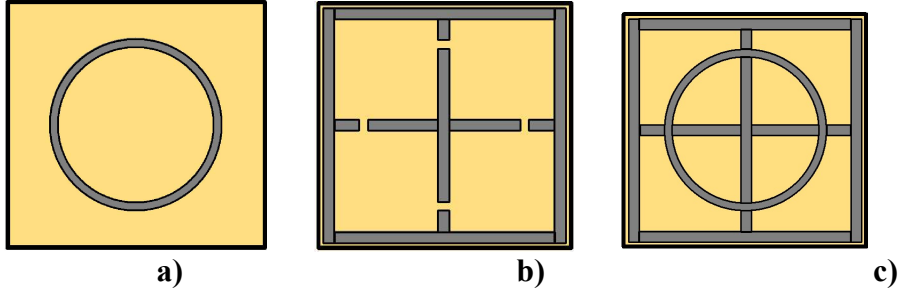
l Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,5	6,5738	9,3439	7,761	2,7701	-63,13
0,875	6,2137	10	7,806	3,7863	-63,4
1,25	5,6212	10,494	7,707	4,8728	-70,82
1,5	3,9497	10	6,456	6,0503	-69,03
1,625	4	10,342	6,627	6,342	-71,15



Şekil 4.16. Kesikli artı geometrik şekilli FSY ‘nin iletim karakteristiği

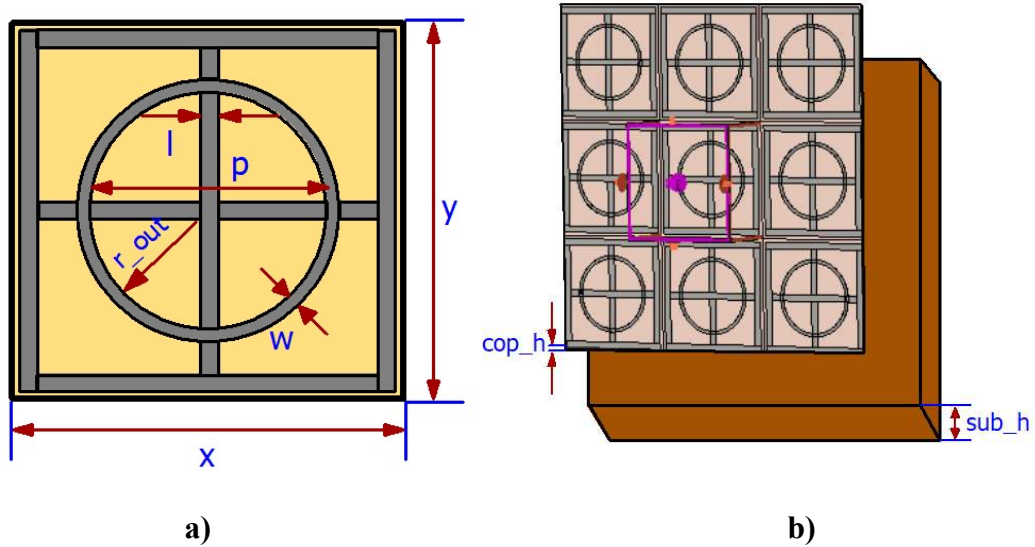
Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda kesikli artı geometrik şekil kullanarak tasarlanan en verimli yapının sonuçları şekil 4.16’da verilmiştir. Tasarlanan FSY’nin bant genişliği 6,25 GHz, maksimum yansıtma frekansı 6,393 GHz ve maksimum soğurma değeri - 77,30 dB olarak elde edilmiştir. Tasarlanan yapı dalga geliş açısından bağımsız ve bant durduran filtre karakteristiği göstermektedir.

4.3 İki Geometrik Şeklin Birleşİ İle Oluşturulan Yeni FSY'nin Analizi



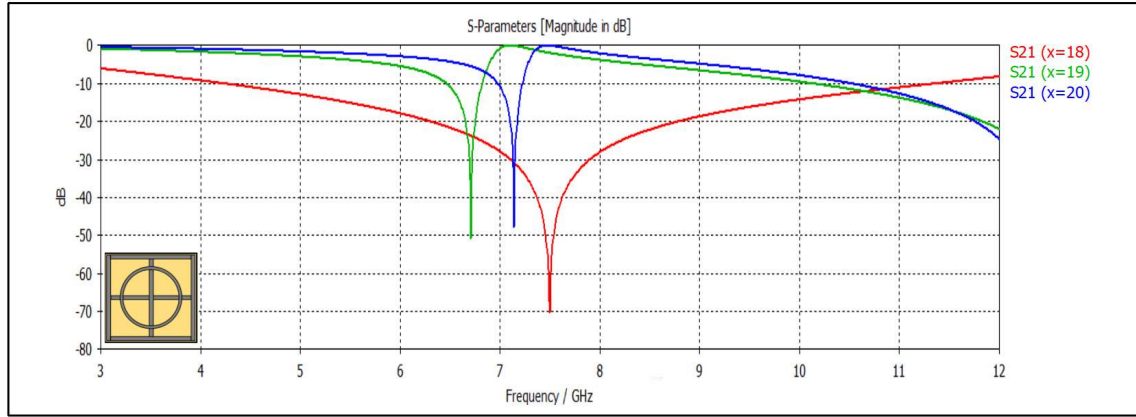
Şekil 4.17. a) Halka şekilli FSY b) Kesikli artı şekilli FSY c) Önerilen UGB FSY

Tek tek analiz edilen halka (şekil 4.17a) ve kesikli artı (şekil 4.17b) şekilli FSY'ler, bu kısımda -10 dB kazanç değerinde daha geniş bant genişliği elde etmek için şekil 4.17c'de gösterildiği gibi üst üste yerleştirilerek, birleştirilmiştir. Önerilen yeni yapının birim hücresi şekil 4.18a'da verilmiştir. Birim hücrelerin dielektrik tabaka üzerine x-y yönlerinde periyodik olarak yerleştirilmesiyle şekil 4.18b'de elde edilmiştir. Önerilen yeni UGB FSY'nin birim hücre boyutu $x=y=18$ mm, dielektrik katman kalınlığı $h=0.7$ mm, iletken yüzey et kalınlığı $c=0,035$ mm, iletken yüzey yarıçapı $r_{out} = 5,95$, iletken yüzey genişliği $w = 0,5$, iletken yüzey uzunluğu $p = 1,5$ mm ve iletken yüzey genişliği $l = 1,5$ mm'dir.



Şekil 4.18. a) Önerilen FSY birim hücre geometrisi b) Önerilen FSY dizisi

İki farklı geometrik şeklin birleşiminden oluşan FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değiştirilmesi sonucu elde edilen frekans tepkileri şekil 4.19 ve çizelge 4.13'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde birim hücre boyutu arttıkça, bant genişliğinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Kalkanlama etkinliğini bakımından incelendiğinde en iyi zayıflama düzeyi, rezonans frekansı 7,5 GHz olduğunda elde edilmektedir.

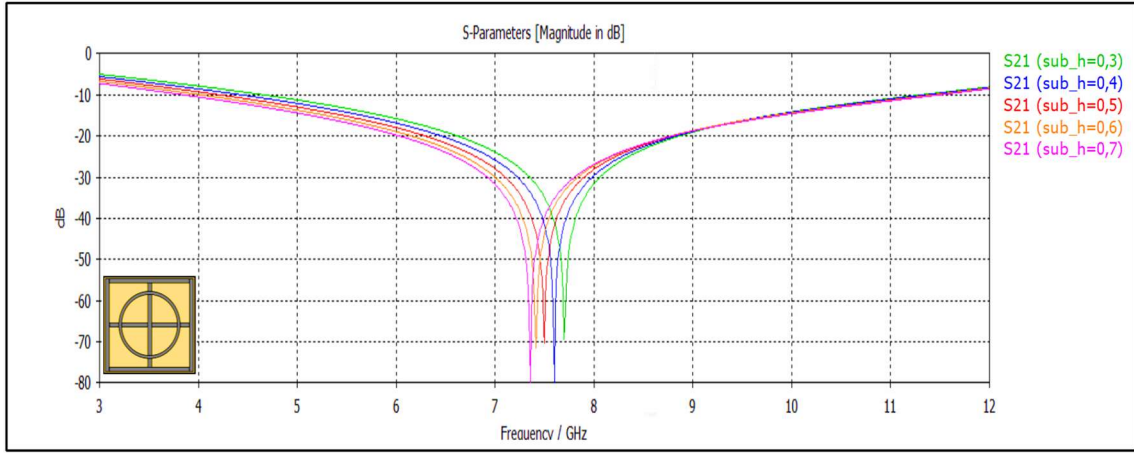


Şekil 4.19. Önerilen UGB FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.13. Önerilen UGB FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

x Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
18	4,0811	11,598	7,5	7,5169	-71,92
19	6,4296	6,8941	6,708	0,4645	-50,69
20	7	7,2498	7,14	0,2498	-47,92

İki farklı geometrik şeklin birleşiminden oluşan FSY üzerinde incelenen ikinci parametre ise dielektrik tabaka kalınlığıdır (sub_h). Bu inceleme sonucunda elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri şekil 4.20 ve çizelge 4.14'te verilmiştir. Değerlere göre dielektrik tabaka kalınlığındaki artış, bant genişliğini olumlu yönde etkilerken rezonans frekansını olumsuz yönde etkilemektedir. Dielektrik katman kalınlığındaki 0.1 mm'lik artış, bant genişliğinde yaklaşık olarak 262 MHz' lik bir artışa neden olmaktadır.

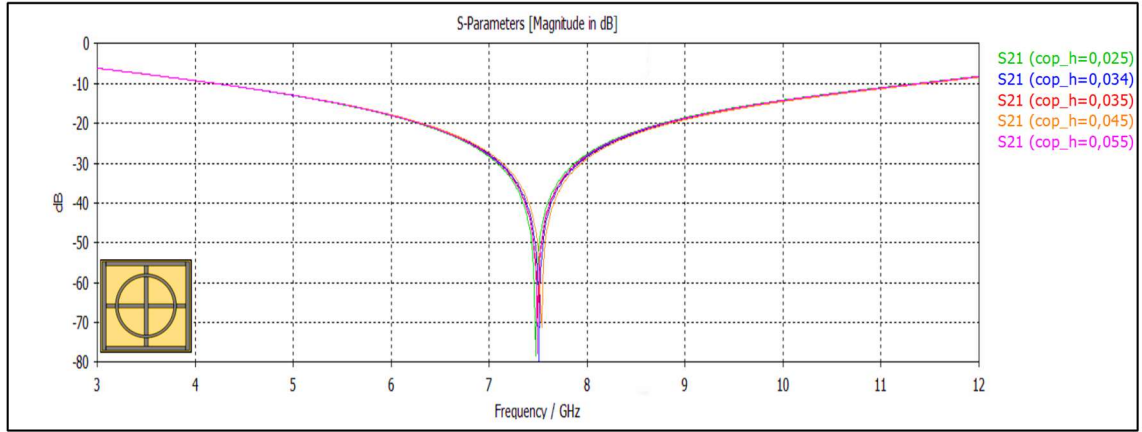


Şekil 4.20. Önerilen UGB FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (sub_h) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri

Çizelge 4.14. Önerilen UGB FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (sub_h) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

sub_h Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,3	4,6966	11,288	7,68	6,5914	-54,3
0,4	4,4509	11,305	7,599	6,8541	-80,03
0,5	4,0811	11,598	7,5	7,2949	-71,92
0,6	4	11,376	7,41	7,3776	-71,38
0,7	3,8698	11,423	7,356	7,5532	-80,16

Şekil 4.21 ve çizelge 4.15'te iletken yüzey et kalınlığının (cop_h) değıştirilmesiyle frekans karakteristiğinin nasıl etkilendiğı gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde iletken yüzey kalınlığı arttıkça, bant genişliğinin azaldığı görülmektedir.

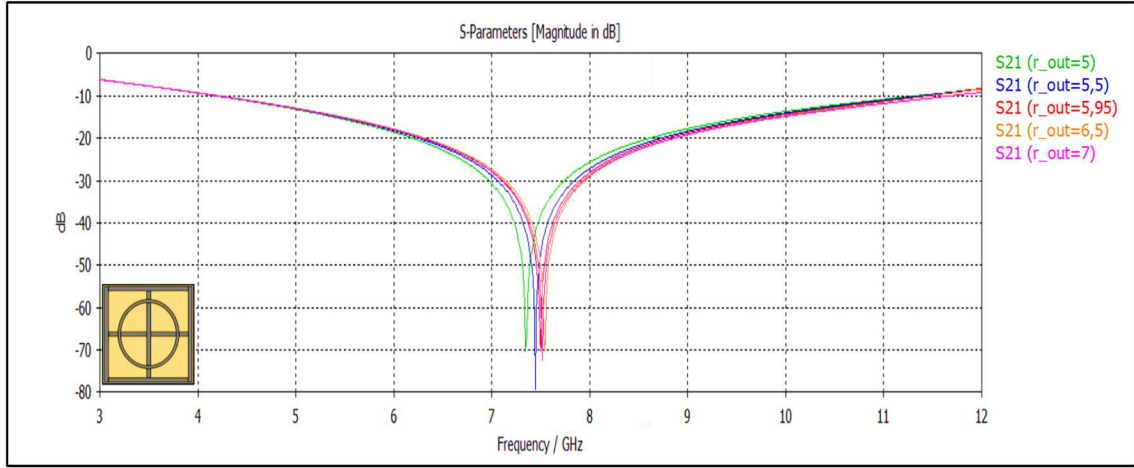


Şekil 4.21. Önerilen UGB FSY'nin iletken yüzey et kalınlığının (cop_h) değışmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri

Çizelge 4.15. Önerilen UGB FSY'nin iletken yüzey et kalınlığının (cop_h) değışmesi sonucu elde edilen sonuçlar

cop_h Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,025	4,2388	11,361	7,473	7,1222	-78,51
0,034	4,181	11,376	7,5	7,195	-71,92
0,035	4,181	11,328	7,5	7,147	-70,2
0,45	4,2506	11,349	7,509	7,0984	-79,62
0,55	4,3876	11,412	7,536	7,0244	-71,11

Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki halka şeklinin yarıçap (r_{out}) değerinin değiştirilmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri şekil 4.22 ve çizelge 4.16'da verilmiştir. Yarıçap değerinin artışı, bant genişliğini olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Yarıçap değerinin 0,1 mm artırılması, rezonans frekansında yaklaşık olarak 201 MHz'lik bir artışa neden olmaktadır.

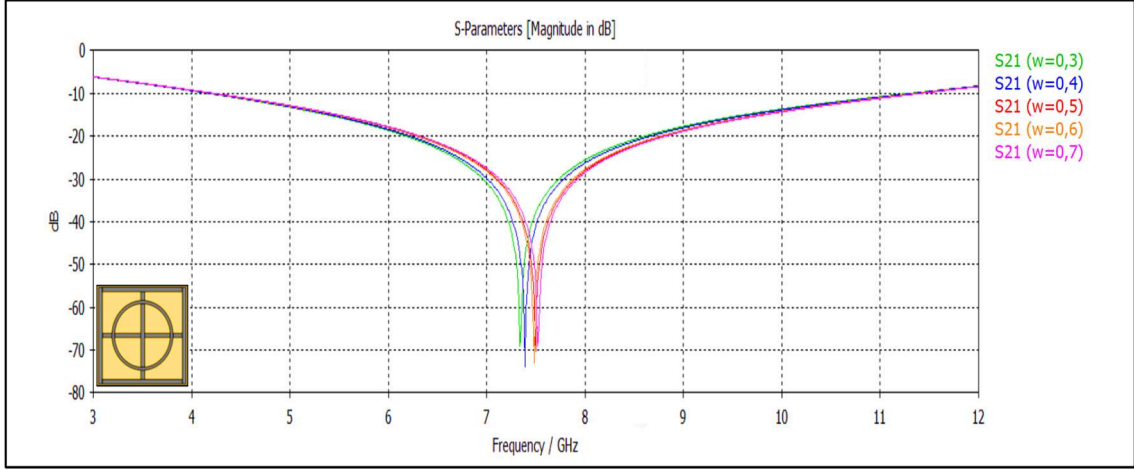


Şekil 4.22. Önerilen UGB oluşan FSY'nin içerisindeki halka şeklinin yarıçap (r_{out}) değerinin değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansıma karakteristikleri

Çizelge 4.16. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki halka şeklinin yarıçap (r_{out}) değerinin sonucu elde edilen sonuçlar

r_{out} Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekans (GHz)	Üst Kesim Frekans (GHz)	Rezonans Frekans (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
5	4,2312	11,227	7,347	6,9958	-70,26
5,5	4,1947	11,392	7,446	7,1973	-79,18
5,95	4,1167	11,345	7,5	7,2283	-71,92
6,5	4,1494	11,388	7,536	7,2386	-70,27
7	4,2168	11,607	7,519	7,3902	-72,49

Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki halka şeklinin kalınlığının (w) değişmesiyle, s parametrelerinin nasıl etkilendiği şekil 4.23 ve çizelge 4.17'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde iletken yüzey kalınlığının rezonans frekansı ve bant genişliği ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

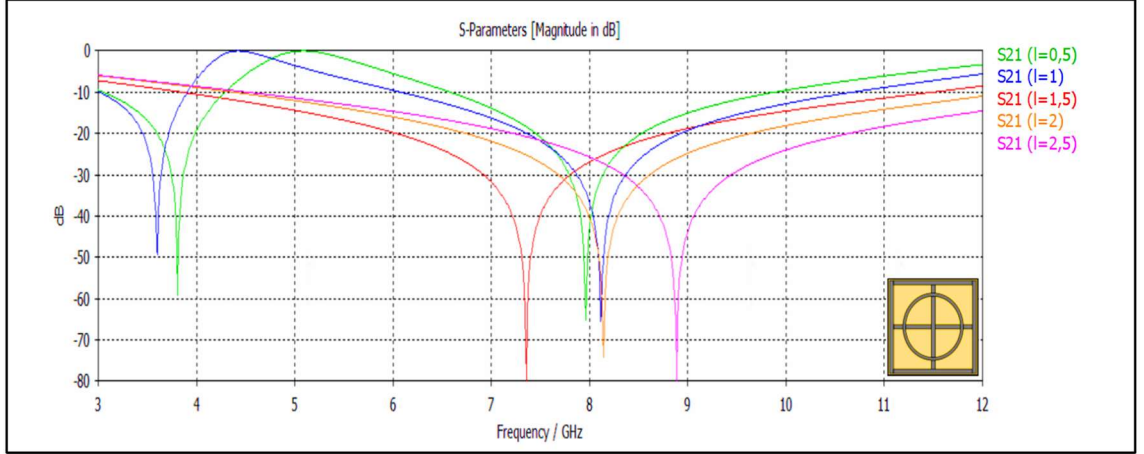


Şekil 4.23. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki halka şeklinin kalınlığının (w) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.17. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki halka şeklinin kalınlığının (w) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

w Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,3	4,2086	11,233	7,338	7,0244	-69,09
0,4	4,2283	11,298	7,392	7,0697	-73,88
0,5	4,2449	11,326	7,5	7,0811	-71,92
0,6	4,2382	11,331	7,482	7,0928	-73,04
0,7	4,2242	11,32	7,519	7,0958	-69,24

Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki artı şeklinin genişliğinin (l) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri şekil 4.24 ve çizelge 4.18'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde iletken yüzey kalınlığındaki artışın, rezonans frekansını ve bant genişliğini olumlu yönde etkilediği görülmektedir.

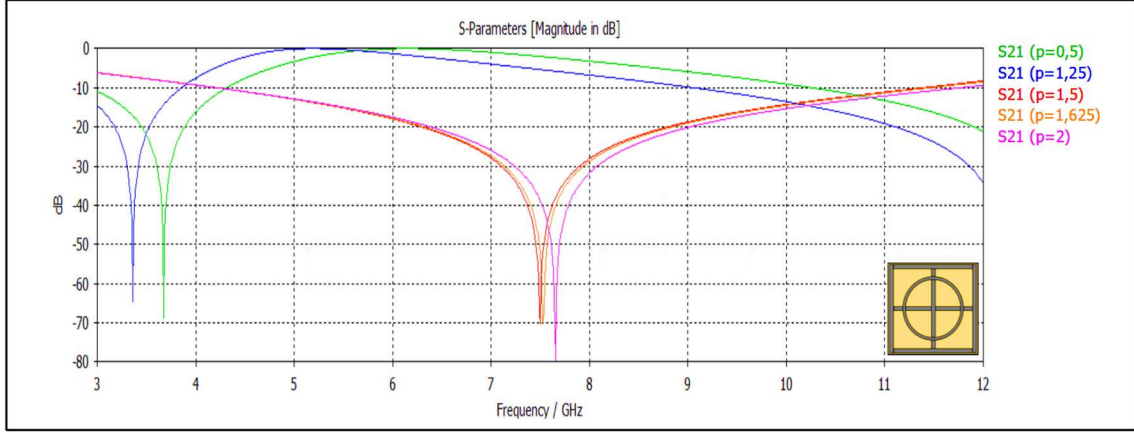


Şekil 4.24. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki artı şeklinin genişliğinin (l) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.18. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki artı şeklinin genişliğinin (l) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

l Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekans (GHz)	Üst Kesim Frekans (GHz)	Rezonans Frekans (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,5	6,5796	9,802	7,956	3,2224	-65,2
1	6,0984	10,648	8,112	4,5496	-65,53
1,5	4,2211	11,356	7,5	7,1349	-71,92
2	4,4233	12,0744	8,198	7,6511	-74,28
2,5	4,6272	12,6674	8,886	8,0402	-81,82

Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki artı şeklinin uzunluğunun (p) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri şekil 25 ve çizelge 4.19'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde iletken yüzey kalınlığındaki artışın, rezonans frekansı ve bant genişliğini olumlu yönde etkilediği görülmektedir.

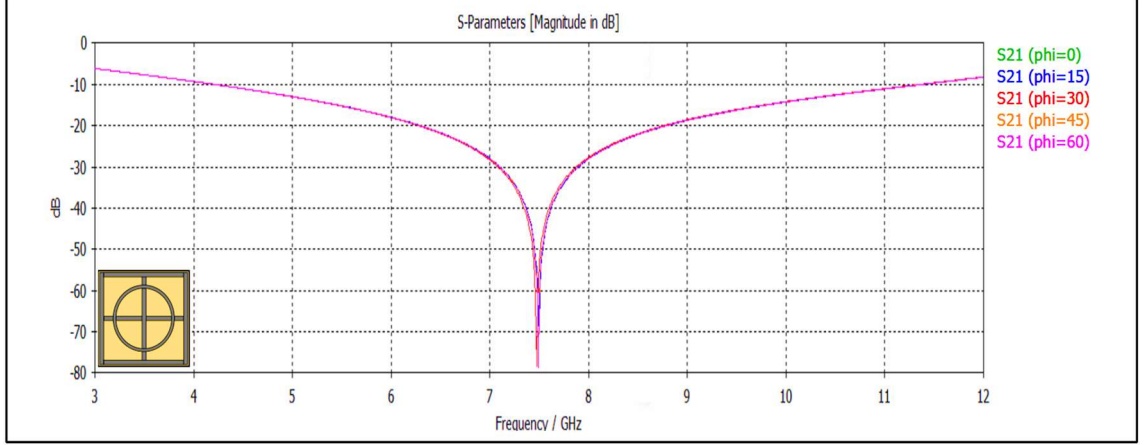


Şekil 4.25. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki artı şeklinin uzunluğunun (p) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

Çizelge 4.19. Önerilen UGB FSY'nin içerisindeki artı şeklinin uzunluğunun (p) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

p Parametre Değeri (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,5	2,9989	4,3244	3,674	1,3155	-68,91
1,25	2,6707	3,6707	3,36	1	-64,48
1,5	4,2211	11,356	7,5	7,1349	-70,2
1,625	4,3042	11,351	7,527	7,0468	-70,42
2	4,3847	11,632	7,653	7,2473	-57,18

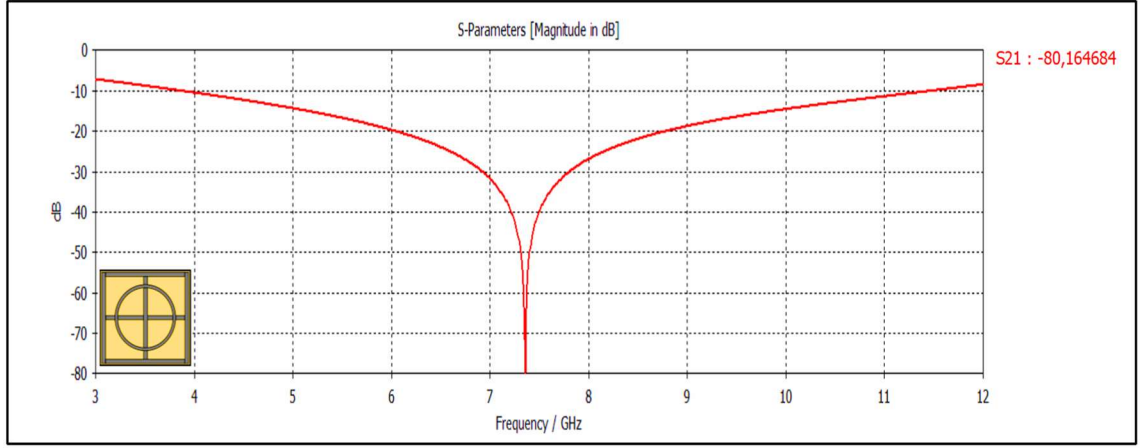
Şekil 4.26 ve çizelge 4.20’de dalga geliş açısı (Θ), 0° ’den 60° ’ye kadar, 15° aralıklarla artırılmıştır. Bu artışın rezonans frekansında ve bant genişliğinde bariz bir değişikliğe yol açmadığı görülmektedir. Dolayısıyla açı ve polarizasyondan bağımsız bir FSY elde edilmiştir.



Şekil 4.26. Önerilen UGB FSY’nin dalga geliş açısının (ϕ) değişmesi sonucu elde edilen iletim ve yansımaya karakteristikleri

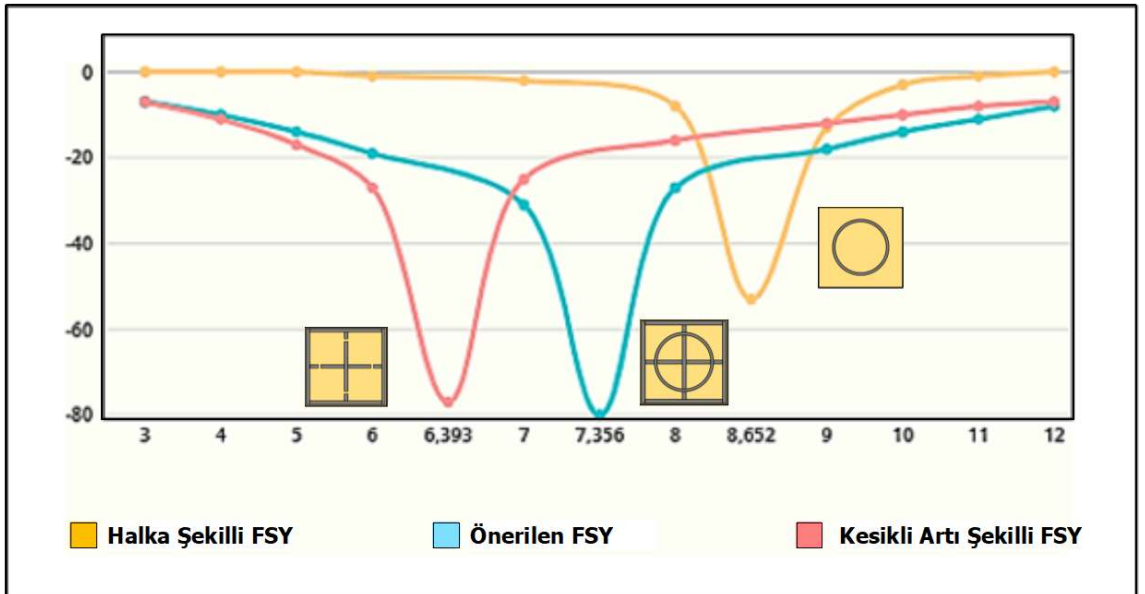
Çizelge 4.20. Önerilen UGB FSY’nin dalga geliş açısının (ϕ) değişmesi sonucu elde edilen sonuçlar

phi Parametre Değeri ($^\circ$)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0	4,2211	11,356	7,5	7,1349	-71,92
15	4,2235	11,343	7,491	7,1195	-77,56
30	4,2464	11,343	7,491	7,0966	-77,84
45	4,2669	11,329	7,5	7,0621	-69,31
60	4,2349	11,343	7,491	7,1081	-78,56



Şekil 4.27. Önerilen UGB FSY ‘nin yansıtma karakteristiği

Yapılan optimizasyon çalışmaları doğrultusunda -10 dB kazanç değerinde daha yüksek bant genişliğine sahip olmak için halka ve kesikli artı şekillerinin üst üste gelecek şekilde birleştirilmesiyle önerilen yeni UGB FSY’nin, bant genişliği 7,57 GHz, maksimum yansıtma frekansı 7,356 GHz ve maksimum soğurma değeri - 80,16 dB olarak elde edilmiştir. Önerilen yapı dalga geliş açısından bağımsız ve bant durduran filtre karakteristiği göstermektedir.



Şekil 4.28. Halka, kesikli artı şekli ve önerilen FSY ‘lerin yansıtma karakteristiği

Şekil 4.28’de halka şekilli FSY, kesikli artı şekilli FSY ve ikisinin birleşimiyle elde edilen yeni UGB FSY bir arada gösterilmiştir. Tasarlanan üç FSY incelendiğinde önerilen FSY’nin, diğer iki FSY’ye oranla daha geniş bant aralığı sağladığı görülmektedir. Şekil 4.28’de görüldüğü gibi en yüksek kazanç rezonans frekansının 7,356 GHz olduğu durumda 80,16 dB olarak elde edilmiştir.

5. SONUÇ

Literatür incelendiğinde; Kocakaya ve Çakır (2018) çalışmalarında halka şekli tek başına uygulandığı tasarımda; rezonans frekansı 8,34 GHz, çapraz dipol (artı) şekli tek başına uygulandığı tasarımda; rezonans frekansı 14,26 GHz ve bant genişliği 2 GHz olarak elde edilmiştir. Çapraz dipol ve halka şekillerini birleştirdiklerinde ise, rezonans frekansı 7,72 GHz ve bant genişliği yaklaşık olarak 3,5 GHz elde edilmiştir. Delihacioğlu ve Tosyalı (2020) ise çalışmalarında çapraz dipol şekliyle kare ve L şekillerini birleştirerek yeni bir tasarım önermiştir. Çapraz dipol şekli tek başına uygulandığı tasarımda; X (8-12 GHz) bandında elde ettikleri bant genişliği yaklaşık olarak 1 GHz ve maksimum soğurma değeri yaklaşık olarak - 42 dB değerindedir. Şekilleri birleştirdiklerinde ise; X (8-12 GHz) bandında, bant genişliğini yaklaşık olarak 2 GHz ve maksimum soğurması değerini yaklaşık olarak – 52 dB elde edilmiştir.

İncelemeler doğrultusunda çalışmada, -10 dB kazanç değerinde daha yüksek bant genişliği elde etmek için halka ve kesikli artı şekilleri üst üste gelecek şekilde birleştirilmesiyle yeni bir yapı önerilmiştir. Önerilen yapıya ulaşmak için ilk olarak halka ve artı (kesikli) şekilli yapılar tek tek analiz edilmiştir. Halka şekilli FSY üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda; bant genişliği 1,13 GHz, maksimum yansıtma frekansı 8,65 GHz ve maksimum soğurma değeri - 52,30 dB elde edilmiştir. İkinci tasarım olan kesikli artı şekilli FSY üzerinde de yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda; bant genişliği 6,25 GHz, maksimum yansıtma frekansı 6,393 GHz ve maksimum soğurma değeri - 77,30 dB olarak elde edilmiştir. -10 dB kazanç değerinde daha yüksek bant genişliğine sahip olmak için bu iki yapının üst üste gelecek şekilde birleştirilmesiyle oluşan yeni UGB FSY ile bant genişliği 7,57 GHz, maksimum yansıtma frekansı 7,356 GHz ve maksimum soğurma değeri - 80,16 dB elde edilmiştir. Analizler doğrultusunda çalışmanın amacına uygun olarak. -10 dB kazanç değerinde bant genişliğinin arttırıldığı görülmüştür.

Sonuç olarak çalışmada önerilen yeni UGB FSY ile 3-12 GHz bantları aralığında, literatürde incelenen diğer çalışmalardan daha geniş bantlı, daha iyi seviyede zayıflamaya sahip ve çalışma frekansı birden fazla bandı (C (4-8 GHz)-X (8-12 GHz)) kapsayan yeni bir yapı elde edilerek literatüre katkı sağlanmıştır.

-10 dB kazanç değerinde, daha yüksek bant genişliği elde etmek için temel parametreler üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Analizler sonucunda birim hücre boyutunun, dielektrik katman kalınlığının, iletken yüzey yarıçapının, yüksekliğinin ve kalınlığının FSY'nin frekans özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Önerilen UGB FSY'de dielektrik katman kalınlığındaki, iletken yüzey yarıçapındaki, genişliğindeki ve uzunluğundaki artışın, bant genişliğini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Dalga geliş açısının ise bant genişliğine ve rezonans frekansına bariz bir etkisi olmadığı görülmüştür. Bu sayede tasarlanan üç yapının da dalga geliş açısından bağımsız olarak kalkan ve soğurucu gibi işlevini yerine getirebildiği gösterilmiştir.

Halka ve artı şekilli FSY'ler bant durduran filtre karakteristik özelliği göstermekteydi. Bu iki şeklin birleştirilmesiyle oluşan yeni FSY'de de bant durduran filtre karakteristik özelliğinin bozulmadığı görülmüştür.

Yapı üzerinde temel parametreleri değiştirerek amaca uygun iletim ve yansıma katsayısı değerlerinin sağlanabileceği ve farklı frekanslarda bant durduran filtre yapmanın mümkün olduğu benzetimler ile kanıtlanmıştır.

Elde edilen bu sonuçlar neticesinde, önerilen UGB FSY, sağanak yağışa eğilimli bölgelerde, bant durduran ve büyük bant genişliğine ihtiyaç duyulan yerlerde, askeri sistemlerde ve birçok uydu iletişimlerinde, FSY içeren yapı ise düşük RKA değerleri ile görünmezlik teknolojilerinin bulunduğu platformlarda rahatlıkla kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Ant, İ. 2010. Bir Hedefin Fiziksel Optik Yöntemiyle Radar Kesit Alanının Hesaplanması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Azemi, S. N., Rowe, W. S. T. 2011. Development and Analysis of 3D Frequency Selective Surfaces. *Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference*, 612.
- Azemi, S. N., Ghorbani, K., Rowe, W. S. T. 2012. 3D Frequency Selective Surfaces. *Progress In Electromagnetics Research*, (29), 191–203.
- Alpaslan, N., Can, S., Yılmaz, A. E. 2016. X-Bant Konformal Dizi Frekans Seçici Yüzey Tasarımı. *URSI-TÜRKİYE'2016 VIII. Bilimsel Kongresi*, ODTÜ, Ankara.
- Angun, M. 2017. X-Bandı İçin Üç Boyutlu Frekans Seçici Yüzey Tasarımı. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Aksoy, S. 2020. Green Fonksiyonları- Ders Notları.
<https://www.researchgate.net/publication/339593547>
- Barrick, D.E., Stuart, W.D., Krichbaum C.K. 1970. Radar Cross Section Handbook. *Plenumpress*, New York.
- Balanis, C.A. 2005. Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley & Sons, New York.
- Bhattacharyya, A. 2006. Phased Array Antennas: Floquet Analysis. *Synthesis, BFNs and Active Array Systems*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Bayatpur, F. 2009. Metamaterial – Inspired Frequency – Selective Surfaces. *The University of Michigan*.
- Bodur, H., Ünalı, S., Çimen, S., Çakır, G. 2018. A Novel Reflectarray Antenna with Reduced RCS. *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, 1(1), 11-14.
- Cheng, D.K. 1989. Field and Wave Electromagnetics. *Addison-Wesley*.
- Callaghan, P., Parker, E. A., Langley, R. J. 1991. Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces. *Microwave Antennas and Propagation*, IEE Proceedings H, 138(5), 448–454.
- Cruz, R.S.M., D'Assunção, A.G., Silva, P.H.F. 2010. A New FSS Design Proposal for UWB Applications. *International Workshop on Antenna Technology*, Lisbon.
- Choi, I., Lee, D., Lee, D. G. 2014. Hybrid Composite Low-Observable Radome Composed of E-Glass/Aramid/Epoxy Composite Sandwich Construction and Frequency Selective Surface. *Composite Structures*, 117 (11), 98-104.

- Döken, B. 2011. Geniş Bantlı Kablosuz İletişime Uygun Yapısal Yüzey Malzemesi Tasarımı. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Delihacioğlu, K. 2012. S-Seklindeki Metal İletkenlerin Çok Bantlı Frekans Seçici Yüzey Özelliği. *ELECO 2012 Elektrik- Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa
- Dikmen, M.C. 2015. Radar Kesit Alanı Azaltılmış Ultra Geniş Bantlı Mikroşerit Anten Tasarımı. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- Delihacioğlu, K., Tosyalı, M. 2020. Kare Halka, Çapraz Dipol ve L Şekilli Frekans Seçici Yüzey İle Geniş Band Filtre Anten Tasarımı. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, 9 (1), 55 – 60.
- Ekici, S., Yazgan, E. 2008. Frekans Seçici Yüzeylerin İletim ve Yansıma Karakteristiklerinin İncelenmesi. *Hacettepe University Faculty of Engineering*, Ankara.
- Ergün, Yardım, F. 2012. Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemiyle Radar Kesit Alanı Kestirimi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Erdemir, S., Yılmaz, A.E. 2014. Li Frekansında Çalışan E-Şekilli Mikroşerit GPS Anteni Tasarımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(1).
- Fakharian, M.M, Rezaei, P., Orouji, A.A. 2014. A Reflectarray Based on the Folded SIR Patch-Slot Configuration Backed on FSS for Low RCS. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 47, 119–124.
- Farooq,U., Iftikhar, A., Shafique,,M.F., Khan, M.S., Fida, A., Mugha, I M.J., Anagnostou, D.E. 2021. C-Band and X-Band Switchable Frequency-Selective Surface. *Electronics*, 10(4), 476. <https://doi.org/10.3390/electronics10040476>
- Gaylor, K.L. 1989. Radar Absorbing Materials- Mechanisms and Materials. *MRL Technical Report MRL-TR-89-1*, Australia.
- Gökçen, A., Ünal, E., Kutlu, Y. 2005. Dielektrik ortam üzerine yerleştirilmiş periyodik kare ve daire yapılı frekans seçici yüzeylerin 1800 MHz için kalkanlama etkinliği. *IEEE Microwave Magazine*, 7(4), 48-54. doi: 10.1109/MMW.2006.16639.
- Gökçen, A., Ünal, E., Kutlu, Y. 2005. İzotropik Matris Malzemesi Olan Fiber Takviyeli Dielektrik Viskoelastik Ortamların Elektro-Termomekanik Davranışı İçin Matematiksel Bir Model. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fak. Dergisi*, 321-334.
- Güngör, İ. 2012. Frekans Seçici Yüzey Kullanarak İki Farklı Frekansta İstenen Işıma Değerine Sahip Reflektör Anten Tasarımı. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Güngör, İ., 2012. Frekans Seçici Yüzeyler Kullanarak İki Farklı Frekansta İstenilen Işıma Desenlerine Sahip Reflektör Anten Tasarımı. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

- Göksel, F. 2018. Geniş Bant Durduran Frekans Seçici Yüzeyin Tasarımı. *Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırklareli.
- Hooberman, B. 2005. Everything You Ever Wanted to Know About Frequency Selective Surface Filters But Were Afraid to Ask. *University of Illinois*, 1-22.
- Habergören, Ateş, S. 2018. Apollonius Çemberiyle Frekans Seçici Yüzey Uygulamaları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Knott, E.F., Shaeffer, J.F. 1993. Radar Cross Section. *Artech House*, 1997-208, Norwood.
- Kutlu, Y., Ünal, E., Gökçen, A. 2004. İzotropik Medya Üzerine Yerleştirilmiş Periyodik Kare ve Dairesel Halka Yapıların 0.1- 2.5 Ghz Frekans Aralığında Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliği. *Elektrik – Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, https://www.emo.org.tr/ekler/e38d30e656da5ae_ek.pdf.
- Kopan, M. 2007. Basit Cisimlerin Radar Kesit Alanı Uygulamaları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Kim, P. C., Lee, D. G., Seo, I. S., Kim, G. H. 2008. Low–Observable Radomes Composed of Composite Sandwich Constructions and Frequency Selective Surface. *Composite Science Technology*, 68 (9), 2163-2170.
- Karaca, E. 2013. Dairesel Polarizasyonda Çalışan L Şeklinde Çevrilmiş Şeritlere Sahip Eş Düzlemsel Dalga Kılavuzu Beslemeli Kare Slot Anten Tasarımı. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Kaplan, G. 2013. Esnek Mekanizmaların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Kutlu, Y. 2014. Frekans Seçici Yüzeyler, Teknikleri ve Uygulamaları. *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya.
- Kushwaha, N., Kumar, R., Oli, T. 2014. Design of a High Gain Ultrawideband Slot Antenna Using Frequency Selective Surface. *Microwave Optical Technology Letters*, 56, 1274–1277
- Kocakaya, A., 2018. Ultra Geniş Bantlı Radar Sistemleri İçin Hibrit Yöntemler Kullanarak Yüksek Kazançlı Anten Tasarımı. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli <http://dspace.kocaeli.edu.tr:8080/xmlui/handle/11493/16281>.
- Kocakaya, A., Çakır, G. 2018. Novel Angular-Independent Higher Order BandStop Frequency Selective Surface for X-Band Applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(1), 15-22. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0907>.
- Kocakaya, A., Çakır, G., Çimen, S. 2020. Polarization and angle independent ultra wideband frequency selective surface design. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 287-295. doi:10.17341/gazimmfd.463231.

- Li, H., Wang, B.Z., Zheng, G., Shao, W. 2010. A Reflectarray Antenna Backed on FSS For Low RCS and High Radiation Performances. *Progress In Electromagnetics Research C*, 15, 145–155.
- Mitra, R., Chan, C.H., Cwik, T. 1988. Techniques for Analyzing Frequency Selective Surfaces: A review. *Proc. IEEE*, 76, 1593-1616. <https://doi.org/10.1109/5.16352>.
- Marconi, G., Franklin, C. S. 1919. Reflector for Use in Wireless Telegraphy and Telephony. *US Patent* 1,301,473.
- Oraizi, H., Abdolali, A. 2009. Some Aspects of Radio Wave Propagation in Double Zero Matemateni also Having the Real Parts of Epsilon and Equal to Zero. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 23, 1957-1968.
- Özden, K., Özer, A., Yücedağ, O.M., Koçer, H. 2016. Metamalzeme Tabanlı Geniş Bant Işıma Emici Yapılar Kullanılarak Radar Kesit Alanının Azaltılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31:4,1105-1112.
- Özer, A.Z. 2018. Geniş Bantlı Yeni Bir Radar Soğurucu Yapı Tasarımı. *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Özdin, M. 2020. Tümlüşik Anten Kulesi İçin Geniş Bantlı Soğurucu Özellikli Çok Katmanlı Frekans Seçici Radom Tasarımı. *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, <http://acikerisim.karabuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/982>.
- Qing, A., Lee, C. K. 2001. An Improved Model for Full Wave Analysis of Surface With Gridded Square Element. *Progress In Electromagnetics Research*,30, 285– 303.
- Pozar, D.M. (1992). Microstrip Antennas, Proceedings of the IEEE, vol. 80, no. 1, pp. 79- 81.
- Pozar, D.M. 2012. Microwave Engineering Fourth Edition. *John Wiley And Sons*, ISBN 978-0-470-63155-3.
- Schennum, G.H. 1973. Frequency-Selective Surfaces For Multiple-Frequency Antennas. *Microwave Journal*, 16(5), 55-57.
- Shaeffer, J.F., Tuley, M.T., Knott, E.F. 2004. Radar Cross Section. *Sci Tech Publishing*.
- Saville, P. 2005. Review of Radar Absorbing Materials. *Defence R&D*, Canada.
- Sung, H.H. 2006. Frequency Selective Wallpaper for Mitigating Indoor Wireless Interference. *The University of Auckland*.
- Sung, H.H., Neve, M.J. 2006. Frequency selective wallpaper for mitigating indoor wireless interference. University of Auckland, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 48(5), 29 – 37. doi:10.1109/MAP.2006.277152.
- Skolnik, M. I., Willis N. J. 2008. Radar Handbook. *Mc Graw Hill*, New York.

Selvitopi, H. 2016. Manyetik Ortamda Magnetohidrodinamik Kanal Akım Problemlerinin Sınır Elemanlar ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri Birleşimi ile Çözümü. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.

Shami, T.C. 2016. Synthesis Characterization and Performance Evoluation of Polyanilic Based Compasites for Electromagnetic Absorption. *11 th International Conference on Industrial and Information System*, 291-294.

Saleem, R., Rashid, A.K., Shafique, M.F. 2016. A miniaturized flexible frequency selective surface for X-band applications. *IEEE Trans. Electromagnn Compat*, 58, 419–428, doi: 10.1109/TEMC.2015.2508503.

Tian, W., Hou, X., Che, Y. 2013. The Analysis and Measurement of FSS Radome for Antenna RCS Reduction. *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference* doi: 10.1109/CSQRWC.2013.6657413.

Topçuoğlu, C. 2018. X Bant Frekans Seçici Yüzeyle Radom Tasarımı. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Teşneli, A.T., Teşneli, N.B., Nişancı, M.H., Angun, M. 2019. 3D Sekizgen Frekans Seçici Yüzey Tasarımı ve Analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, (2), 255 – 264. DOI: 10.17482/uumfd.387040.

Uçar, M.H.B. 2007. Anahtarlamaalı Yarık – Halka Frekans Seçici Yüzey Tasarımı. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.

Wu, T. K. 1995. Frequency Selective Surface and Grid Array. *WileyInterscience*.

Wu, T. K. 2000. Frequency Selective Surface and Grid Array. *John Wiley & Sons*, 1-25, New York.

Wang, W.T., Gong, S.X., Wang, X., Yuan, H.W., Ling J. 2009. RCS Reduction of Array Antenna By Using Bandstop FSS Reflector, *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, 23, 1505–1514.

Wong, T.F., Çolak, Ş., Serbest, A.H. 2014. Frequency domain analysis of UWB dipole arrays, *Dept of Electrical & Computer Eng., Univ. of Florida*, 461.

Wang, F., Li, K., Ren, Y., Zhang, Y. 2019. A novel reconfigurable FSS applied to the antenna radar cross section reduction. *International Journay of RF and Microwave Computer-Aided Engineerin*, doi: 10.1002/mmce.21729.

Yiğit, E., Duysak H. 2019. Determination of optimal layer sequence and thickness for broadband multilayer absorber design using double-stage artificial bee colony algorithm. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 67 (8).

Yalduz, H. 2020. Kablosuz Vücut Alan Ağ Uygulamaları İçin Metamalzeme Destekli Mikroşerit Antenlerin Tasarım ve Üretimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erciyes.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yağmur BARIŞ ALTAY
Doğum Yeri ve Tarihi : Rize / 27.07.1994
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Tevfik İleri Anadolu Lisesi
Lisans : Uludağ Üniversitesi / Elektronik Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Emis Kanatlar A.Ş. (201-2019)
Omni Otomasyon (2020-2022)
Durmazlar Makine A.Ş. (2022- Devam)

İletişim (e-posta) : ygmr_brs@hotmail.com

Yayımları : Barış, Y., Yalçın, U., 2022. C Bandında Frekans Seçici Yüzey Tasarımı, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi VIII. Bilim Günleri, Sözlü Sunum, 9-11 Mayıs 2022, İstanbul, Türkiye.

Barış, Y., Yalçın, U., 2022. C Bandında Frekans Seçici Yüzey Tasarımı ve Analizi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 27(2), Bursa, Türkiye. (Revizyon Aşamasında)