

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

GENİŞ BANT DURDURAN İKİ FREKANS SEÇİCİ YÜZEYİN TASARIMI



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih GÖKSEL

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN

ARALIK 2018

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

GENİŞ BANT DURDURAN İKİ FREKANS SEÇİCİ YÜZEYİN TASARIMI



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Fatih GÖKSEL
1148203105**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN

ARALIK 2018

Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 1148203105 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Fatih GÖKSEL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**GENİŞ BANT DURDURAN İKİ FREKANS SEÇİCİ YÜZEYİN TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr.Öğr.Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN**.....
Kırklareli Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet Arif ERGİN**
Yeditepe Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Evren İŞEN
Kırklareli Üniversitesi

Teslim Tarihi : 20 Aralık 2018
Savunma Tarihi : 27 Aralık 2018



Sevgili Eşim R. Ezgi ve Çocuklarım Elif Tuana, Kutay ve Umay GÖKSEL'e,



ÖNSÖZ

Günümüz muharebe alanlarında kullanılan silahlar ve sistemler, eski nesil sistemlere göre çok farklı özelliklere sahiptirler. Muharebe alanlarındaki mesafeler artmış ve savaş alanları sürekli aklın akılla mücadelesi haline dönüşmüştür. Yeni üretilen her sistem, uzayan mesafeleri kısaltmış ve hedefin ele geçirilme süresini en aza indirmeyi hedeflemiştir. Özellikle de hedef tespit sistemleri ile iletişim ağında meydana gelen yenilikler, asimetrik savaşların vazgeçilmez bir parçası olmayı başarmıştır. Elektromanyetik spektrumu dost unsurlarca etkin şekilde kullanmayı hedeflerken, düşmanın da kullanımını engellemek amacıyla meydana getirilen yeni tip sistemler sayesinde savaş alanlarında üstünlük sağlamak çok daha hızlı mümkün olabilmektedir. Hedefin konumunu çok kısa bir süre de tespit etme imkanı sağlayan yeni nesil hava, deniz ve kara platformları ile anten ya da her türlü platformun radomlarına ya da tamamına uygulanabilen frekans seçici yüzeyler sayesinde tespit edilmesini imkansız hale getiren yeni tasarımlar ise günümüzün savaş alanlarının en önemli başarı aktörleri olarak gösterilmektedir. Beka tedbirleri kapsamında; hava platformlarında tespit edilemeyen uçaklar, kara platformlarında istenilen frekanslarda geçirgenlik sağlarken istenilmeyen frekanslarda yansıtma yapabilen antenler ve deniz platformlarında hedef tespit sistemlerince tespit edilmemesi için gelen sinyallerin emilmesini sağlayan, özellikle Radar Kubbesi (RADOM- Radar Dome) yüzey kaplamaları gibi bir çok sahada kullanımı bulunmaktadır. Frekans seçici yüzeyler ve kullanım alanları gibi önemli bir konuda gerek tecrübesi gerekse de bilgileri ile bana yardımcı olan çok değerli Danışman Hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN ve hayatımın en büyük değerleri olan Sevgili Eşim R. Ezgi ve Çocuklarım Elif Tuana, Kutay ve Umay GÖKSEL'e göstermiş oldukları sabır ve anlayışları nedeniyle sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	4
1.2 Literatür Araştırması.....	5
1.3 Hipotez	16
2. RADYO DALGALARININ YAYILIMI	19
2.1 Yansıma.....	19
2.2 Kırınım	21
2.3 Saçılma	22
2.4 Çok Yönlü Yayılım.....	23
3. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERE GİRİŞ	25
3.1 Tanımlar	25
3.2 Tümlayıcı Diziler	27
3.3 Frekans Seçici Yüzeylerin Oluşumundaki Önemli Özellikler	29
3.3.1 Frekans seçici yüzeyin geometrisi	30
3.3.2 Frekans seçici yüzeylerin boyutları	32
3.3.3 Periyodik dizilerin aralarındaki boşluklar	33
3.3.4 FSY olarak tasarlanan yapının iletkenliği.....	34
3.3.5 Dielektrik levhanın etkileri	36
3.3.6 Dalgaların geliş açısı.....	39
3.3.7 Gelen dalganın polarizasyonu	39
3.4 Temel Geometrik Yapılı FSY'lerin Performans Analizleri	40
3.5 Frekans Seçici Yüzeylerin Analizinde Kullanılan Teknikler.....	42
3.5.1 Momentler metodu (Method of Moments (MoM)).....	42
3.5.2 Eşdeğer devre modeli (Equivalent Circuit (EC) Models).....	43
3.5.3 Ortak empedans metodu (Mutual Impedance Method)	43
3.5.4 Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method (FEM)).....	43
3.5.5 Zamanda sonlu farklar metodu (Finite Difference Time Domain (FDTD)).....	44
3.6 Frekans Seçici Yüzeylerin Uygulama Alanları.....	44

4.FSY MODELLEME VE SİMÜLASYON.....	49
4.1 F Şeklinde Tasarlanan Ultra-Geniş Band (UGB) Frekans Seçici Yüzey.....	49
4.1.1 Giriş.....	49
4.1.2 F şeklinde tasarlanan ultra-geniş band frekans seçici yüzeyin simülasyon tasarımı	50
4.1.3 Metod.....	51
4.2 II ve F Şeklinde Tasarlanan Frekans Seçici Yüzeylerin C, X ve Ku Bantlarındaki Rezonans Sonuçları.....	60
4.2.1 Giriş.....	60
4.2.2 II ve F şeklinde tasarlanan frekans seçici yüzeylerin simülasyon tasarımı.....	60
4.2.3 Metod.....	61
5.F ŞEKLİNDEKİ UGB FSY İLE II ve F ŞEKLİNDE TASARLANAN FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERİN ÜRETİMİ VE ÖLÇÜMÜ	73
5.1 Giriş.....	73
5.2 F Şeklinde Tasarlanan UGB FSY'nin Üretilmesi	73
5.3 II ve F Şeklinde Tasarlanan Prototip FSY'nin Ölçümü	74
6.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ	85

KISALTMALAR

AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
BG	: Bant Genişliği
CST	: Computer Simulation Technology (Bilgisayar)
CLS	: Capacitive Level Server (Kapasitif Etki Gösteren Şerit)
dB	: Desibel
dBİ	: Desibel İztropik
EC	: Equivalent Circuit (Eşdeğer Devre)
EM	: Elektromanyetik
FDTD	: Finite Difference Time Domain (Zamanda Sonlu Farklar)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
FSS	: Frequency Selective Surface (Frekans Seçici Yüzey)
FSY	: Frekans Seçici Yüzey
HFSS	: High Frequency Structural Simulator (Yüksek Frekans Yapı Simülatörü)
JC	: Jerusalem cross (Kudüs Haçı)
MoM	: Method of Moments (Momentler Metodu)
MJC	: Modified Jerusalem Cross (Modifiye Kudüs Haçı)
MTM	: Metamaterial (Metamateryal)
PEC	: Perfect Electric Conductor (Mükemmel Elektrik İletkeni)
RADAR	: Radio Detecting and Ranging (Radyo Algılama ve Menzil Tayini)
SRR	: Slot Ring Resonator (Yarık Halka Rezonatörü)
TE	: Transverse Electric (Elektrik İletimi)
TM	: Transverse Magnetic (Manetik İletimi)
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio (Gerilim Duran Dalga Oranı)
WLAN	: Wireless Local Area Network (Kablosuz Yerel Ağ)



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : FSY'nin farklı eleman şekillerinin performans analizi.....	41
Çizelge 4.1 : Çapraz Dipol tasarlanan FSY'de “e” parametresindeki değişim ve sonuçları.....	53
Çizelge 4.2 : F Şeklinde tasarlanan FSY'de “k, j ve h” parametresindeki değişim ve sonuçları.....	55
Çizelge 4.3 : F Şeklinde tasarlanan UGB FSY'de “e, h, j, ve k” parametrelerindeki değişim ve sonuçları.	58
Çizelge 4.4 : F Şeklinde tasarlanan UGB FSY'de -16 dB kazancında, “e, h, j, ve k” parametrelerindeki değişim ve sonuçları.	59
Çizelge 4.5 : F Şeklinde tasarlanan FSY'de “f”, “i” ve “i” parametrelerindeki değişim ve sonuçları.	64
Çizelge 4.6 : II Şeklinde tasarlanan FSY'de “b”, “e” ve “p” parametrelerindeki değişim ve sonuçları.	66
Çizelge 4.7 : F Şeklinde tasarlanan UGB FSY'nin -10 dB kazancında, “c” ve “e” değişimleri ve sonuçları.....	70



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : a) Yama Tipi b) Oyuk Tipi.....	4
Şekil 2.1 : Düzlem dalganın yansıması ve iletimi a) TM polarizasyonu (kutuplaşması) b) TE polarizasyonu (kutuplaşması)	20
Şekil 2.2 : Huygen'in ilkesinin örneklemeşi.	22
Şekil 2.3 : Yüzey pürüzlülüğünün yansıma üzerindeki etkisi.	22
Şekil 2.4 : Çok yönlü doğal yayılım	24
Şekil 3.1 : Dört çeşit EM filtresi; a) Bant durduran b) Bant geçiren c) Düşük geçiren d) Yüksek geçiren. Kahverengi, iletken kısmı temsil eder.	26
Şekil 3.2 : Birim hücre olarak dipollü FSY (a) Pasif dizi (b) Aktif dizi.....	27
Şekil 3.3 : Yarık Dizisi.	28
Şekil 3.4 : Tamamlayıcı a) Dipol Diziler b)Yarık Diziler (Babinet'in ilkesinin örneği).	29
Şekil 3.5 : Frekans seçici yüzey olarak uygulanan elemanların geometrileri.....	30
Şekil 3.6 : Frekans seçici yüzeylerde kullanılan 1. Group Şekiller	31
Şekil 3.7 : Frekans seçici yüzeylerde kullanılan 2. Group Şekiller	31
Şekil 3.8 : Frekans seçici yüzeylerde kullanılan 3. Group Şekiller	32
Şekil 3.9 : Frekans seçici yüzeylerde kullanılan 4. Group Şekiller	32
Şekil 3.10 : (a) Şerit dipol ve (b) Dairesel yapılara ait iletim karakteristikleri ile eleman boyutu ile rezonans frekansı (f_0) arasındaki ilişki.	33
Şekil 3.11 :Yan lobun doğal oluşumu. (a) Yan lobsuz tek ana sinyal (b) Çoklu yayılım modları uyarılmak suretiyle oluşan yan loblar.	34
Şekil 3.12 : Kare halka şeklinde tasarlanmış FSY'nin etkileri. Z_0 iletim hattının empedans karakteristiğidir.	35
Şekil 3.13 : İç içe geçmiş kare halkalara ile oluşturulmuş FSY'nin frekans davranışı ve eşdeğer devre model çizimi.	36
Şekil 3.14 : Rezonans frekansında dielektrik levhanın etkisi (a) FSY'nin her iki yüzündeki sonsuz kalınlıkta dielektrik levha (b) FSY'nin her iki tarafındaki d kalınlığındaki sonlu dielektrik levha (c) FSY'nin tek yüzündeki d kalınlığındaki sonlu dielektrik levha (d) Boşluktaki FSY (dielektrik levhasız FSY) Kesik çizgiler FSY temsil eder. $d \ll \lambda$	37
Şekil 3.15 : Dielektrik levhaların içindeki ve üzerindeki FSY (a) Dielektrik levhaların içindeki FSY, $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$. (b) Dielektrik levhanın üzerindeki FSY, $\epsilon_{eff} = (\epsilon_r + 1)/2$	38
Şekil 3.16 : Elektromanyetik dalganın geliş açısına göre periyodik elemanlar arasındaki mesafenin değişimi.	39

Şekil 3.17 : a) İndüklenmiş elektronun filtre yüzeyindeki düşük geçirgenliğini b) Elektrik alan vektörü ile dipol elemanın birbirine dik düzlemlerde olduğu örnek bir durum	40
Şekil 3.18 : Bazı radar türlerinin çalışma frekansları	45
Şekil 3.19 : Frekans seçici pencerenin örnekleme.....	46
Şekil 3.20 : Şeffaf olarak cama uygulanmış FSY örneği	47
Şekil 4.1 : Dielektrik levhanın ön yüzü.	50
Şekil 4.2 : a) F Şeklinde Tasarlanılan Ultra Geniş Bant FSY b) Birim Hücresi.....	51
Şekil 4.3 : a) Çapraz Dipol b) F Şekli ve c) Önerilen UGB F	51
Şekil 4.4 : Çapraz Dipollerden oluşan FSY.....	52
Şekil 4.5 : Çapraz dipol için iletim katsayıları [dB].	52
Şekil 4.6 : F Şekilli FSY.....	54
Şekil 4.7 : F şekli için iletim katsayıları [dB].	54
Şekil 4.8 : F Şeklinde Tasarlanılan Ultra Geniş Bant Frekans Seçici Yüzey.	56
Şekil 4.9 : UGB F şekli için iletim katsayıları [dB].....	56
Şekil 4.10 : Çapraz Dipol, F Şekli ve Önerilen UGB FSY'lerin rezonans frekans bant genişliklerinin bir arada gösterilmesi.	57
Şekil 4.11 : UGB FSY'nin -10 dB ve -16 dB kazançlı "e, h, j ve k" parametrelerindeki değişim grafiğinin gösterimi.	58
Şekil 4.12 : a) Önerilen Geniş Bant FSY b) Dielektrik levhanın Ön Yüzeyi c) Dielektrik levhanın Arka Yüzeyi.	61
Şekil 4.13 : Ultra Geniş Bant Frekans Seçici Yüzeyi Oluşturan II ve F Şekillerinin Birleşimi.	62
Şekil 4.14 : II Şeklindeki Ultra Geniş Bant FSY.....	63
Şekil 4.15 : II Şekli için iletim katsayıları [dB].	63
Şekil 4.16 : II Şeklinin dielektrik levhanın ön yüzeyine uygulanarak farklı parametrelerdeki değişim grafiği.	65
Şekil 4.17 : Dielektrik levhanın arka yüzeyine uygulanan F şeklindeki ultra geniş bant FSY.	65
Şekil 4.18 : F Şekli için iletim katsayıları [dB].	67
Şekil 4.19 : F Şeklinin dielektrik levhanın arka yüzeyine uygulanarak farklı parametrelerdeki değişim grafiği.	67
Şekil 4.20 : II ve F Şeklinde Tasarlanan Ultra Geniş Bant FSY.	68
Şekil 4.21 : II ve F şekilleri için iletim katsayıları [dB].	69
Şekil 4.22 : Önerilen UGB FSY'ler; II, F ve her iki şeklin birleştirilmesi sonucunda elde edilen değerlerin bir arada gösterilmesi.	69
Şekil 4.23 : Dielektrik levhanın ön yüzeyine II ve arka yüzeyine F Şeklinin uygulanarak farklı parametrelerdeki değişim grafiği.	71
Şekil 5.1 : Prototipi üretilen a) Çapraz Dipol, b) F Şekli ve c) Çapraz Dipol ve F şeklinin birleşimi UGB FSY.	74
Şekil 5.2 : Prototipi üretilen a) II Şekli b) F Şeklindeki FSY'ler.	74
Şekil 5.3 : Fabrikasyonu yapılarak ölçümleri alınacak olan FSY için hazırlanan düzenek.	75
Şekil 5.4 : Üretilmiş prototip yapının ölçümü ile simülasyon analiz sonucu.	76
Şekil 6.1 : F Şeklinde tasarlanan UGB FSY'nin -10 dB ve -16 dB kazançlı $c=1.7\text{mm}$ ve $e=0.35\text{mm}$ olduğu durum için iletim katsayıları.	78
Şekil 6.2 : Üretilmiş prototip yapının ölçümü ile simülasyon analiz sonucu.	80

GENİŞ BANT DURDURAN FREKANS SEÇİCİ YÜZEYİN TASARIMI

ÖZET

1919 yılında G. Marconi ve C. S. Franklin tarafından patenti alınan “Kablosuz Telegraf ve Telefon için Reflektör” yapımı ile tarihte ilk kez frekans seçici yüzey (FSY) olarak adlandırılan icadın hayatımıza sayısızca katkı sağladığı bilinmektedir. 1960’lı yıllara gelindiğinde ise, frekans seçici yüzeylerin özellikle askeri istihbarat birimlerince kullanımı ile elde edilen başarılar, gözardı edilemeyecek boyutlara gelmiştir. Kara, hava ve deniz platformlarına periyodik olarak uygulanan bu yapılar, belirli frekanslar için alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren veya bant durduran özellikleri sergilemiş ve elektromanyetik filtreler görevini üstlenmişlerdir. Özellikle hedef tespit sistemlerince tespit edilemeyen platformlar sayesinde pek çok başarılar elde edilmiştir. Gelişen teknoloji sayesinde kablosuz haberleşme sistemleri, radarlar, mikrodalgalar gibi pek çok alanda etkin bir şekilde kullanılan bu yapılar; birim hücrenin geometrisi ve dizilişi sayesinde, gelen elektromanyetik dalganın yansıması veya iletilmesini sağlamaktadır.

Milimetre dalga, yüksek hızlı geniş bantlı erişim için kullanılabilen 30 GHz ve 300 GHz arasındaki radyo spektrumunun bandıdır. Milimetre dalgalarının kullanımı; kablosuz iletişim, radar, uzaktan algılama teknolojisi ve radyo astronomisi alanları da giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışma iki bölümden oluşmaktadır; ilk kısımda önerilen yapı Bölüm 4.1 ile verilmiştir. Bu tasarım ile U (40-60 GHz) ve V (50-75 GHz) bandları milimetre dalga uygulamaları için, yeni bir tek katmanlı Ultra Geniş Band (UGB) Frekans Seçici Yüzey önerilmiştir. Önerilen FSY yapısı, kare döngünün her iki yanında geleneksel bir kare döngü ve dört ayrı satırdan oluşmaktadır. Tek katmanda F-şekli elde etmek için çizgiler tabaka yüzeyinde 90 derece döndürülmüş gibi görünmektedir. Düşük maliyetli, kayıpsız FR4 dielektrik alt tabaka üzerine uygulanarak tasarlanmıştır. Tasarlanan UGB FSY’nin iletim katsayıları CST Microwave Studio ticari yazılımı ile elde edilmiştir. İletim katsayıları elde edilmiş ve önerilen tasarımın -10 dB kazancında; 39.59 GHz’den 81.80 GHz’e kadar 42.21 GHz’lik geniş bir durdurma bandı sergilediği gözlenmiştir. Normal geliş açısında maksimum yansıtma performansı 60.90 GHz’de -61.10 dB olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte FSY’nin simetrik yapısı, polarizasyon bağımsız doğasını sağlamaktadır. CST Mikrodalga Studio simülasyon sonuçları, önerilen FSY’nin yapısının 39.59 ila 81.80 GHz arası bant genişliğine (BG) sahip olduğunu göstermektedir. Kesavan A. ve arkadaşlarının tasarlamış oldukları yapı, -10 dB’de U ve V bantlarında 40-70 GHz frekansları aralığında 30 GHz’lik bant genişliği sağlarken; F Şeklinde tasarlamış olduğumuz UGB yapı -10 dB’de 39.59-81.80 GHz frekansları arasında 42.21 GHz’lik bant genişliği sağlayarak Kesavan A. ve arkadaşlarının tasarladıkları yapıya göre daha fazla frekans bant genişliğinde yansıma sağlamaktadır. Tasarlanan FSY’nin tek katmanlı minyatür geometriye ve geniş band durduran yapıya sahip olması gibi faydaları vardır. Önerilen FSY filtresi, sistem korumasının gerekli olduğu çeşitli mm dalga uygulamalarında kullanılabilir.

İkinci kısımda ise C, X ve Ku bantlarını kapsayan yeni bir ultra geniş bant FSY tasarımı yapılmıştır. Dielektrik tabakanın bir tarafına F şekli ve diğer tarafına üç kare halkanın içindeki II kare şeklindeki frekans seçici yüzeyin etkinliğini analiz etmek için elektromanyetik sinyal uygulanmıştır. Bu FSY yapısının C-bandı (4-8 GHz), X-bandı (8-12 GHz) ve Ku-bandı (12-18 GHz) için yeni bir çift katmanlı ultra geniş-band frekans seçici yüzeyi tasarlanması hedeflenerek önerilmiştir. Önerilen FSY

yapısının ön tarafı II şeklinin dışında üç tane iç içe geçmiş bir kare halkadan oluşmakta ve diğer katman yüzeyinde ise F şeklini elde etmek için çizgiler eklenerek 90 derece döndürülerek birleşik F şekli elde edilmiştir. Tasarlanan UGB FSY'nin iletim özelliklerinin sayısal analizi, CST Microwave Studio ticari yazılımı kullanılarak yapılan simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. İletim katsayıları elde edilmiş ve önerilen tasarımın 3.05 ila 19.80 arasında 16.92 GHz'lik geniş bir bant durdurma sergilediği gözlenmiştir. Normal geliş açısında maksimum yansıtma performansı 16.35 GHz'de -71.33 dB olarak ölçülmüştür. Literatürde benzer çalışmalar yer almaktadır, örneğin Sarika ve arkadaşları üç bantı kapsayan -10 dB'lik yansıtma performansında, 10,4 GHz bant genişliği ile 5,2-15,6 GHz arasında yapı tasarlamayı hedeflemişlerdir. Yeni F ve II şekli UGB yapısı ise -10 dB yansıtma performansında, 3.05-19.97 GHz frekansları arasında 16.92 GHz'lik bir bant genişliği sağlamaktadır. Böylece, F ve II olarak tasarlanan yeni şekil, Sarika ve arkadaşları tarafından tasarlanan yapıdan daha fazla bant genişliğinde yansıma sağlamaktadır. İki taraflı katman, minyatürize edilmiş geometri ve geniş bantlı yapı özellikleri sunan bu FSY tasarımı yapısı ile avantaj sağlamaktadır.

II ve F Şeklinde tasarlanan yapı 30x30 cm boyutlarında üretilmiş ve 1-18 GHz frekans bant genişliğinde, laboratuvar ortamında ölçüm sonuçları alınmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; benzetim ile ölçüm sonuçlarından meydana gelen yansıma frekans bantlarının birbiriyle çok uyumlu olduğu gözlenmiştir. Sistem üç bantta korumaya veya yansıtmaya ihtiyaç duyduğunda; FSY filtresi, sistemin bulunduğu çeşitli mm dalga uygulamalarında kullanılabilir.

WIDEBAND STOPPING TWO FREQUENCY SELECTIVE SURFACES DESIGN

SUMMARY

In 1919 G. Marconi and C. S. Franklin made an invention that is known "Reflector for Wireless Telegraph and Telephone" which is called frequency selective surface (FSS) for the first time in history, contributed to our life with lots of help. When it comes to the 1960s, the success achieved with the use of frequency selective surfaces in military intelligence units has come to such an extent that it can not be ignored. Periodically applied to land, air and sea platforms, these structures exhibited low pass, high pass, band pass or band stop characteristics for certain frequencies and assumed the role of electromagnetic filters. Many successes have been achieved, especially through platforms that can not be detected by target detection systems. Thanks to the developing technology, these structures, which are used effectively in many areas such as wireless communication systems, radars, microwaves, by the geometry and arrangement of the unit cell, provides the reflection or transmission of the incoming electromagnetic wave.

Millimeter wave, which is between 30 GHz and 300 GHz frequency band, can be used for high-speed broadband access. It has been increasingly important in the field of wireless communications, radar, remote sensing technology and radio astronomy. This study aims to propose a new single layered ultrawide-band (UWB) frequency selective surface (FSS) for U (40-60 GHz) and V (50-75 GHz) band millimeter-wave applications. Proposed FSS structure consists of a conventional square loop and four separate lines added each side of the square loop. It seems like lines rotated 90 degrees on face to obtain F-shape on single layered. Dielectric substrate is made by low-cost FR4 loss-free. For designing the FSS structure's transmission coefficient obtained by CST Microwave Studio commercial software. Transmission coefficients are obtained and it has been observed that the proposed design exhibits a broad stop-band of 42.21 GHz, from 39.59 to 81.80, The maximum rejection performance with normal incidence is measured as -61.10 dB at 60.90 GHz. Kesavan A. and colleagues designed a band of -10 dB rejection between 40-70 GHz frequency with a bandwidth of 30 GHz in the interval, but F-shaped UWB structure provides a bandwidth of 42.21 GHz between frequencies 39.59-81.80 GHz at -10 dB rejection performance, giving more frequency bandwidth reflection than the structure designed by Kesavan A. and colleagues. The single layered miniaturized geometry and wide stop band nature are the advantages of this FSS. The proposed FSS filter can be used in numerous mm-wave applications where system protection is required.

In the second part, a new ultra wideband FSS design presents including C, X and Ku bands. The F shape is applied on one side and on the other side II shape inside of three square loop is applied of dielectric layer for analysing the effectiveness of the frequency selective surface. This FSS structure is aimed to band-stop at three band. The aims of the study is proposed a new single layered ultrawide-band frequency selective surface for C-band (4-8 GHz), X-band (8-12 GHz) and Ku-band (12-18 GHz) wave applications. Front side of FSS structure proposed consists of a three nested square loop with outside of the II shape and seems like lines rotated 90 degrees on face to obtain F-shape on single layered. A numerical analysis of transmission properties of the designed UWB FSS is performed through simulations using CST Microwave Studio commercial software. Transmission coefficients are obtained and it has been

observed that the proposed design exhibits a broad stop-band of 16.92 GHz, from 3.05 to 19.80. The maximum rejection performance with normal incidence is measured as -71.33 dB at 16.35 GHz. At the aimed three band of -10 dB rejection performance for the Sarika and friends designed structure between 5.2-15.6 GHz with 10.4 GHz bandwidth. New F and II shape UGB structure, at -10 dB rejection performance, provides a bandwidth of 16.92 GHz between frequencies 3.05-19.97 GHz. So that new shape of F and II provides more frequency bandwidth reflection than the structure designed by Sarika and colleagues. The two sided layer miniaturized geometry and provide wide stop band nature so that this structure has an advantages of in FSS structure.

The prototype of the structure designed as II and F was produced and measurement results were obtained in laboratory environment with 1-18 GHz frequency bandwidth. When the results are examined; It was observed that the reflection frequency bands formed by the simulation and the measurement results were very compatible with each other. When system needs protection or rejection at the three band; FSS filter can be used in numerous mm-wave applications where system.



1. GİRİŞ

Yeni dünya düzeninin en önemli kavramlarından biri de hiç şüphesiz ki güven ortamının yaratılmasıdır. Geleneksel olarak bilinen savaş tanımlarının çok fazla dışına çıkıldığı ve savaş kavramı ile bu ortamda uygulanan yöntemlerin çok farklı nitelik kazandığı görülmektedir. Özellikle de hedefler; hedeflere ulaşmada kullanılan yöntem ve teknikler, izlenen stratejiler, planlama usul ve süreleri, teknolojik gelişmelerin savaş alanlarına entegrasyonu ve coğrafi alan kavramının kaybolması gibi hususlarda geleneksel geçmiş savaşlardan çok fazla farklılıklar göstermektedir. Geçmiş savaşlarda belirgin olan barış, gerginlik, kriz ve savaş dönemleri artık belirginliğini kaybetmiş ve çok kısa sürelerde hayal edilemeyecek dönemlere girilebilmektedir. Devletler kendi politikalarına uygun dünya düzeni oluşturmak için sürekli arayış içerisine girmişlerdir. Değişen dünya düzeni ve teknolojik gelişmeler insanoğlunu farklı keşifler yapmaya yönlendirmiştir.

1820 yılında Hans Christian Oersted adında Danimarkalı bir öğretmen tarafından elektrik akımı taşıyan bir telin yakınına manyetik (mıknatıslı) bir pusula yerleştirdiği zaman pusula ibresinin teline dikey kesişecek yönde bir noktaya hareket ettiğini görmüş ve bu olayı Oersted “elektromanyetizm” diye adlandırmıştır. 1856 yılında yani aradan geçen otuz altı yıl sonra, James Clark Maxwell adındaki genç bir İngiliz fizikçi, elektrik yükündeki bu hareketin elektromanyetik bir alan oluşturduğu kuramını daha geliştirerek elektromanyetik dalgaların varlığını ortaya koymuştur. Maxwell, ispat etmeye çalıştığı bulguları matematik eşitlemeler kurarak bilim adamlarına bu kuramın doğruluğuna kabul ettirmeye çalışmada başarılı olamamıştır. Ancak 1888 yılında Maxwell’in kabul ettirmeye çalıştığı bu kuramın varlığını deneysel olarak ortaya koyan kişi genç bir Alman fizikçi Heinrich Hertz’dir [1].

1857 yılında Hamburg’da dünyaya gelen ünlü Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz, 1888’de kendisinin en önemli başarısı olan radyo dalgalarını keşfetmiştir. Işık hızı ile aynı hıza sahip olan radyo dalgasının bulunmasından sonra, Hertz, radyo dalgalarının ışık dalgaları gibi yansıma, kırılma ve girişim yapabildiklerini göstermiştir. Kısa yaşamı boyunca bilime birçok katkı yapmıştır. Saniye başına titreşim olarak

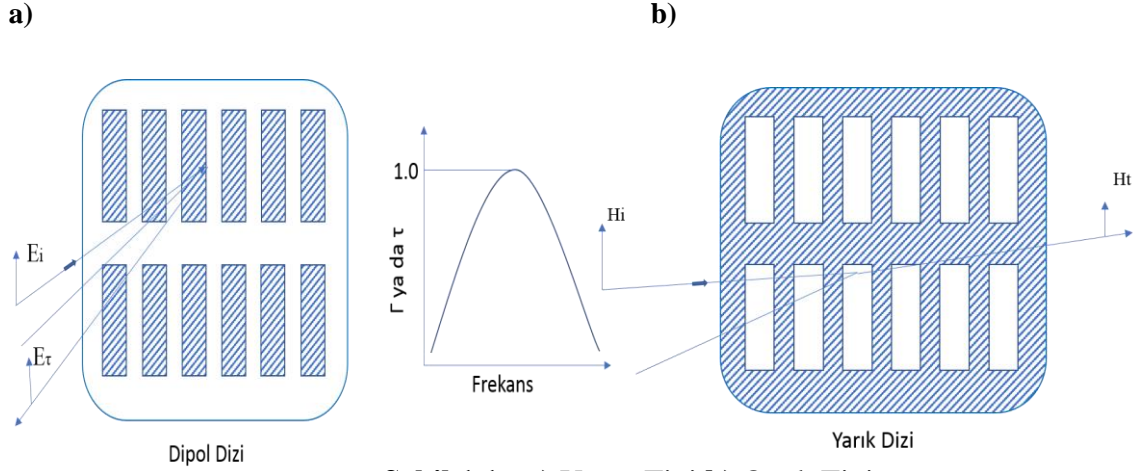
tanımlanan hertz, onun ismi ile anılmaktadır. Hertz'in yapmış olduğu çalışmalar, Maxwell'in daha önce ortaya attığı, elektromanyetik dalgaların elektrik dalgalarıyla aynı davranışları gösterdiği biçimdeki kuramını kanıtlamış olmuştur [1].

Bir anten, Webster Sözlüğü tarafından radyo dalgalarını yaymak ya da almak için kullanılan genellikle çubuk ya da tel gibi metal olan bir cihaz olarak tanımlanmıştır. IEEE anten terimleri standartlarına göre (IEEE 145-2013) ise “radyo dalgalarını yaymak veya almak için bir araç” olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle, anten, serbest alan ve bir yönlendirici cihaz arasındaki geçiş yapısıdır. Yönlendirme cihazı veya iletim hattı, bir koaksiyal hat veya içi boş bir boru (dalga kılavuzu) şeklini alabilir ve elektromanyetik enerjiyi, verici kaynaktan antene veya antenden alıcıya nakletmek için kullanılmaktadır. Eski durumda, bir verici anten ve ikinci bir alıcı anten vardır [2].

Doğada mevcut bulunan malzemeler yetersiz kalmaya başlamıştır. Sürekli arayış içerisinde bulunan bilim adamları sonunda metamateriyalleri keşfetmiştir. Yaygın olarak kabul edilen tanımıyla bir “meta-materyal”, maddi özelliklerini, kendi içsel malzeme bileşiminin aksine, yapısından elde eden yapay olarak yapılandırılmış bir yapıdır. Son on yılda meta-materyallerin alanı bilim çevrelerinde büyük ilgi görmüştür. Pratik uygulamalara yön veren sürekli ilerlemeler ve keşifler sayesinde, metamalzemeler, yeni nesil cihazlara yönelik olarak teknolojiye dayalı kurumların ve savunma kurumlarının dikkatini çekmiştir. Bazı alanlarda geliştirilen ve çok iyi anlaşılabilir temel fizik ile, güncel araştırma çalışmaları, ünlü uygulamaların ünlü mikro dalga “görünmezlik pelerin” olmasıyla, pratik uygulamalara olan talepten kaynaklanmaktadır. Çoğu metamalzemeler, bir sunucu matrisinde gömülü saçılma elemanı dizilerinden oluşur. Saçılma elemanları tipik olarak aynıdır ve ortamın elektromanyetik özellikleri birim hücrenin özelliklerinden çıkarılabilir. Bu kolaylık, tasarımcının birim hücrenin büyüklüğünü, şeklini ve bileşimini değiştirerek ortamın etkili elektromanyetik parametrelerini kontrol etmesini sağlamaktadır. Bir meta malzemeyi tasarlarken önemli bir kural; saçılma elemanlarının boyut ve periyodikliğinin, işletme dalga boyundan ($\lambda_0 / 10$ veya daha küçük) önemli ölçüde daha küçük olması, ünitenin davranışına bağlı olarak malzemenin toplu özelliklerinin anlamlı bir şekilde yorumlanmasına izin vermesidir. Buna göre bir platformun metamalzeme ile kaplanması, o platformun radarda görünürlüğünü temsil eden Radar Kesit Alanı (RKA) değerini azaltabilmektedir [4].

Radar Kesit Alanının ne olduğuna dair kısaca bahsetmek gerekirse: Radar; elektromanyetik dalga gönderen ve cismin üzerine gelen enerjinin alıcı yönünde saçılmasıyla cismin varlığını tespit etme, bulunduğu yön ve uzaklığı ölçme işlevlerini yerine getiren cihaz olarak tanımlanabilir. Bu nedenle, her frekansta çalışabilmektedir. Radar kesit alanı, bir hedefin radar tarafından yayılan dalgalarla aydınlatılması sonucu hedeften belli bir yönde saçılan güç yoğunluğunun, radardan hedefe giden alanın güç yoğunluğuna normalize edilmesinin ölçüsüdür. Burada normalizasyonun amacı mesafe etkisini ortadan kaldırmak; böylece RKA hesabını hedef ve radar arasındaki mesafeden bağımsız bir hale getirmektir [5,6].

Radarların kesit alanlarını küçültmekte kullandığımız diğer bir yapı ise frekans seçici yüzeylerdir. Bilinen ilk icat, G. Marconi ve C. S. Franklin'in 1919 yılında yapmış ve patentini almış oldukları "Kablosuz Telegraf ve Telefon için Reflektör" yapısıdır [7]. Yeni gelişen teknolojik buluşlar ışığında elektromanyetik dalgalar ve anten uygulamalarının çok geniş ve farklı uygulanma alanları ortaya çıkmaktadır. FSY'ler elektromanyetik dalgaların çarpmış olduğu yüzeyin özelliklerine bağlı olarak hareket etmektedir. FSY'ler gelen elektromanyetik dalganın iletim ve yansıma karakteristiğini gelen dalganın frekansına bağlı olarak, elektrik iletkenliği sıfır veya çok zayıf olan dielektrik levhalar üzerine periyodik olarak yerleştirilmiş yama ya da oyuklardan meydana gelen yapılardır. FSY'ye ait örnek olarak Şekil 1.1'de dielektrik levha üzerine periyodik olarak yerleştirilmiş yama yani kapasitif FSY tipinde ve oyuk yani endüktif FSY tiplerindeki yapılar gösterilebilir. Periyodik yüzeyler, temelde aynı elementlerin bir ya da iki boyutlu sonsuz bir düzlemde sıralanarak birleştirilmesidir. Temelde periyodik yapılar iki şekilde ortaya çıkmaktadır; 1) Pasif yapılar dediğimiz düzlem yüzey dalga 2) Aktif yapılardaki her bir element tek tek üreteçlere bağlanarak elde edilmiştir [9].



Şekil 1.1 : a) Yama Tipi b) Oyuk Tipi.

FSY'ler gelişme kaydettikçe stratejik önemi artmış ve askeri alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Hatta bu hususlarla ilgili askeri istihbari konular değerlendirildiği için 1960'lara kadar yapılan çalışmalardan bahsedilmemiştir [8,10,11]. FSY olarak tasarlanan şeklin ve aralarındaki boşluk, belirli bir dalga boyunda, alanların iletilmesine veya yansıtılmasını sağlarken; genelde rezonans bir yapıda çalışması için, elementin genişliği yarım dalga boyu veya tam katı olursa meydana gelmektedir.

Hava, kara, deniz platformları ile özellikle yeni gelişen hava savunma sistemlerinde sıklıkla karşımıza çıkan bu yapı sayesinde düşman tarafından tespit edilmeden hedefin imha edilmesi sağlanmaktadır. FSY'ler uygulandığı yapı üzerinde birer filtre özelliği gösteren yapılardır. FSY'ler sayesinde istenmeyen frekansların üzerinde birer engel gibi davranırken istenilen frekanslarda sistemlerin çalışmasını sağlar. Ayrıca tasarlanmış olunan FSY yansıma sağlayabildiği gibi soğurma da yapabilir. Gelen elektromanyetik dalga iki şekilde kayba uğratılabilir; ya yansıtılır ya da soğurularak gelen dalganın iletilmemesi sağlanır. Kısaca biz bu yapıya kalkanlama etkinliği diyoruz. FSY'ler sadece askeri alanlarda değil artık uydu haberleşme ağlarında, Radar kürelerinde, mikro dalga fırınlara, EM kalkanlama uygulamalarından kablosuz (wireless) haberleşme ve internet ağına kadar varan, askeri ve sivil amaçlı olmak üzere oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptir [9,10].

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, ilk olarak kısaca frekans seçici yüzeylerin tarihçesi hakkında bilgi verilerek, değişken geometrilere tasarlanan ve farklı frekanslarda çalışan yapılar incelenmesi hedeflenmektedir. FSY'lerin kullanım yerleri hakkında bir çok makale

analiz edilmiştir. Özellikle tasarlanan yapılarda kalkanlama etkinliğinin yansıtma özelliği ele alınmıştır. Kalkanlama etkinliğinin değişik platformlarda uygulanması ve literature daha geniş bant aralığı sağlayan yapılar sunmak için farklı denemeler yapılmıştır. FSY olarak tasarlanan yapılara “F” harfi baz alınarak farklı geometrik yapılarla birleştirilmek suretiyle rezonans frekanslar elde edilmesi hedeflenmiştir.

Öncelikle, Çapraz Dipol olarak tasarlanan yapının iletim katsayıları CST Microwave Studio programı kullanılarak incelenecektir. İkinci olarak, yeni tasarlanan F şekli ele alınacak ve rezonans frekansında istenilen bant genişliğinde olup olmadığı değerlendirilecektir. FR4 dielektrik levha üzerine uygulanarak iletim katsayıları ölçümleri alınacaktır. Sinyalin normal geliş açısında olduğu değerlendirilmektedir. Tek tek ölçümleri alınan bu yapıların iletim katsayıları istenilen bant genişliğinde sağlanamazsa, optimizasyon çalışmaları ile verimliliğin artırılması sağlanacaktır. Tasarlanacak olan bu yapının -10 dB kazanç değerinde U-bandı (40-60 GHz) ve V Bandı (50-75 GHz)’nin tamamını kapsayacak şekilde band durduran karakteristiği göstermesi hedeflenmektedir. Ayrıca -16 dB kazanç değerinde de yine 30 GHz bant genişliği elde edilmesi hedeflenmiştir.

İkinci olarak tasarlanan FSY ise, II ve F şekilleridir. İki farklı şeklin, II ve F, öncelikle ayrı ayrı rezonans frekansları ele alınmış ve daha sonra şekilleri dielektrik levhanın ön yüzeyine II Şekli ve arka yüzeyine F Şekli uygulayarak oluşturulan FSY’nin iletim karakteristiği incelenmiştir. II ve F şekilleri, FR4 dielektrik levhanın ön ve arka yüzeyi üzerinde uygulanmıştır. Çok sayıda parametrik değerlerin ölçülmesinde CST Microwave Studio programı ile hesaplamalar yapılmış ve grafikler MATLAB (matrix laboratory) yardımı ile çizilmiştir.

II ve F şeklindeki FSY’ler, dielektrik levhanın ön ve arka yüzeyinde birleştirilecek ve -10 dB kazanç değerinde C-bandı (4-8 GHz), X-bandı (8-12 GHz) ve Ku-bandı (12-18 GHz)’nin tamamını kapsayacak şekilde rezonans sağlaması amaçlanmaktadır.

1.2 Literatür Araştırması

Periyodik yapılarla ilgili ilk olarak 1919 yılında Guglielmo MARCONI ve Charles Samuel FRANKLIN’in kablosuz telegraf yapımında kullandığı, Amerikan Patent Kurulunca onaylanan, aynı cins ve tipteki malzemenin periyodik olarak yerleştirilmesi

çalışmasıyla karşımıza çıkmaktadır [7]. 1919 yılında patentinin alınmasına rağmen 1960'lı yıllara kadar çok fazla gelişme kaydememiştir.

Antenin çalışma bandı üzerinde elektromanyetik sinyallerin etkilerini emmeye yönelik soğurucu özellikteki frekans seçici radom, Filippo Costa ve Agostino Monorchio taraflarınca yapılmıştır. Radom; metalik yüzey üzerine direnç gösteren FSY yerleştirilmiş ve metalik FSY'nin ön yüzeyine Kudüs Haçı (Jerusalem Cross - JC) elementi ile birleştirilerek oluşturulmuştur. Yapı, antenin çalışma bandının dışından gelen gücün toplamını yansıtan genel düşük radar kesit alanlı radom tasarımından farklı olarak, iç band performansını düşürmeden gerçek yansıma azalmasını sağlamıştır. Ek kayıplar 0,3 dB küçültülür ve soğurma band genişliği 10 GHz'den 18 GHz'e yükseltilmiştir [13].

Dairesel polarizasyon; kablosuz ağlar ve uydu iletişimlerinde her zaman araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Çok yollu atmosferik emilim ve yansımalarındaki hassaslığı çözebilmek için geçmişte kullanılan en değerli husustur. Dairesel polarizasyonu gerçekleştirmek zorlu bir görevdir. Dairesel polarizasyonu elde etmenin genel yolu kesin istenilen durumları sağlayan sıralı beslemeliler gibi düzgün olmayan şekil ile yansımayı sağlamak ve özel besleme konfigürasyonları geliştirmektir.

Sohail I., Ranga Y., Esselle K. P. ve Hay S. G., Doğrusal (Lineer) polarizasyondaki bir dalganın daireysel polarizasyona dönüştürülmesindeki iletim tipi polarizörden bahsetmişlerdir. FSY'den faydalanılarak, polarizör olarak meydana getirilen JC, RT 5870 dielektrik levha üzerine yerleştirilerek oluşturulmuştur. Birim hücreler arasındaki indiktif kolları ve kapasitif birleşimleri ayarlama ile iletilen dalga için istenilen aksel değer performansına yardım edebilmiştir. Polarizör 17,8 GHz de çalışır ve istenen iki dik bileşenin arasında 90° faz farkı sağlar. Bunların büyüklükleri eşittir. Diğer bir yöntem antenin önüne konularak daireysel polarizasyonu sağlayan anten dizeleridir. Dielektrik, çelik ızgara levha ve kırık hatlı polarizörlerle de bu dönüşü sağlanabilir. Son zamanlarda frekans seçici yüzeyler bu yapıların tasarımında kendilerini lineer dalgaları daireysel ve tam tersine polarizasyonda kanıtlamışlardır. Yeni tek katmanlı FSY temelli polarizör sunulmuştur. Birim hücre boyutu $\lambda/2$ dir. Önerilen tasarıda 3,1 dB lik direnç kaybı vardır. Bu çapraz dipole kıyasla ilerlemedir. Sonuç olarak bu çalışmada JC FSS kullanılarak %4,3 performanslı 3 dB kazançlı aksel değerli bant genişliği ve sadece 3,1 dB direnç kaybına sahip tek katmanlı iletim polarizörü sunulmuştur [14].

Frekansların değiştirilebilir olması için farklı kombinasyonlar denenmiş ve benzer FSY davranışları analiz edilmiştir. Farklı anahtar kombinasyonları sayesinde açma ya da kapama olarak ayarlanılan anahtarlar ile bant geçirgenliğinin değiştii tespit edilmiştir. Örneğin, band geçiren FSY olarak kullanıldığında, 2.97-4.47 GHz bant aralığında, 1.5 GHz'lik bant genişliğinde tek geniş band elde edilmiş olmuştur. Diğer modda iki dar bandlarda 2.4GHz ve diğeri 5.4 GHz frekanslarında oluşturulabilmiştir. Üçüncü mod ise çok daha geniş banda izin vermektedir. Tasarlanılan FSY FR-4 dielektrik levha üzerine uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ayrıca şunu gösterdi ki; çift ya da üçlü bant geçirgenler diğer anahtarlama kombinasyonlarını seçerek de elde edilebilmektedir. Sonuç olarak tasarlanılan modifiye edilmiş J-hücresel birimi; 2,45 GHz ve 5 GHz'de tek ve çift bant geçirgenliği uygun anahtar seçilerek elde edilmiştir. Tasarlanılan FSY yüksek banttaki rezonans frekansı değişebilirken düşük frekansta rezonans frekansı sabit kaldığını göstermiştir [15].

Çiğdem, S., Tunca C., Can S. ve Yılmaz A.E.'nin yapmış oldukları çalışmada; tasarlanılan frekans seçici yüzeyin 15-20 GHz frekans aralığı için önerilen bir yapı olduğu anlatılmıştır. Tasarlanan yapı dalga yayılım yüzeyine dik ve birim hücre sınır koşullarına sahip olduğu varsayılmıştır. Taban malzemesi dielektrik bir malzemeden ve üst kısım bir kare yamadan dairesel yamalar çıkarılarak elde edilmiştir. Tasarlanan yapıda elde edilen sonuçları inceleyecek olursak; malzeme yüzeyinin artmasıyla frekansta bir artış gözlemlenmiştir. Malzemenin kalınlığı arttırıldığında ise frekansta azalma gözlenmiştir. Ancak artışlar çok fazla değildir. Frekans ile doğru orantılı olarak, kullanılan farklı malzemelerin dielektrik geçirgenlik etkisi incelenmiş, elektrik geçirkenliğinin artması frekansta artmaya sebep olduğu gözlenmiştir. Yapılan çalışmada 2,5 (F/m); 4,3 (F/m) ve 6,15 (F/m) dielektrik geçirgenliğe sahip olan Arlon AD 250, FR4 ve Rogers RO 3006 malzemelerin kullanıldığı görülmüştür. Elektromanyetik dalganın geldiği açıdan bağımsız olacak şekilde tasarlanmak istenilen yapının polarizasyona bağımlı olduğu ortaya çıkmıştır. Elektrik veya manyetik uyarım söz konusu olmadığı için, dipollerde rezonanslar görülmüş ve elde edilen bu frekanslarda iletim parametresi olan S21 değerlerinin -60dB değerlerine kadar düştüğü ve bu frekanslarda iletim yapılmadığı sonucuna varılmıştır [16].

Tunca C., Çiğdem S, Can S., ve Yılmaz A. E.'nin 2014 yılında sunmuş oldukları çalışmada; Ku ve K bant uygulamalarında kullanılabilecek, birim hücre sınır koşulları ile birleşik yapıda altıgen frekans seçici yüzey tasarlanmış ve tasarımda önem arz eden

parametreler üzerinden analizler yapılmıştır. Analizler yapılırken Sonlu İntegral Yöntemini temel olarak analiz gerçekleştiren Computer Simulation Technology Studio Suite (CST Studio Suite) programı kullanılmıştır. Parametrik analiz verilerine göre özellikle yüksek bant genişliği ile dikkat çeken bir frekans seçici yüzey yapısı önerilmiştir. Yapının geometrik parametrelerinden ziyade ölçümler; dielektrik katmanın dielektrik katsayı değeri, elektromanyetik dalganın geliş açısı (ϕ) ve dielektrik katman kalınlığı üzerinden yapılmıştır. ϕ , elektromanyetik dalganın geliş doğrultusu ile z eksenini arasındaki açıyı belirtmekte ve sürekli değişmektedir. Ancak dielektrik tabanın kalınlığı ve dielektrik katsayı değeri yapının aktif kullanımı esnasında sabit değerde kalmıştır ve sonuçların da sabit olması dikkat çekmiştir. Gelen elektromanyetik dalganın geliş açısından kısmen bağımsız olarak kalkanlama işlevini yerine getirebilmektedir. Bu verilere göre dielektrik katman kısmında Rogers RO 3003 ($\epsilon=3$) kullanıldığı durum için bant genişliği 13.15 GHz, rezonans frekansı 18.2 GHz; FR4 ($\epsilon = 4.3$) için bant genişliği 12.15 GHz, rezonans frekansı 15.95 GHz ve Arlon AR 600 ($\epsilon = 6$) için bant genişliği 11.3 GHz, rezonans frekansı 14 GHz olarak gözlenmiştir. Bu da yapının sadece taban bloğunda farklı bir materyal kullanılarak tasarlanması durumunda yüksek bant genişliği avantajının farklı frekans bantlarına taşınabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak dielektrik katman kalınlığının artırılması sonucunda tasarlanılan yapının, rezonans frekansında ve bant genişliğinde önemli seviyede azalma olduğu tespit edilmiş; dielektrik katmanın, dielektrik sabitinin artırılması ile de tasarlanılan yapının rezonans frekansında ve bant genişliğinde, z parametresine kıyasla daha fazla azalmanın olduğu görülmüştür. Gelen elektromanyetik dalganın geliş açısı çok önemli bir etken olduğu gözlemlenmiştir. FSY'lerden özellikle beklenen elektromanyetik dalganın geliş açısından bağımsız olarak kalkan ve soğurucu gibi işlevini yerine getirebilmesi uygulamalarda aranan bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektromanyetik dalganın geliş açısı ile yüzeyin normali arasındaki açı 30^0 artması sonucunda bant genişliği bir miktar azalmıştır. Önemli olan rezonans frekansındaki kaymanın %5' in altında kalmış olmasıdır. Buradan çıkarılacak sonuç ise, tasarlanan yapı öncelikle gelen elektromanyetik dalganın geliş açısı başta olmak üzere incelenen parametrelere göre büyük ölçüde sabit ve etkin bant genişliği ile dikkat çekmektedir [17].

Kutlu Y'nin yapmış olduğu çalışmada, dielektrik ortama yerleştirilmiş belirli geometrideki yapıların elektrik ve manyetik alanları floquet modları cinsinden ifade

edilerek ortaya konmuştur. Bilinmeyen akım yoğunluğu; indüksiyon teoremi ve moment metodu kullanılarak bulunmuştur. Ayrıca farklı geometrik yapılara gelen dalganın açısının, ortamın bağıl dielektrik sabiti gibi parametreleri değiştirilerek frekans değişimlerine göre kalkanlama etkinliği incelenmiştir. FSY olarak tasarlanan periyodik kare halka ve dairesel halkanın belirli bir rezonans frekansında farklı dielektrik sabiti ve geliş açılarındaki iletim katsayıları hesaplanarak, kalkanlama etkileri kıyaslanmıştır. Kare ve daire halka yapıları periyodik oldukları için elektrik ve manyetik alanlar Floquet modları cinsinden ifade edilmiştir. Bilinmeyen akım yoğunluğu İndüksiyon Teoremi ve Moment Metodu kullanılarak bulunmuştur. Bu sayede iletilen ve yansıyan alanlar bulunmuştur. Farklı dielektrik sabitine göre dairesel halka, kare halkaya göre daha yüksek kalkanlama etkinliğine ve daha geniş banda sahip olduğu görülmüştür. Kare halka ve dairesel halka FSY yapıları standartlara göre normalin üstünde bir etki verdiği tespit edilmiştir. Sonuçta her iki FSY kalkanlama etkinliğinde kararlılıkları iyi denebilecek seviyede ve dairesel halka, kare halkaya oranla daha kararlı olduğu kanısına varılmıştır [18].

Ekici S. ve Yazgan E. tarafından yapılan çalışmada; herhangi bir yüzeyden yansımayı azaltmak için dörtgen iletken yamaların kullanıldığı frekans seçici yüzey yapıları olmuştur. FSY analizinde yöntem olarak İzgesel Alan İmmittans Yaklaşımı ile Moment Metodu birlikte kullanılmıştır. Ayrıca çok katmanlı yapılar için iletim hattı modelinden yararlanılmıştır. Elektromanyetik alan, Floquet modlarının birer fonksiyonu şeklinde genişletilerek levhalar üzerindeki bilinmeyen akımlara ait katsayılar Moment Metodu ile bulunarak, FSY'ye ait yansıma ve iletim katsayıları elde edilmiştir. Yapılan çalışmada dikkat çeken hususlardan kalınlık ile soğurulan band genişliği arasındaki ters ilişkidir. Tasarlanan ürünlerde beklenen düşük maliyettir. Ancak kalınlığın artması hem maliyeti arttıracak hem de fazladan yük getirecektir. Bunun için en uygun kalınlık bulunması üzerinde de çalışılmıştır. Metalik yamalar üzerinde indüklenen bilinmeyen akım, bilinen tam alan veya alt alan taban fonksiyonlarının seri toplamı şeklinde modellenmiştir. Moment Metodu ile seri toplama ait bilinmeyen akım katsayıları hesaplanmıştır.

Sonuç olarak bu çalışmada dörtgen iletken yapılar kullanılmıştır. x ve y yönünde sınırsız, kalınlığı ihmal edilebilir metalik yamalardan oluştuğu için yamalar üzerinde indüklenen akımın sadece x ve y bileşeni analiz sırasında kullanılmıştır. Yapılardaki parametrelerdeki değişiklik sayesinde istenilen rezonans frekansını ve band genişliğini

elde edilmiştir. Grafiklerden elde edilen sonuçlarda: Bağlı dielektrik sabiti arttıkça rezonans frekansı (tam yansımanın olduğu frekans) düşmekte; dielektrik katman kalınlığı arttıkça yapının rezonans frekansının azalmakta; yapının kalınlığı arttıkça durduran band genişliği azalmakta; orta katman kalınlığı arttıkça rezonans frekansı düştüğü görülmüştür. Gelme açısının Brewster açısından büyük olduğu durumlarda, serbest uzay-dielektrik katman sınırında yansıma olmamıştır. Ayrıca Brewster açısından küçük gelme açılarında iletimin düşük etkinlikte ve dar band genişliğinde gerçekleştiği görülmüştür. Ancak gelen dalga, Brewster açısından daha büyük bir açı ile geldiğinden iletimin daha etkin ve band genişliğinin yüksek olduğu görülmüştür [19].

ANSOFT Yüksek Frekans Yapı Simülatörü (HFSS) kullanılarak, düzlemsel olmayan, CLS (Capacitive Level Server- kapasitif etki gösteren şerit) ve SRR (üzerinde yarık bulunan halka rezonatör) yapılardan meydana gelen metamateriyallerin yansıma (S11) ve iletim (S21) değerleri Dilek Bilim, Emin Ünal ve Muharrem Karaaslan tarafından incelenmiştir. Yapay olarak üretilen metamateriyaller (MTM'ler); eşzamanlı negatif ϵ ve μ 'ye sahip bir yapıdadır. Materyallerin varlığı hakkındaki teorik kuram, ilk olarak Veselago tarafından sunulmuştur [20]. Veselago çalışmasında, eşzamanlı negatif dielektrik sabiti “ ϵ ” ve manyetik geçirgenlik “ μ ” ile karakterize edilen ortamın Maxwell denklemlerine uygun olduğunu ve içine yayılan düzlem dalgalarının bir sol-el üçlü oluşturacak şekilde elektrik alan şiddeti vektörü E , manyetik alan şiddeti vektörü \vec{H} ve dalga vektörü \vec{k} ile tanımlanabileceği sonucuna varmıştır. Pendry, Vesalago'nun çalışmasının ardından ince metal tel dizisinin, mikrodalga frekanslarda etkin bir negatif dielektrik sabiti ürettiğini kanıtlamıştır [21]. CLS'lerin güçlü dielektrik ve SRR'lerin ise güçlü manyetik materyal gibi tepki vereceği beklenmektedir. Dielektrik materyal katmanı dalga kılavuzunda merkeze yerleştirilmiştir. Her bir porttan gelen dalgalar, boş hacimden katmana doğru dik gelecek şekilde gönderilmektedir. CLS yapılar katmanın iç kısmına yerleştirilmiş olup, SRR yapılar katmanın üzerine yerleştirilmiştir. Araştırmacılar deneyleri; yalnız CLS'ler dahil edilerek, yalnız SRR'ler dahil edilerek ve her iki CLS'ler ve SRR'ler dahil edilerek olmak üzere üç aşamalı olarak yapmışlar ve yansıma ile iletim değerlerini elde etmişlerdir. SRR yapıdaki açıklık miktarı 10 mil, kare şekiller arasındaki mesafe 5 mil, CLS ve SRR yapıların kalınlıkları 10 mil olarak tasarlandığında elde edilen S11 ve S21 değerleri, Ziolkowski tarafından 2003 yılında

HFSS kullanılarak elde edilen S11 ve S21 değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, yalnız CLS'ler devrede olduğunda yapının $\epsilon < 0$ özellik gösterdiği frekans değerleri, Ziolkowski tarafından 8-14 GHz frekans aralığında bulunurken, bu çalışmada 10-15 GHz frekans aralığında elde edilmiştir. Yalnız SRR'ler devrede olduğunda yapının $\mu < 0$ özellik gösterdiği frekans değerleri, Ziolkowski tarafından 9-10 GHz frekans aralığında elde edilirken, bu çalışmada 9.30- 9.75 GHz frekans aralığında gözlenmiştir. Sonuçta, ANSOFT HFSS programında “fast sweep” seçeneğinin kullanılması ve 5-15 GHz aralığında alınan değer sayısının farklı olması nedeni ile oluşan frekans kaymalarına rağmen, bu çalışmadaki yapı ile Ziolkowski'nin kullanmış olduğu yapının aynı şekilde tepki verdiği görülmüş, elde edilen sonuçların genel olarak literatür ile uyum içerisinde olduğu kanaatine varılmıştır [22].

Gelecekte yapımında avantaj sağlayacak ince, tek katmanlı, dar-dual band, bant durduran karakteristiğe sahip frekans seçici yüzey tasarımı Ünalı S., Gonca Çakır G., Sibel Çimen S. ve Ayten U.E.'nin 2014 yılındaki yapmış oldukları çalışmalarında sunulmuştur. Bu yapılarda dar bantta dürtü tespiti (impulse detection), dar bant haberleşme gibi bazı pratik uygulamalarda; bant dışı iletimin engellemesinde ya da uygun spektrumun kullanımını arttırmak için kullanılmıştır. Dielektrik tabakanın her iki yüzeyinde iki farklı metalik yapı bulunmaktadır. Tasarlanan FSY 8.429 GHz ve 11.485 GHz frekanslarında dar-dual bant, bant durduran filtre gibi çalışmaktadır. Yapının iletim katsayısı grafiğinde -3 dB kazancında alt bant genişliği % 0.007, üst bant genişliği % 0.008 olarak ortaya çıkmıştır. Sunulan tek katman FSY tasarımı λ_1 alt çalışma frekansında dalga boyu olmak üzere, kalınlığı $0.035 \lambda_1$ ' dir. Sonuç olarak ön yüzde metalik kare yama, daire açıklık, artı açıklık ve arka yüzde metalik artı yamadan oluşan ince, tek katman, dar-dual bant FSY önerilmiştir. Ayrıca tasarlanılan ürünün ince olması kaplamada daha kolay olacağı görülmüştür. Çalışmada FSY yapısının kalınlığı, dielektrik katsayısı ve geometriye ait ölçülerin değiştirilmesiyle oluşan yeni FSY farklı frekanslardaki uygulamalarda kullanılabilmesi için sunulmuştur [23].

Bu çalışmada yeniden tasarlanmış (modifiye edilmiş) Yarıkli Kudüs Haçı (MJC-Modified Jerusalem cross) üzerine çalışma yapılmıştır. Bant geçirgen filtre olarak hareket eden yarıklar düzlem geliş açısına normal olarak yerleştirilmiştir. Metalik yamalar, düzlem dalga etki alanı içerisinde rezonans yapı olarak hareket ederek, kapasitif ve indüktif yüzey oluşturur. Üç farklı Modifiyeli Kudüs Haçı tasarlanmıştır. MJC1; daha yüksek rezonans frekansı ve daha yüksek bant genişliğine sahiptir. MJC2;

ilk rezonans frekansı daha yüksek rezonansa ve daha yüksek bant genişliğinde çalışır. Fakat ikinci rezonans frekansı bant genişliği daha azdır ve rezonans frekansı JC'den daha yüksek olduğu görülmüştür. MJC3; yaklaşık olarak aynı rezonans frekansında ve daha yüksek bantlardadır. Düşük frekanslarda daha önceden yapılan anten radomlarında, FSY'ler gelen sinyal açısına karşı daha az hassas olan nispeten küçük elektriksel boyutlarındadır. Temel polarizasyonda yönlerinde simetrik FSY yapılarında yatay ve dikey yönlerde eşit değer göstermiştir. Bahsi geçen FSY'ler için genel özellik olarak rezonans elementlerinin rezonans ölçüleri ve aralıkları çalışılması istenilen frekansın dalga boyunun yarısı ile kıyaslanabilmektedir. Tasarlanılan JC FSY'deki rezonans frekansındaki değişim etkileri olan bant genişliği ile boşluklardaki değişim aşağıda sunulmuştur.

a) Uçlarda bulunan son kapasitans parçasının merkeze alınmasıyla rezonans frekansı ile boşluklar arttıkça bant genişliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.

b) Son kapasitansın uzunluklarının artması rezonans frekansının, bant genişliğinin ve boşluğun azalmasına neden olmuştur (MJC1).

c) Dielektrik levha üzerinde bulunan yapının genişliğini arttırarak rezonans frekansı, boşluk ve bant genişliğinin arttığı görülmüştür. Birinci rezonans frekansta en yüksek rezonans frekansı ve bant genişliğinde olduğu tespit edilirken, ikinci rezonans frekansı için en düşük bant genişliği ve rezonans frekansının en yüksek olur.

d) Yapılardaki dolgunluklar boşlukları kapatacak kadar büyüdüğünde ise, sanki metal parçaymış gibi hareket etmektedir. Burada rezonans frekansı ve boşlukta çok az değişiklik olduğu tespit edilmiş, fakat daha ince yükte bant genişliği 3 dB kazanç değeri daha yüksektir. Sonuç olarak farklı geometri ve parametrelerdeki JC üzerindeki etkiler araştırılmıştır. Bütün JC ve MJC'ler aynı birim hücre ebatlarına sahiptir. MJC'ler radom yapıları için uygun yapılardır [24].

Bu çalışmada tasarlanılan yeni S-şeklindeki metal iletken dielektrik levha üzerine yerleştirilmek suretiyle çokbantlı frekans seçici yüzeyler kullanılarak TE (Transverse Electric-İletilen Elektrik) düzlemsel dalga incelenmiştir. S-şekli üç yatay (x- yönünde) ve iki dikey (y-yönünde) olmak üzere beş koldan oluşmaktadır. Ayrıca S-seklinin bükülü kısımları 90^0 açılı olup toplamda dört köşe olarak tasarlanmıştır. Dielektrik levha iki hava ortamı arasında olup S-şeklindeki iletkenler levhanın ön yüzeyine periyodik olarak yerleştirilmiştir.

Tasarlanılan şekil dielektrik levha üzerine periyodik olarak yerleştirilmiştir. Üst üste çakışan metal parçalarda meydana gelen elektromanyetik dalganın indüklendiği bilinmeyen akım katsayıları Sinüs Temel Fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Meydana gelen rezonans frekanslarının S-şeklinin kol uzunlukları ile birim hücre boyutlarına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. S-şeklinin farklı bantlarda; X bandında (8-12 GHz), Ku bandında(12-18GHz), K bandında (18-26 GHz) ve Ka bandında (26-40GHz) bant durduran filtre gibi davrandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca S-şeklinin diğer bir özelliği olarak X ve Ku bantlarında 1.5 GHz 'de gelen bütün dalgayı geçirdiği tespit edilmiştir. Buradan S-şeklinin kol uzunluklarındaki ve bant aralıklarındaki değişikliğin rezonans frekansına ve bant aralığının belirlenmesinde önemli bir etken olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca S-şekli DC'den Ku bandına kadar tamamen geçirdiğinden alçak geçiren filtre olarak kullanılabilir. Çok bantlı (X, Ku, Ka ve K) bantlarında ise bant durduran uygulamalarda kullanılabilineceği kanısına varılmıştır [25].

Bu çalışmada U-şeklinde tasarlanmış iletken elemanların dielektrik levha üzerine periyodik olarak yerleştirilerek oluşturulan frekans seçici yüzeyin özellikleri incelenmiştir. Simülasyon çalışmanın desteklenmesi amacıyla, alt eleman olarak FR4 dielektrik kullanılarak baskı devresi yapılmıştır. U-şekilli iletken elemanlar birim hücre içerisinde farklı (tekli, ikili ve dördü) yapılarla dizilerek ölçümleri yapılmıştır. FSY'de yansıma ve iletim karakteristiği; kullanılan malzemelerin cinsi, katman kalınlığı, düzlemsel dalganın geliş açısı ve polarizasyonu, katmanlar üzerine yerleştirilen metalik yamaların boyutları, geometrisi ile periyodik yerleşimi ve simetri ekseninin konumuna göre değiştiği bilinmektedir. FSY'de yansıma ve iletim katsayıları frekansa göre değişmekte ve bir mikrodalga frekansında tamamen yansıtıcı özellik gösterirken, başka bir frekansta tamamen geçirgen özellik gösterebilmektedir. Periyodik metal iletkenlerden oluşan FSY'ler, elektromagnetik filtre ya da polarizasyon dönüştürücü gibi davranmaktadır. CST MWS programı kullanılarak yapılan simülasyonda frekans aralığı olarak 1-22 GHz kullanılmıştır. TE dalga uygulanması tekli U şeklinde 13 GHz seviyelerinde rezonans oluştururken, TM uygulanması durumunda 6 GHz ve 15 GHz seviyelerinde rezonans sağladığı görülmüştür. İkili U şekline TE uygulanması durumunda 12 GHz ve 21 GHz seviyelerinde rezonans oluşurken, TM uygulanması durumunda 5 GHz, 10 GHz ve 15 GHz seviyelerinde 3 farklı noktada rezonans oluşmuştur. Farklı kol uzunluklarına

sahip dörtlü U Şekline TE ve TM uygulanması durumunda 9 GHz ve 21 GHz seviyelerinde rezonans oluşmuştur. Bunun nedeni grup FSY'nin birim hücre içerisinde 90'ar derece döndürülerek yerleştirilmiş olmasıdır. U Şekli sayısı arttııka rezonans etkisinde de artış görülmüştür. Manyetik alanın yön deĐiŐtirmesi nedeniyle S21 değerinin minimum olduğu noktalarda elektrik alan dağılımları kolların u noktalarında maksimum, yüzey akım dağılım yönleri S21 değerinin maksimum ve minimum olduğu noktalarda birbirine zıt yönlü olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak tasarlanılan üç farklı U-Şekli FSY'lerin karakteristiği incelenmiştir. İletimin maksimum olduğunda elektrik alan ve yüzey akım değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarlanılan Şekillerde manyetik dalgaya karşı bant durduran ve bant geçiren filtre gibi davrandığı görülmüştür. Simulasyon ve deneysel sonuçların birleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Tasarlanılan U-Şekli FSY'ler X, Ku ve K bantlarında bant durduran filtre uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [26].

Yukarıda FSY'ler hakkında, farklı özellik ve amaçlarda hazırlanmış olan yapılar incelenmiştir. Son olarak analiz edilen iki makale hedeflenen yapıların temelini oluŐturmaktadır. Sırasıyla aşağıda sunulmuŐ makaleler detaylı incelenmiş ve elde edilen verimliliğin arttırılması hedeflenerek yeni tasarımlar elde edilmiştir. Detaylı incelemeleri yapılan makaleler hakkında elde edilen sonuçlar sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

Kesavan A., Karimian R., ve Denidni T.A.'nın hazırlamış oldukları makalede; U ve V bandlarında, geniş band frekans yansımaları sağlamak maksadıyla, frekans seçici yüzeylerin tasarımlarını hedeflenmiŐlerdir. Bu FSY yapıları klasik Kudüs Haçı ve Fan Őekillerinde olmak üzere, her iki yüzeyinde tek katman dielektrik levha olan Rogers R04003 yapısı üzerine yapılmıştır. Bu yapı 30 GHz'de geniş band durduruculu ve normal etki alanı için 16 db'den fazla snleme sergilemiştir. Doğada birim hücre simetrik olduğundan, TE ve TM alıŐma modlarında aynı sonuçları vermiŐtir. FSY'den bir panel oluşturulmuş ve geçerli uygun simülasyon sonuçları için ölüm yapılmıştır. MIMO antenlerde iki taraflı eŐlemedeki azalma ve milimetrik-dalga kalkanı için bu tasarım uygun bulunmuştur. Parametrik yapılan çalıŐmalarda; boyutların birim hücredeki band aralığının genişliği ve rezonans frekansı üzerine etkiler analiz edilmiştir. Fan Şeklindeki yapının daire yarıçapının, hücresel verinin band aralığının genişliğini etkileyebildiği görülmüştür. EĞer yarıçap 0,4mm'den 0,25 mm düŐürülürse, band aralığı %56,75'den %44'e düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni

birleşik Fan şekli ve Kudüs Haçı arasındaki azalmadandır. Sonuçta birim hücre rezonans frekansı, Kudüs Haçı kolunun uzunluklarını değiştirerek ayarlanabilmiştir. Geniş band rezonans, Kudüs Haçı kolunun büyütülmesi sayesinde düşük frekansa doğru değiştiği tespit edilmiştir. Bu yapı 40 GHz'den 70 GHz kadar 30 GHz'lik geniş bant aralığında kazancı 16 dB'den fazla, etkili ve iyi kapsama alanı sağladığı anlaşılmıştır. U ve V bandında kullanılmasına rağmen, milimetre dalga kalkan alanlarda da kullanılabilir. Üretilen prototip geniş bant FSS ile ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuç göstermiştir ki; simüle edilen ürün ile aynı sonucu verdiği elde edilen değerler sonucunda anlaşılmıştır. Yani simüle edilen ile gerçeği üretilen yapının sonuçları aynı çıkmıştır [27].

4G, X-bandı ve Ku-bantları için geniş bant yansıma sağlayan frekans seçici yüzey reflektörü Sarika, Malay R. Tripathy, ve Daniel Ronnow tarafından önerilmiştir. Geniş bantlı FSY reflektör, FR4 dielektrik levhanın ayrı katmanları üzerinde kazınmış, çift katmanlı yama FSY'den oluşmuştur. Hedeflenen frekans aralığı 5-16 GHz'dir. İki katman ile 10.4 GHz'lik geniş bir bant durdurucu yapı elde edilmiştir. Simüle edilmiş sonuçlara yaklaşmak için Eşdeğer Devre (EC) yöntemi kullanılır. FSY katmanlarının çeşitli kombinasyonlarının etkisi ve düzenlerini anlamak için kapsamlı bir parametrik çalışma yürütülmüştür. Ölçülen ve benzetilmiş sonuçların iyi olarak kabul edildiğinden, FSY paneli üretilmiştir. Her bir levha; $\epsilon_r=4.4$, kayıplı tanjantı 0.002 ve yükseklik 1.6 mm boyutlarına sahip olan FR4 dielektrik levha üzerine uygulanarak tasarlanmıştır. Her tabakanın iletim katsayıları, FEM manyetik çözücü HFSS yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Katman I ile 1.1 GHz'lik bir bant genişliğine sahip olan 6.4 GHz merkezi frekansa sahip bir durdurucu bant elde edilmiştir. Katman II, 6.8 GHz ve 14.6 GHz'de çift bantta rezonans sağlamaktadır. Bu durumda elde edilen bant genişliği sırasıyla 2.4 GHz ve 600 MHz'dir. Tabaka III'de, 11.3 GHz'de merkez frekansında, 8.6 GHz'lik geniş bir bant durdurucu etkisinde rezonans frekansı oluşmuştur. I. ve II. tabakalar kademeli olarak dizildiğinde, 7.7 GHz'lik merkezi frekansın etrafında maksimum 3.6 GHz bant genişliği sağlayan çift bant durdurucu yapı üretilmiştir. Katman I ve katman III'ün kademeli olarak dizilmesi, 10.6 GHz'lik merkezi frekansın etrafında 7.6 GHz'lik geniş bir durdurucu bant ile sonuçlanır. Katman II ve katman III kademeli olarak dizildiğinde geniş bantta, 10.4 GHz gibi daha yüksek değere ulaşmıştır. Bununla birlikte, I-II-III tabakaların kademeli olarak dizildiğinde, II ve III. Katmanların birleşiminden bant durdurucu frekansından

1.4 GHz'lik gerileme göstermiştir. Sonuç olarak, 5.2-15.6 GHz frekans bant aralığında, çift katmanlı geniş bantlı FSY reflektörü sunulmuştur. Bu reflektörün avantajları 10.4 GHz'lik geniş bant ve tasarımın sadeliğidir. Reflektör, uygulamanın etkilerini 4G, X-bandi ve Ku-bandlarında göstermektedir. Çift katmanlı prototip olarak üretilen FSY'nin sonuçları ile simülasyon sonuçları birbiri içinde iyi bir uyum göstermiş ve bu nedenle önerilen tasarımın metodolojisini haklı çıkarmıştır [28].

1.3 Hipotez

Frekans seçici yüzeyler üzerine farklı makaleler incelenerek geniş band, band durdurucu karakteristik gösteren bir yapı tasarlanması hedeflenmektedir. Öncelikli olarak iki ya da daha fazla frekans bandını kapsayan, yüksek frekansta rezonans sağlayan bir makale üzerinde yoğunlaşarak yeni bir yapının önerilmesi hedeflenmektedir. İncelenen makaledeki yansıma frekans band genişliğini arttırmak için tasarlanan yapının genişliği, uzunluğu, kalınlığı gibi parametreler üzerinde değişiklik yapılmak suretiyle denemeler yapılacaktır. Tasarlanması hedeflenen yapılarda F Şekli temel alınan şekildir. Tasarımda kullanılacak diğer şekilleri ise F Şekline üzerine ya da ters yüzeyine yerleştirmek suretiyle geniş bir bantta band durduracağı değerlendirilmiştir. Tasarlanan bu yapıları, kaybın en az olduğu değerlendirilen FR4 dielektrik levha üzerine uygulayarak yansıma frekansına en az etkiyi edeceği değerlendirilmektedir.

U (40-60 GHz) ve V (50-75 GHz) bandlarının tamamını kapsayacak ve rezonans frekans bant genişliğini -10 dB kazanç değerinde en üst seviyede tutmak maksadıyla, F şeklinde yapıların tasarımları oluşturulacaktır. Elde edilen bant genişliğinin arttırılmasında en önemli etkisi olan dielektrik levhanın kalınlık ve farklı maddeden tasarlanmış olan yapıları ayrı ayrı denenecek ve en çok verim sağlayan alt tabaka kullanılacaktır. Özellikle piyasada tedarik edilmesi kolay olan FR4 dielektrik levha üzerinde durulacak ve elde edilen sonuçların verimliliğine göre levhaların tercihine öncelik verilecektir. F şekli ile Çapraz Dipol şekillerinin ilk olarak tek tek ölçümleri alınacaktır. Beklenen verim elde edilemezse iki yapı birleştirildiğinde daha yüksek verim elde edilecektir. Ayrıca tasarlanan yapının sadece -10 dB değerindeki kazancı değil, -16 dB değerinde de kazancı incelenecektir. FSY'nin karakteristiğinin mümkün olduğunca dalganın geliş açısından bağımsız olması amaçlanmaktadır.

F şeklinde tasarlanan yapının farklı alanlarda daha fazla verim sağlayacağı değerlendirilmektedir. C-bandı (4-8 GHz), X-bandı (8-12 GHz) ve Ku-bandı (12-18 GHz)'nin tamamını kapsayacak şekilde rezonans sağlaması maksadıyla dielektrik levhanın bir yüzeyine F şekli uygulanacaktır. F şeklinde elde edilen verim yeterli seviyede olmazsa dielektrik levhanın diğer yüzeyine yeni tasarlanan iç içe kare içerisinde bulunan II şekli uygulanacak ve C-bandı (4-8 GHz), X-bandı (8-12 GHz) ve Ku-bandı (12-18 GHz)'nin tamamını kapsayacak şekilde rezonans sağlayacaktır. F ve II şeklinde tasarlanan FSY'nin karakteristiğinin mümkün olduğunca dalganın geliş açısından bağımsız olması amaçlanmaktadır. Tasarlanan her iki yapı sistem korumasında çeşitli mm dalga uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılarak verim arttırılacaktır.





2. RADYO DALGALARININ YAYILIMI

İletilen radyo dalgası alıcı istasyona iletim ortamı ile ulaştırılır. Bu iletim ortamı hücresel şebeke terimlerinde radyo kanalı olarak da bilinir. Alıcı ile verici arasındaki görüş hattında binalar, dağlar ve geniş yapraklar nedeniyle iletişim esnasında farklılıklar gösterebilmektedir. Sabit ve öngörülebilir kablolu kanalların aksine, radyo kanalları son derece karışık ve kolay analiz edilemez bir yapıdadır. Radyo kanalında ki elektromanyetik dalgaların yayılımından sorumlu temel fiziksel olaylar alt başlıklar halinde aşağıda sunulmaktadır.

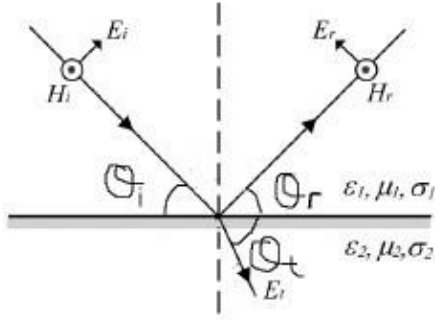
- Yansıma
- Kırınım
- Saçılma
- Çok yönlü yayılım

2.1 Yansıma

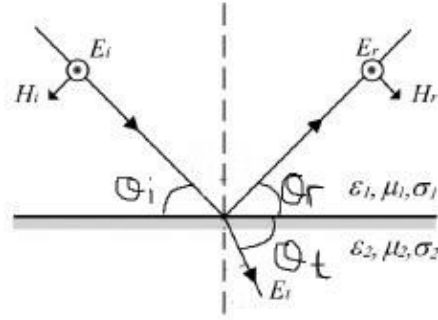
Radyo dalgasında yansıma olayı giden dalganın boyunun gelen dalganın boyundan belirgin derecede büyük pürüzsüz bir engelle karşılaştığında ortaya çıkar bu nesnelere örneğin zemin, bina ve herhangi bir duvar olabilir. Böyle bir durumda birinci ortamda farklı elektriksel özelliklere sahip olan bir ortamda yayılım gösteren radyo dalgasının enerjisi ikinci bir ortama aktarılır ve enerjisinin bir kısmı ilk noktaya yansır. Radyo dalgaları mükemmel bir dielektrik ortam ile karşılaşır bir miktarı geri yansır, geri kalan dalgalar herhangi bir enerji kaybı yaşanmadan iletilir. Fakat ikinci ortam mükemmel bir iletken ise, tüm enerji herhangi bir kayıp olmaksızın geri yansıtılır. Kapalı alan yayılımı için radyo dalgası iletimi önemlidir. Bunun nedeni de baz istasyonu, binanın dışına veya içerisine yerleştirilir; dalga, alıcıya ulaşmadan önce duvarlara ve zemine nüfuz eder. Radyo dalgalarının yansıması öncelikle yansıtıcı

yüzeyin iletkenliği ve geçirgenliğine, ayrıca gelen dalganın geliş açısına, polarizasyonuna ve frekansına bağlıdır. Fresnel yansımaya katsayısı “T” şeklinde gösterilir [29].

a)



b)



Şekil 2.1 : Düzlem dalganın yansımaları ve iletimi **a)** TM polarizasyonu (kutuplaşması) **b)** TE polarizasyonu (kutuplaşması) [30].

Şekil 2.1’de etki noktasındaki yüzey normaline θ_i açısı ile gelen polarize EM dalgasını göstermektedir. Gelen dalganın bir kısmı normal olarak yansımaya açısı θ_r olan aynı ortama yansır ve bazıları iletim açısı θ_t yaparak ikinci ortama aktarılır. Şekil 2.1’de i, r ve t alt simgeler sırasıyla; gelen, yansıtılan ve iletilen alanları belirtir. Parametreler $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$ ve $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$ sırasıyla iki ortamın dielektrik sabitini, geçirgenliğini ve iletkenliğini temsil eder. Genellikle mükemmel (kayıpsız) dielektrik sabitinin geçirgenlik yoğunluğuna ϵ_r , öyle ki $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ olarak hesaplanır. Burada $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m olarak alınır. Eğer dielektrik materyal kayıplı ise, gücü emecek ve karışık bir dielektrik sabiti hesaplama formülü ile gösterilebilecektir [29,30].

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r - j \epsilon' \quad (2.1)$$

burada,

$$\epsilon' = \frac{\sigma}{2\pi f} \quad (2.2)$$

olarak alınmıştır. σ materyalin Siemens/metre ile ölçümünü göstermektedir.

Bir kutuplanmış EM dalga elektrik iletimi (TE) ve manyetik iletim (TM) olmak üzere iki dikey polarizasyona ayrışabilir. Elektrik alan bileşeninin (E), giriş düzlemine paralel olduğu bir polarizasyon durumu, Şekil 2.1 (a) 'da gösterildiği gibi TM (aynı

zamanda dikey veya paralel olarak da bilinir) manyetik iletim olarak bilinir. Benzer şekilde, elektrik alan bileşeni, giriş düzlemine dik ise, Şekil 2.1 (b) 'de gösterildiği gibi TE, yatay veya dikey polarizasyonda elektrik iletimi olarak bilinir.

Şimdi, Snell yasasına göre, geliş açısı yansıyan açıya eşittir ($\theta_i = \theta_r$) ve geliş açısı, aşağıdaki denklem ile aktarılan açıyla (θ_t) bağlantılıdır [31, 32].

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}} \quad (2.3)$$

Yansıma katsayısı, yansıyan dalganın gelen dalgasına oranıdır. Benzer şekilde, iletim katsayısı, iletilen dalganın gelen dalgasına oranıdır. Bağlantılıdır [31, 33].

TE polarizasyonu için;

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}, \quad (2.4)$$

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}. \quad (2.5)$$

TM polarizasyonu için;

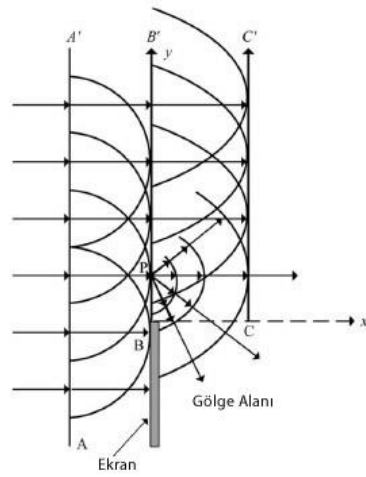
$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_1 \cos \theta_i - \eta_2 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i}, \quad (2.6)$$

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2\eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i}. \quad (2.7)$$

Burada Γ yansıma katsayısıdır; τ iletim katsayısıdır; sırasıyla ortam 1 ve ortam 2' nin gerçek empedansıdır.

2.2 Kırınım

Radyo dalgalarında kırılma sinyalin keskin, düzensiz yüzeylere sahip engeller ile karşılaşmasından oluşur. Kavisli yapıya sahip olan yeryüzünde radyo dalgalarının yayılması, yeryüzü üzerinde bulunan doğal veya yapay şekillerden dolayı meydana gelen kırınımdan kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, kırılmış dalga gölgeli bölgedeki ikincil dalgacıkların yayılmasıyla üretilir. Böylece, tüm ikincil dalgacıkların elektrik alan bileşenlerinin vektör toplamı, kırınım dalgasının alan kuvvetini verir [30].



Şekil 2.2 : Huygen'in ilkesinin örnekleme [30].

Şekil 2.2 Huygen ilkesine ait kırılma doğal olayını göstermektedir. Düz çizgi A' A, gelen radyo dalgasının sonsuz dalga cephesini temsil eder. Bu dalga cephesinin her noktası, B'B düz hattı tarafından temsil edilen yeni dalga cephesini oluşturmak için ikincil dalgacıkları (yarı daireler) üretir. Dalga cephesi, dalga önü B'B'nin nokta kaynağının parçalarını ortadan kaldıran bir engelle karşılaşır, yalnızca yarı-sonsuz bir dalga cephesi C'C çıkar. Dolayısıyla Huygen'in ilkesine göre, B'B'nin her noktasından üretilen dalgacıklar (varsayalım P) gölge bölgesine yayılır.

2.3 Saçılma

Saçılma dalgası, dalganın dalga boyuna göre boyutları küçük olan nesnelere karşılaştığı zaman meydana gelir. Saçılan dalgalar pürüzlü yüzeyler veya küçük nesnelere tarafından oluşturulur. Düz bir yüzeye çarptığında radyo dalgası speküler bir doğrultuda yansır. Ancak yüzey gittikçe daha pürüzlü hale geldiğinde, yansıyan dalga Şekil 2.3'te gösterildiği gibi saçılma nedeniyle tüm yönlere yayılmıştır. Bu, speküler doğrultuda enerjiyi azaltır ve enerjiyi diğer yönlerde artırır [33].



Şekil 2.3 : Yüzey pürüzlülüğünün yansımaya üzerindeki etkisi.

Saçılma derecesi yüzeyin pürüzlülüğüne, geliş açısına (θ_i) ve gelen dalganın dalga boyuna bağlıdır. Yüzeyin pürüzlülüğü, denklem (4.6) ile verilen Rayleigh kriteri kullanılarak tahmin edilebilir.

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i} \quad (2.8)$$

Bu kritere göre, yüzey darbe yüksekliği h_c 'den düşükse, yüzey pürüzlü kabul edilir. Pürüzlü yüzey için, yansıyan alanın azaltılması karşılık gelen yansımaya katsayısının (Γ) çarpma kayıp faktörü (ρ_s) ile çarpımı ile hesaplanabilir. Yüzey yüksekliği h ve ortalama yüzey σh etrafındaki standart sapma için saçılma kayıp faktörü verilmiştir; [29].

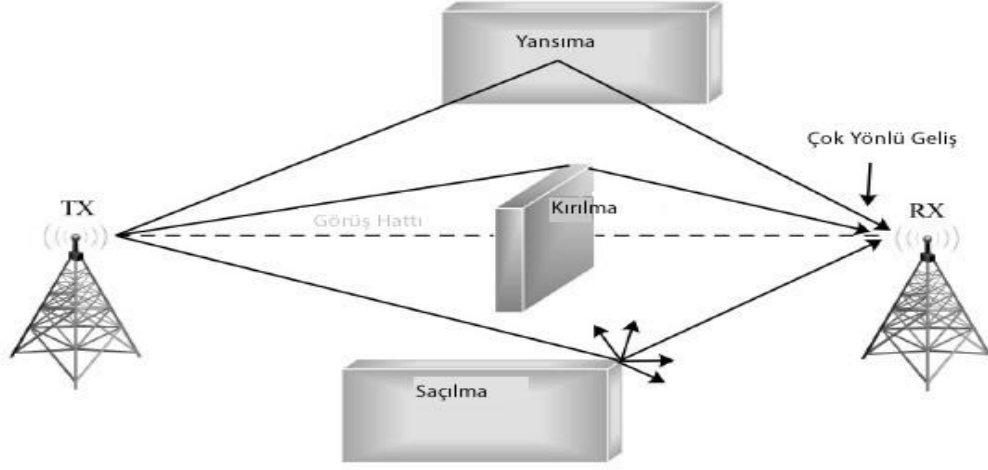
$$\rho_s = \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (2.9)$$

Bu nedenle pürüzlü yüzey ($h > h_c$) için yansımaya katsayısı

$$\Gamma_{\text{pürüzlü}} = \rho_s \Gamma \quad (2.10)$$

2.4 Çok Yönlü Yayılım

İletilen radyo dalgasının çoklu kopyaları, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, yansımaya, kırınım ve saçılma gibi olgular nedeniyle alıcıya farklı yollarla ulaşır. Bu çok yollu sinyal bileşenleri rasgele faz ve genliklere sahiptir. Böylece, çoklu sinyal bileşenleri alıcıda yapıcı veya yıkıcı olarak birleşebilir. Alınan iki sinyal aynı faza sahip ise, genel olarak alınan sinyaller yapıcı bir şekilde birleşirler ama fazları aynı değil ise toplam sinyalde zayıflamalar görülür. Fakat alınan sinyaller arasındaki faz farkı 180° ise, birbirlerini söndürürler ve bu nedenle iletilen dalga alınamaz. Sinyal, alıcıya ulaşmadan önce farklı yollarla iletiğinden, sinyaller farklı zaman aralıklarında ulaşacaktır. Böylece, sinyal yayılımı gecikme yayılımı sonucunda (özellikle frekans) zamanla meydana gelebilir. Gecikmeli yayma, ilk ve son alınan çoklu yol bileşeni arasındaki zamandır.



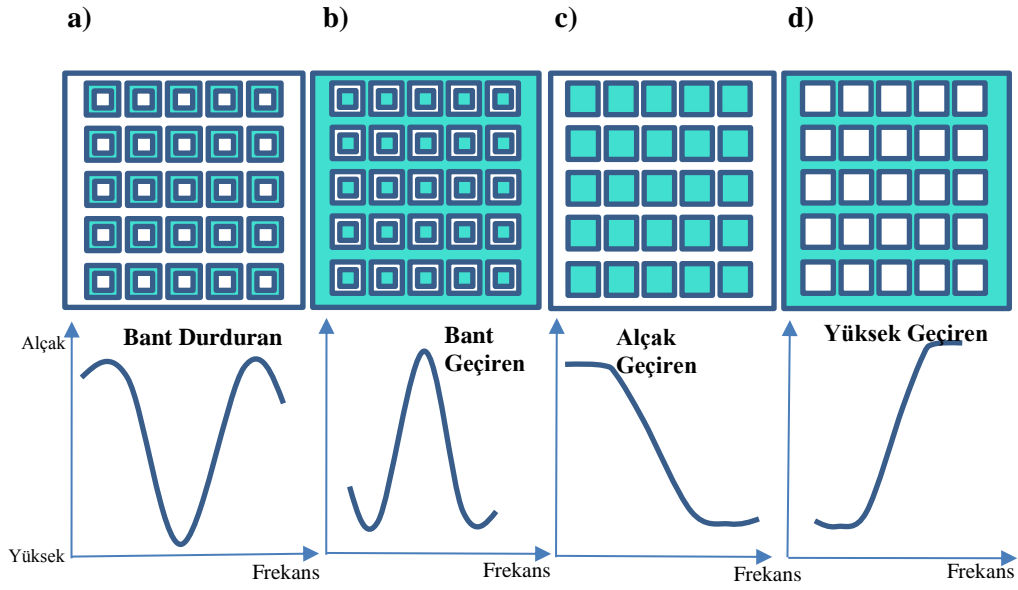
Şekil 2.4 : Çok yönlü doğal yayılım [34].

Şekil 2.4 yansıma, kırınım ve saçılma yoluyla alınan sinyallerin geldiği doğal çoklu yolu göstermektedir. İletim (TX) ve alıcı (RX) anteni arasında engel yoksa, düz noktalı bir çizgi ile gösterilen güçlü bir görüş hattı bileşeni var demektir.

3. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERE GİRİŞ

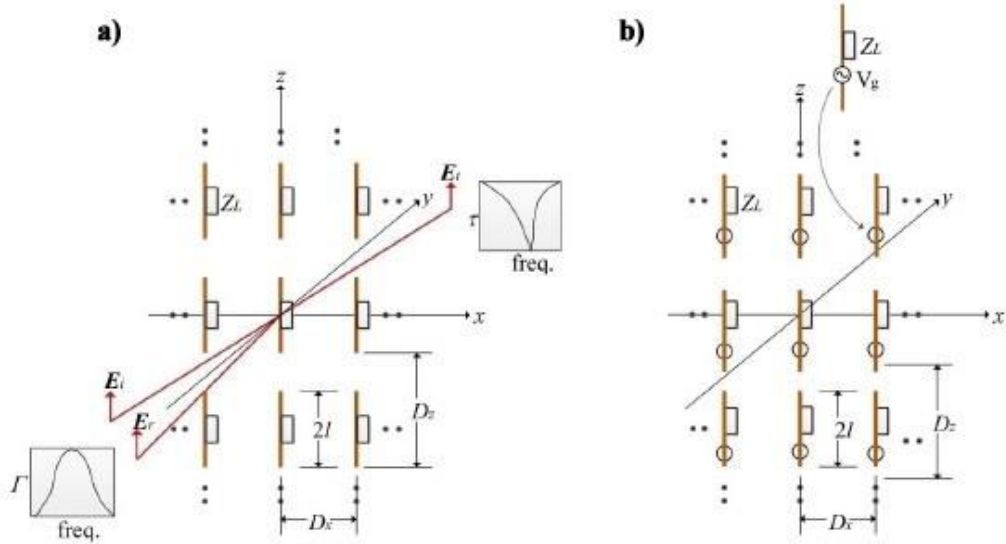
3.1 Tanımlar

Frekans seçici yüzey; gelen elektromanyetik dalganın frekansına göre yansıma ya da iletim sağlayan aynı zamanda elektromanyetik filtre görevi gören bir yapı olarak da tanımlayabiliriz [3,35-37]. Bu yapı doğada metalik bir yüzey olarak tasarlanmış, yansıma veya iletim özelliklerine bağlı olarak adlandırılan bir malzeme ifadesi ile de tanımlanabilir [36]. FSY'nin en küçük özdeş elemanı bir veya daha fazla eleman içerebilir ve birim hücre olarak adlandırılır. Bu birim hücreler, yapının tamamını oluşturmak için periyodik olarak bir ya da iki boyutlu dizi halinde düzenlenir. Genellikle, birim hücre, dielektrik bir levha üzerine iletken yama veya iletken bir yüzeyin farklı geometrik şekillerde yarı (açıklık) elemanına sahip olan tamamlayıcı şekillerden meydana gelmektedir. Yama (patch) şeklinde tasarlanan yapılarda kapasitif etki oluşurken, oyuk (aperture) şeklinde tasarlanan yapılarda ise endüktif etki oluşmaktadır. FSY'deki yüklü düzlem dalgası ya rezonans frekansı çevresinde yansıtılır ya da iletilir. İletken yamalar içeren FSY'ler, rezonans frekansta değilken hemen hemen tüm yüzeyde EM dalgalarını yansıtırken, rezonansa yarıklardan neredeyse tüm EM dalgalarını iletir [3]. Böylece, FSY, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, yüksek geçiren, düşük geçiren, bant durdurucu ve bant geçiren filtreler olarak tasarlanabilir. EM filtrenin özellikleri esas olarak FSY'nin eleman türüne ve şekline bağlıdır.



Şekil 3.1 : Dört çeşit EM filtresi; a) Bant durdurucu b) Bant geçiren c) Düşük geçiren d) Yüksek geçiren. Yeşil, iletken kısmı temsil eder.

Dipol yapıları analizlerde temel yapı olarak alınmaktadır, çünkü diğer eleman tiplerinin çoğunun temeli budur. Dipol elemanları, Şekil 3.2' de gösterildiği gibi eleman uzunluğu $2l$ ve elemanlar arası aralık D_x ve D_z ile iki boyutlu sonsuz dizi halinde düzenlendiğini varsayalım. İki kutuplu eleman, uzunluğu gelen dalganın dalga boyunun yarısına eşit olduğunda rezonans olacaktır. Her dipol yük empedansı Z_L ile ortasına yüklenir. Bu tür dizilim uyarılma yöntemine bağlı olarak pasif ve aktif dizi olarak kategorize edilebilir. Pasif dizi için yapı, Şekil 3.2 (a) 'da gösterildiği gibi bir yüklü düzlem dalgası E_i tarafından uyarılır ve aktif dizi için yapı, Şekil 3.2 (b) 'de gösterildiği gibi her elemana bağlı bireysel üreteçler (V_g) tarafından harekete geçirilir [9].



Şekil 3.2 : Birim hücre olarak dipollü FSY (a) Pasif dizi (b) Aktif dizi [9].

Aktif dizi için, her gerilim üreticinin FSY olarak çalışması için aynı genlik ve doğrusal faz varyasyonuna sahip olması gerekir. Ancak pasif dizi durumunda, gelen düzlem dalgası (E_i) kısmen geri yansiyacak ve kısmen ileri yönde (E_t) iletilecektir. Rezonans durumunda E_i , E_r ve E_t sırasıyla gelen, yansıyan ve gönderilen düzlem dalga genlikleri ise, yansıma katsayısı (Γ) ve iletim katsayısı (τ) şu şekilde tanımlanabilir:

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i}, \quad (3.1)$$

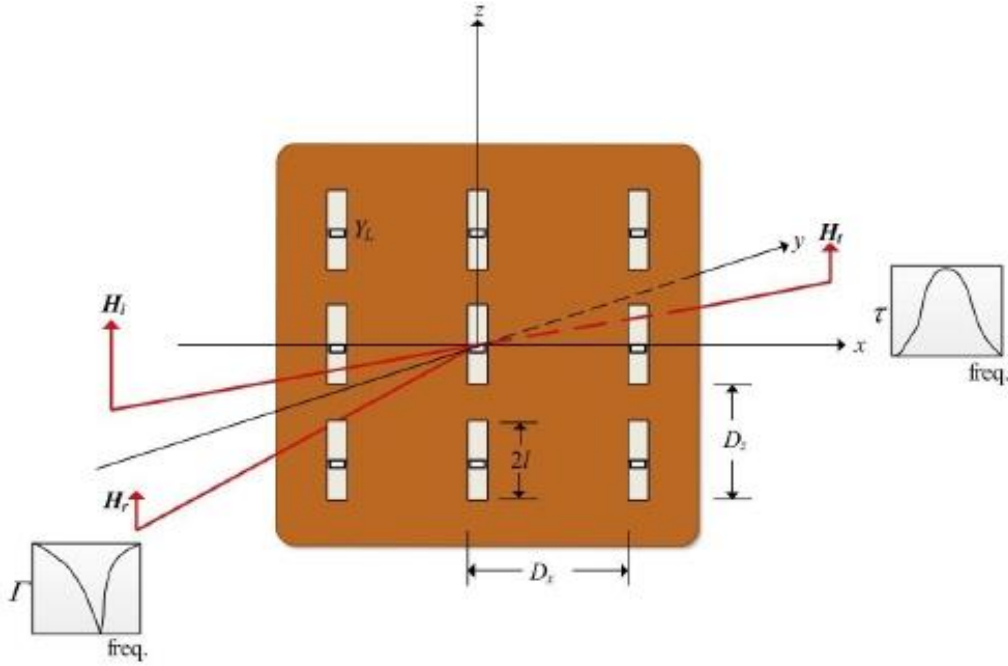
$$\tau = \frac{E_t}{E_i}. \quad (3.2)$$

Aktif dizilerin uygulamada FSY olarak gerçekleştirilmesi güç olduğundan, yalnızca pasif diziler FSY olarak kabul edilmektedir.

3.2 Tümlayıcı Diziler

Tümlayıcı diziler, benzer formdaki ışık geçirmez ve yarıklı elemanlardan oluşan bir dizi olarak tanımlanabilir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi yük girişi Y_l 'e sahip yarık dizilerini göz önünde bulundurduğumuzda; bu tür dizilerin, daha önce bahsedildiği gibi pasif veya aktif olarak da uyarılabilir olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 3.2'deki dipol dizisi ile Şekil 3.3'deki yarık dizisi arasındaki ana farklılık; dipol tellerindeki elektrik akımlarının dipol durumunda uyarılması ve yarık halinde manyetik akımlar oluşmasıdır (yani, yuvalarda bir voltaj dağılımı vardır). Manyetik akımlar hayalidir, yani bunlar yoktur. Bununla birlikte, yarıklarda bulunan elektrik alanı, denklik

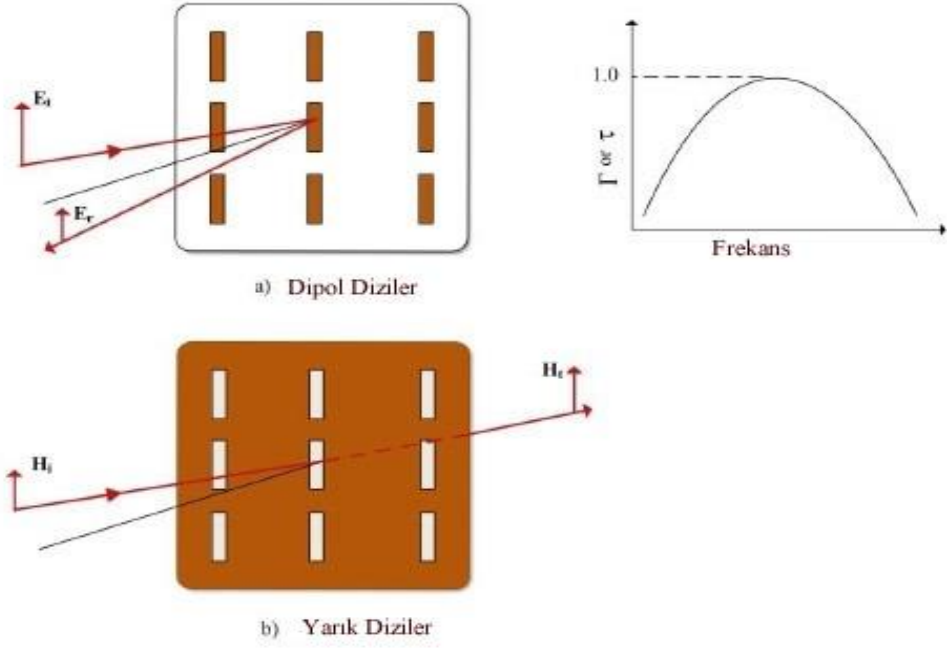
prensibi ile bir manyetik akım yoğunluğuna denk olarak gösterilebilir [37]. Manyetik akım yaklaşımı, dipol ve yarık kutuları arasında çok istenen bir simetri ilişkisine yol açar [9]. Dipol durumu içindeki elektrik alanı ve yarık durumlarındaki manyetik alan oldukça benzer ve simetriktir. Frekansla yansımaya ve iletim katsayısının grafikleri Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Yansıtma katsayısı aralığı, gelen dalganın toplam yansımasını gösterirken, iletim katsayısı aralığı, belirli frekansta toplam yansımayı gösterir.



Şekil 3.3 : Yarık Dizisi [9].

Öyleyse, biri diğer formların üstüne yerleştirildiğinde, mkemmelenetken olan düzlem bir nesne oluşur. Optik sistemler için Babinet'in tümleyici ekranlar ilkesinde bir ekran üzerinden iletilen dalgaların toplamı ve tümleyici ekran aracılığıyla iletilen dalgaların toplamı, hiçbir ekranlama yokmuş gibi davrandığından bahseder [38]. Babinet'in tümleyici diziler ilkesine göre elektromanyetik alanlarda bir dizinin iletim özelliği diğer dizinin yansımaya özelliğine benzer [9,35,37].

Şekil 3.4 (a) 'daki dipol dizisinin yansımaya katsayısı (Γ), iletken yapı Perfect Electric Conductor (PEC) (MkemmelenElektrik İletkeni) ve sonsuz inceltiymiş olduğu sürece dielektrik alt yapı malzemesinin yokluğunda, Şekil 3.4 (b) 'deki yarığın geçiş katsayısına (τ) (gelen dalga boyunun 1/1000 dalga boyundan azı), eşittir [36,37,39]. Dolayısıyla, yarık elemanı, dipol elemanının Babinet tamamlayıcısıdır.



Şekil 3.4 : Tamamlayıcı a) Dipol Diziler b) Yarık Diziler (Babinet'in ilkesinin örneği).

3.3 Frekans Seçici Yüzeylerin Oluşumundaki Önemli Özellikler

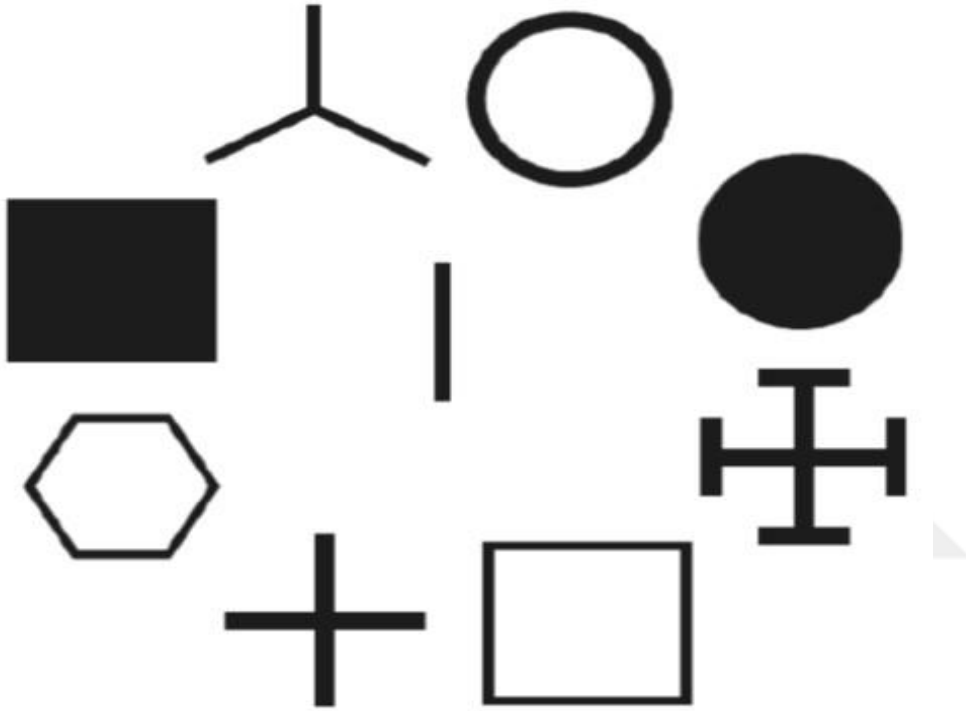
Periyodik yapıyı oluşturan elemanların;

1. Geometrisi,
2. Boyutları,
3. Aralarındaki boşluklar,
4. İletkenliği,
5. Dielektrik levhaların etkileri,
6. Dalgaların geliş açısı,
7. Polarizasyonu

frekans seçici yüzeyin meydana getirilmesinde en önemli etkeler olarak belirtilebilir [9].

3.3.1 Frekans seçici yüzeyin geometrisi

Frekans seçici yüzeyin hangi frekansta nasıl bir etki yaratmasını istediğimizde karşımıza çıkan en önemli etmen geometrik yapısıdır diyebiliriz. Geometriler gelen elektromanyetik dalganın geliş açısına ve polarizasyonuna bağlı hassas olurken, bazılarının daha geniş bir bantta rezonans frekansı sağladığı ve bir kısmının da geniş bantta birden fazla rezonans frekansı sağladığı bilinmektedir.



Şekil 3.5 : Frekans seçici yüzey olarak uygulanan elemanların geometrileri [9].

FSY'nin performansı; aşağıda belirtilen özelliklerin oluşumunda farklılık göstermektedir.

- Açısal sabitlilik
- Bant genişliği
- Bant Ayırma
- Çapraz polarizasyon seviyeleri

Açısal sabitlilik; farklı açılarda gelen sinyalin geliş açılarına karşı FSY biçiminin hassasiyeti olarak tanımlanabilir. Bant geçişlerinden bant durdurma frekans geçişleri veya aktarım ve yansıma merkezindeki frekansların ayrılması için bant ayırımı hesaplar. Çapraz polarizasyon seviyesi, farklı modlarda ki dalgalar (TE ve TM dalgası gibi) arasındaki frekans tepkisi tutarsızlığını verir. Çapraz polarizasyon, arzu edilen polarizasyona dik olan radyasyondur.

FSY'nin eleman geometrileri keyfi olarak seçilebilir, ancak B.A. Munk tarafından sunulduğu gibi, aşağıdaki dört gruba ayrılabilir:

1) **N – kutuplu ya da merkeze bağlı yapılar**; dipol, üçlü kutuplar (tripoles), köşeli çapraz kutuplar (the Jerusalem cross) gibi...



Şekil 3.6 : Frekans seçici yüzeylerde kullanılan 1. Group Şekiller [9].

İletkenin bacak uzunluğu dalga boyunun yaklaşık yarısına eşitse, FSY'nin merkezinde rezonans meydana geldiği görülecektir. Bu yapı; elementin düzleminde olan dipoller gibi elektrik alanı ile doğrusal kutuplaşma meydana gelir. Fakat Kudüs Haçı ve birbirlerini dikey yönde kesen, 90 derece bükülmüş iki elementle bir araya getirilirse bütün polarizasyonda çalışabilir.

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.



Şekil 3.7 : Frekans seçici yüzeylerde kullanılan 2. Group Şekiller [9].

Üretilen halka tipindeki FSY’de rezonans elde etmek için, malzemenin uzunluğu yaklaşık olarak bir dalga boyuna eşit olduğunda meydana gelir.

3) İçi dolu yapılar



Şekil 3.8 : Frekans seçici yüzeylerde kullanılan 3. Group Şekiller [9].

Yarım dalga boyuna yakın olan bu grup yapılardan özellikle kareler, daireler ve altıgenler ise araştırılan ilk yapılardandır.

4) Hibrid yapılar



Şekil 3.9 : Frekans seçici yüzeylerde kullanılan 4. Group Şekiller [9].

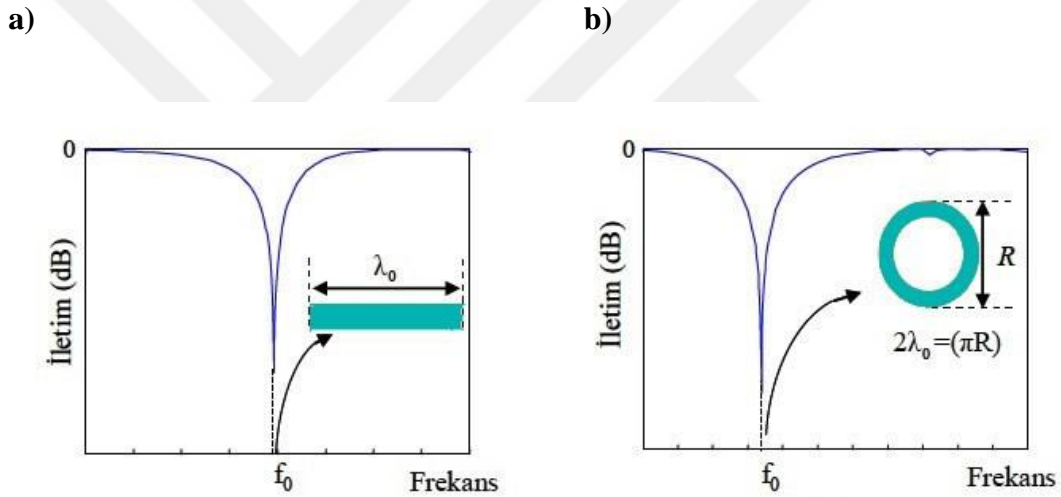
Yukarıda saymış olduğumuz yapıların biraraya getirilmesinden meydana gelen bu yapılar için ayrı ayrı ele aldığımız yapılarda tahmin edilen rezonans frekansı gibi olmadığı anlaşılmıştır.

3.3.2 Frekans seçici yüzeylerin boyutları

Frekans seçici yüzeylerde istenilen verimi almak için üzerinde çalışılması gereken diğer önemli bir konu da kalınlıklarıdır. Yapılarına göre FSY’ler “kalın” ya da “ince” olarak ayrılırlar. Dielektrik levha üzerine uygulanan yapının kalınlık değeri $t < 0,001\lambda_0$ (λ_0 rezonans frekansındaki dalga boyunu temsil eder) olması durumunda ince olarak adlandırılırken; $t > \lambda_0$ olduğunda ise yüksek geçiren filtre olarak tasarımlarda kullanılan kalın FSY olarak adlandırılır.

Kalın ve ince yapıları arasında en önemli farklılık; ince yapılar daha hafif, küçük hacimli ve maliyeti daha düşük olurken; kalın olan yapılar ise daha ağır, üretimi daha zor ve daha maliyetlidir. İnce yapılar daha çok baskı devrelerinde kullanılırken, kalın yapılar çoklu frekans uydu haberleşmelerinde ihtiyaç olan iletim ve yansıtma frekansını azaltmada avantaj sağladığı görülmüştür [12].

Kalınlık ve incelikten sonra FSY'yi etkileyen temel faktörlerden biri de yapının uzunluklarıdır. FSY yapısının çalışma frekansı f_0 , yarım dalga boyunun yani $\lambda_0/2$ 'nin tam katı uzunluktaki bir dipol; tamamen yansıtıcı (rezonans) özelliği sergiler. Aynı şekilde dairesel döngüdeki FSY'nin yarı çevresi $\lambda_0/2$ 'nin tam katı uzunlukta olduğunda da benzer bir yansıtma (rezonans) davranışı sergiler. Kısaca Şekil 3.10'daki grafiklerde gösterilmiştir [12].



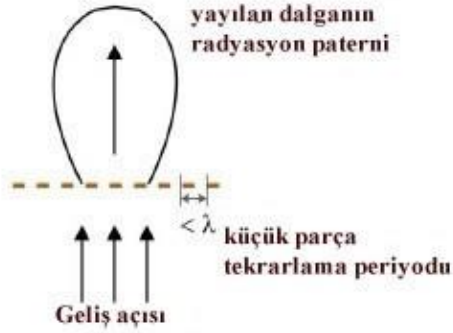
Şekil 3.10 : (a) Şerit dipol ve (b) Dairesel yapıların iletim karakteristikleri ile eleman boyutu ile rezonans frekansı (f_0) arasındaki ilişki.

3.3.3 Periyodik dizilerin aralarındaki boşluklar

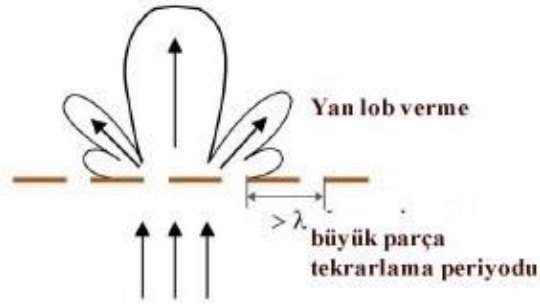
İki periyodik yapı (veya birim hücre) arasındaki boşluğa periyodik dizi aralığı olarak adlandırılabilir. FSY yapımında, yan loblar oluşmayacak şekilde dizi boşluğu tasarlanmalıdır. Çalışma frekansında dalga boyuna (λ) göre elektriksel olarak Şekil 3.11'de gösterildiği gibi büyük sinyal olursa, ortaya ikincil bir sinyal olarak yan loblar çıkar ve bu da istenmeyen bir durumdur. Enerji yan loblara da bölünmesi nedeniyle iletilen veya yansıyan sinyalde azalmalar olacaktır. İletilen veya yansıyan sinyallerde

yan lobların oluşmasını önlemek maksadıyla geliş açısını 0° alırken, yapı boyutu ve dizilim aralığını ise bir dalga boyundan (λ) daha az tutmak hedeflenmelidir.

a)



b)



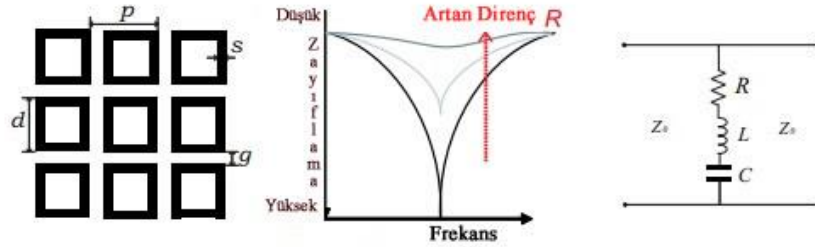
Şekil 3.11 : Yan lobun doğal oluşumu. (a) Yan lobsuz tek ana sinyal (b) Çoklu yayılım modları uyarılmak suretiyle oluşan yan loblar.

3.3.4 FSY olarak tasarlanan yapının iletkenliği

FSY'lerde iletkenlik denilince, kullanılan malzemenin elektriksel iletkenliğini olarak düşünmemiz gereklidir. Burada elektriksel iletkenliği sorgulamak gerekirse; elektrik akımı iletebilmek için malzemeye uygulanan elektriksel alan etkisinde yük taşıyıcılarının uzak mesafeli hareketleri sonucu oluşması diyebiliriz. Gelen elektromanyetik dalga FSY'ye çarptığında, FSY'nin iletken elementleri üzerine akımlar indüklenerek; dikdörtgen dalga klavuzunda iletken direklere veya şeritlere benzer yapıda elektromanyetik dalgaları tekrar yaymış olacaktır. Ayrıca malzemedeki iletkenlik azalırsa veya malzeme kayıplı hale gelirse, gelen dalga üzerindeki enerjisi ise ısı olarak ortaya çıkacaktır. Bunun sonucunda ise tasarlanması istenilen FSY'nin genel performansı düşecek ve istenilen verim alınamayacağı için etkinliği tekrar değerlendirilmek zorunda kalınacaktır.

Periyodik olarak yerleştirilen yapıların geometrisine göre indüktif ya da kapasitif devre olarak enerji depolayan tasarımları bulunmaktadır. Eşdeğer devre modellerinde kayıplı iletken bir yapı kullanıldığında indüktif ve kapasitif etkenlere ilave olarak direnç etkiside görülmektedir [39]. Şekil 3.12'de kare halkalarla oluşturulan düşük iletkenlikliğe sahip FSY'nin; eşdeğer devre modelinde L ve C elemanlarına seri bağlı

R ile gösterilen direnç elemanı olarak gösterilmiştir. Artan dirence göre FSY'nin bant durduran filtre özelliğinin de değiştiği görülmektedir. Rezonans frekansında FSY'ye gelen elektromanyetik dalganın genliğinde meydana gelen zayıflama, elemanların artan direnci (azalan iletkenliği) sebebiyle azalmaktadır.

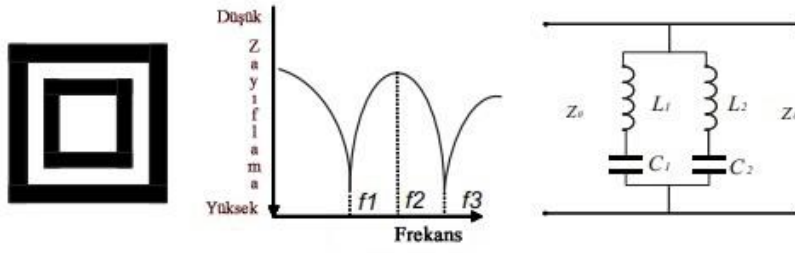


Şekil 3.12 : Kare halka şeklinde tasarlanmış FSY'nin etkileri. Z_0 iletim hattının empedans karakteristiğidir [35].

Yukarıda Şekil 3.12’de gösterilen kare halkanın oluşumdaki p , bir periyot uzunluğunu; d , kare halkanın bir kenar uzunluğunu; s , iletken yapı kalınlığını; g , periyodik kare halkalar arasındaki mesafeyi gösteren, bant durduran karakteristiğe sahip bir yapıdır. Tasarlanılan bu FSY yapısı; periyot uzunluğu (p), kare halkanın kenar uzunluğu (d), iletken yapı kalınlığı (s) parametrelerine bağlı olarak istenilen frekansta rezonans sağlayacak şekilde değiştirilebilmektedir. Farklı geliş açılarındaki elektromanyetik dalgalara karşı “ g ” ile gösterilen periyodik yapılar arasındaki mesafeyi değiştirmek suretiyle frekans seçici yüzeyin gösterdiği etkinlik kontrol altına alınabilmektedir. Özetlemek gerekirse küçük boyutlardaki kare halkalar ile daha yüksek frekanslarda rezonans sağlayabilirken, periyodik yapılar arasındaki mesafenin daraltılmasıyla da farklı geliş açılarındaki elektromanyetik dalgalara karşı daha kararlı ve sabit bir frekansta rezonans elde edilebilmek mümkündür.

FSY tasarımlarında farklı malzemelerden faydalanılmakla beraber genellikle düşük maliyetli ve yüksek performans sergileyen alüminyum tercih sebebi olmaktadır.

Karmaşık geometrilere sahip olan FSY istenilen frekanslarda elde edilebilmektedir. Bahsedilen karmaşık yapıya ait örnek olarak Şekil 3.13’te iç içe geçirilmiş kare halka yapıları sayesinde farklı iki frekansta rezonans frekansı elde edilerek bant durduran filtre tasarımına sahip bir yapı elde edilmiş olmuştur.

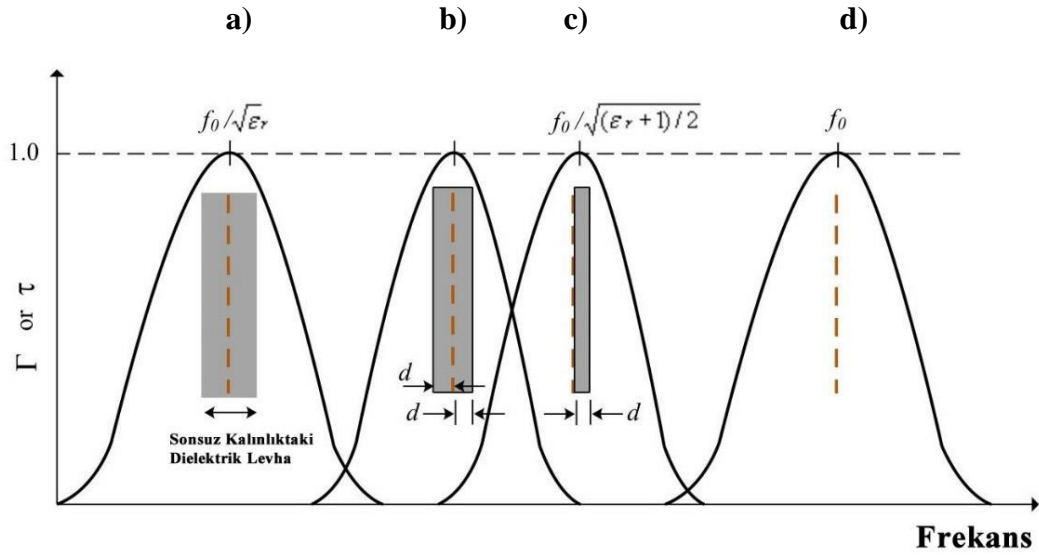


Şekil 3.13 : İç içe geçmiş kare halkalara ile oluşturulmuş FSY'nin frekans davranışı ve eşdeğer devre model çizimi [35].

Farklı yapı olarak gösterilen iç içe geçirilmiş Şekil 3.13'teki kare halka olarak sunulan FSY'de; f_1 ve f_3 ile maksimum performans sağlamış iki rezonans frekansı sunulmuştur.

3.3.5 Dielektrik levhanın etkileri

FSY'lerin kullanımında destek gerekli olup bunu da dielektrik levhalar vasıtası ile gerçekleştirebilmektedir. Dielektrik levhalara FSY'lere uygulanarak rezonans frekansını önemli ölçüde değiştirmekle kalmaz aynı zamanda açısal etkileri de dengelemiş olurlar [9,35,40]. Dielektrik levhalar FSY'nin tek tarafına uygulandığı gibi aynı zamanda her iki tarafına da uygulanabilir. Bağlı dielektrik sabitine (ϵ_r) sahip sonsuz bir dielektrik malzeme FSY'nin her iki tarafına eklenirse, rezonans frekansı Maxwell denklemlerinden bilindiği gibi faktör $\sqrt{\epsilon_r}$ oranında azalacaktır [9].



Şekil 3.14 : Rezonans frekansında dielektrik levhanın etkisi (a) FSY'nin her iki yüzündeki sonsuz kalınlıkta dielektrik levha (b) FSY'nin her iki tarafındaki d kalınlığındaki sonlu dielektrik levha (c) FSY'nin tek yüzündeki d kalınlığındaki sonlu dielektrik levha (d) Boşluktaki FSY (dielektrik levhasız FSY) Kesik çizgiler FSY temsil eder. $d < \sim 0.005$ [9].

Sonsuz dielektrik levhanın FSY'nin rezonans frekansına etkisi Şekil 3.14 (a)'da; Şekil 3.14 (b) 'de gösterilen FSY'nin her iki tarafına sınırlı $2d$ kalınlıktaki dielektrik levha konursa rezonans frekans değişimi f_r ve $f_r/\sqrt{\epsilon_r}$ arasında olmaktadır. Burada f_r boşlukta duran FSY'nin rezonans frekansıdır. Dielektrik levhanın kalınlığı $d \sim 0.05\lambda_e$ (λ_e - elektriksel dalga boyu) kadar küçük olsa bile, rezonans frekansı neredeyse $f_r/\sqrt{\epsilon_r}$ 'a yakın olduğu gözlenmiştir. Şekil 3.14 (c) 'de FSY'nin yalnızca bir tarafında, d kalınlıktaki dielektrik levha nedeniyle $\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}$ oranında rezonans frekansı azaldığı görülmüş. Rezonans frekansının aşağı doğru kaydırılması istendiğinde; hem dipol hem de yarık dizisi için, dielektrik malzeme ilave ederek istenilen kayma gerçekleşecektir. Ayrıca, dielektrik levhanın kalınlığı $\lambda_e/4$ veya daha fazla olduğunda, bu iki dizide farklı davranış oluşur. Yarık dizisi yaklaşık $f_r/\sqrt{\epsilon_r}$ frekanslarda birim iletimini gösterirken, dipol dizisinin rezonans frekansı dielektrik kalınlığından bağımsız olarak oluşacaktır.

f_r : Rezonans frekansı

ϵ_r : Dielektrik sabiti

ϵ_{eff} : Efektif dielektrik sabiti

Bu açıklamalar doğrultusunda;

f_{r2} : FSY'ye dielektrik tabaka eklenmesi ile oluşturulan yeni yapının rezonans frekansı olmak üzere,

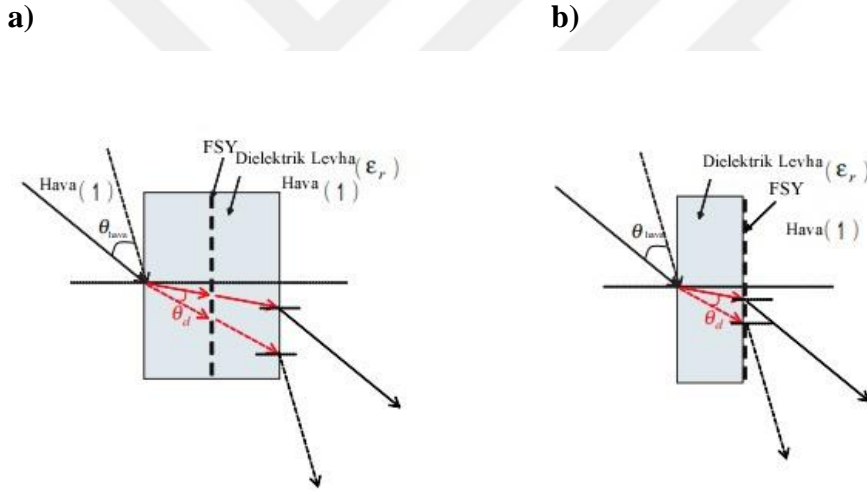
Kalınlığı 0.05λ 'dan büyük olan dielektrik levhalar için;

$$f_{r2} = \frac{\epsilon_r}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.3)$$

Kalınlığı 0.05λ 'dan büyük olan dielektrik levhalar için;

$$f_{r2} = \frac{\epsilon_r}{\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}} \quad (3.4)$$

eşitlikleri yazılabilir.

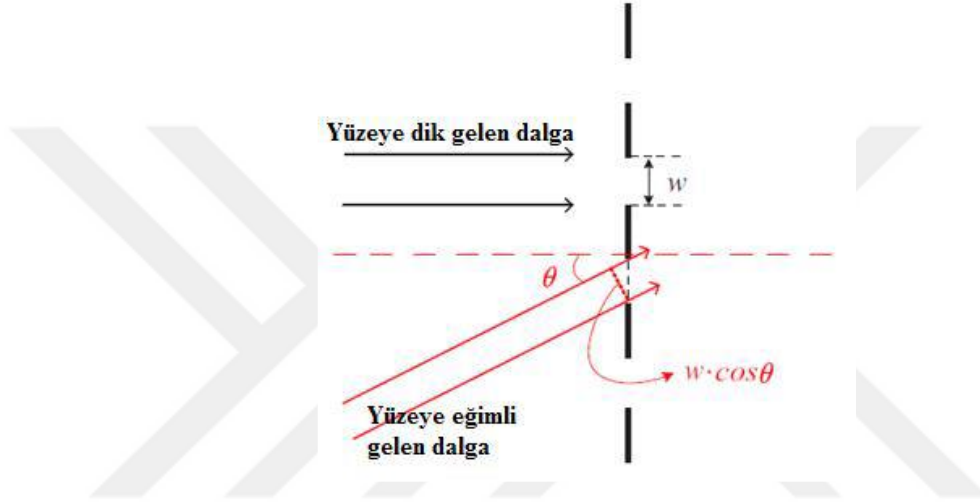


Şekil 3.15 : Dielektrik levhaların içindeki ve üzerindeki FSY (a) Dielektrik levhaların içindeki FSY, $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$ [12]. (b) Dielektrik levhanın üzerindeki FSY, $\epsilon_{eff} = (\epsilon_r + 1)/2$ [35].

FSY'ye dielektrik katmanın bir artışı da FSY'nin açısal kararlı olması diyebiliriz. Gelen dalga açısını, FSY'de dengeli hale getirilebilmek için dielektrik levha kullanabiliriz. Dielektrik levha içerisindeki kırılma açısı Snell'in kırılma yasasına göre boşluktaki (yani $\theta_r < \theta_i$) sinyal geliş açısı, Şekil 3.17'de görüldüğü gibi, daha azdır. Dolayısıyla, sinyal geliş açısının değişimi için daha kararlı hale getirilmesi için, dielektrik levha içerisindeki FSY'ye gelen sinyal açısı azaltılır [35].

3.3.6 Dalgaların geliş açısı

Şekil 3.16’ da farklı açılarda ki elektromanyetik dalgaların frekans seçici yüzeye gelişi, yapılar arasındaki mesafenin gelen dalgalara göre farklılık göstermesine neden olmaktadır. Her ne kadar frekans seçici yüzeyler üzerine gelen elektromanyetik dalgaların açıları önemli olsada aynı zamanda periyodik yapılar arasındaki mesafeler de frekans seçici yüzeylerin, frekans davranışını belirleyen önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Bu sebeple frekans seçici yüzeylerin işlevsel özellikleri, farklı açılarda gelen elektromanyetik dalgalar için değişmekte ve bozulmaktadır.



Şekil 3.16 : Elektromanyetik dalganın geliş açısına göre periyodik elemanlar arasındaki mesafenin değişimi [35].

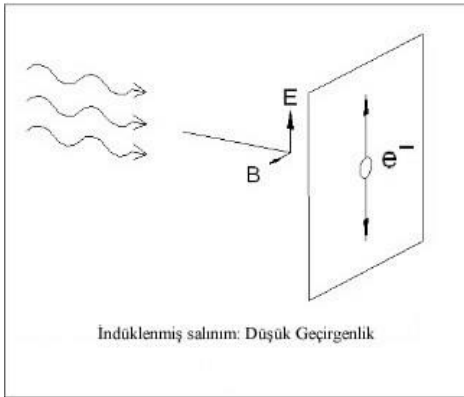
Periyodik olarak yerleştirilen FSY’lerin aralarındaki mesafeye göre frekans değerleri farklı olabilmektedir. Tasarlanılan periyodik yapılar aralarındaki mesafenin arttırılmak veya azaltılmak suretiyle, rezonans frekansı ve bant genişliği gibi önemli parametrik değerlerde değişimin görülmesi mümkündür. FSY yapısının özelliklerine göre farklılık gösteren sağlıklı çalışabildiği bir açı aralığı ile verimli bir çalışma sergilerken, istenilen açı aralığı dışından gelen sinyallere karşı ise sağlıklı, düzgün olmayan frekans davranışları sergilemektedir.

3.3.7 Gelen dalganın polarizasyonu

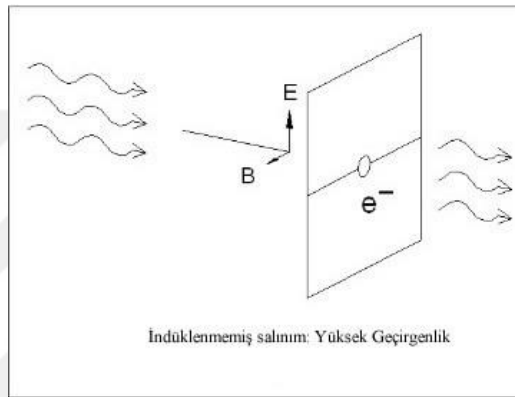
FSY’nin frekansını sadece gelen elektromanyetik dalganın geliş açısı değil, aynı zamanda polarizasyonu da frekans tepkimesini etkiler. Şekil 3.17’de normal geliş açısında metal bir düzleme çarpan dalga kaynağı sunulmuştur. Tek bir elektronun düzlemde durduğunu kabul edelim ve dalganın filtreye çarpmasıyla ne olduğunu anlamaya çalışalım. Düzlem Poynting vektörüne dik olduğu için, kaynağın E-vektörü

yani elektrik alan vektörü aynı düzlemde yeralır. Elektrik alan vektörü elektron üzerinde belirli bir kuvvet uygulamaya başladığından salınım yapmaya başlayacaktır. Elektronda meydana gelen salınımı sürdürmek için gelen dalganın bir kısmı kinetik enerjiye çevrilir. Enerjinin korunmasını sağlamak için, sadece gelen gücün bir kısmı iletilir ve geri kalanlar enerji ise elektron tarafından emilerek salınım devam eder. Eğer ki gelen dalganın bütün enerjisi metaldeki elektron üzerinde kalırsa, filtreden geçen dalga sıfır olacaktır.

a)



b)









Şekil 3.17 : a) İndüklenmiş elektronun filtre yüzeyindeki düşük geçirgenliğini b) Elektrik alan vektörü ile dipol elemanın birbirine dik düzlemlerde olduğu örnek bir durum [41].

Diğer bir senaryo ise metal Şekil 3.17 b)'deki gösterimde düzlem dalgasının E-vektörüne dik olduğunu düşünelim. Elektronun bu tel boyunca hareketi azaltıldığından, kaynağında bulunan kinetik enerjiden çok az bir kısmı kullanılmış olacaktır. Kuvvetin uygulandığı yöne elektronun dik olması ve hareket sahasının çok kısıtlı olması nedeniyle elektron, tamamen iletilecek olan gelen dalgaya karşı etkisiz olarak kalacak ve bütün dalga çok az kayıpla karşı tarafa iletilecektir [41].

3.4 Temel Geometrik Yapılı FSY'lerin Performans Analizleri

Temel olarak belirttiğimiz FSY geometrilerinin performanslarını karşılaştırmak amacıyla Çizelge 3.1.'de sunulmuştur. Açısız kararlılık, çapraz polarizasyon seviyesi, bant genişliği ve alt bant ayrımı olmak üzere dört ana başlık altında incelenmiştir

Çizelge 3.1 : FSY'nin farklı eleman şekillerinin performans analizi.

Yapı Şekli	Açısal Kararlılık	Çapraz Polarizasyon Seviyesi	Bant Genişliği	Alt Bant Ayrımı
Dipol 	4	1	4	1
Kudüs Haçı 	2	3	2	2
Halkalar 	1	2	1	1
Üç Kutuplular 	3	3	3	2
Çapraz Dipol 	3	3	3	3
Kare Halka 	1	1	1	1

(Değerlendirme 1-4 arasındadır ve 1 en iyisidir).

Çizelge 3.1'i analiz ettiğimizde sinyalin geliş açısı farklılığının en kötü kararlılığına bağımsız “Dipol” yapısının olduğu görülmektedir. Aynı zamanda en düşük bant genişliği ile çalışmaktadır. Çizelge 3.1'in tamamına bakıldığında, en istikrarlı ve

performans seviyesinin en iyi olduğu yapı ise “Kare halka” olarak; bütün özelliklerde en iyi değerlerle karşımıza çıkmaktadır [12].

Yukarıda sunulan Çizelge 3.1 ile birlikte, üzerinde çalışmamızda fayda sağlayacak bir yapı tasarlamamıza ışık tutan bir ölçek olacaktır. En önemli konulardan birisi olan kararlılığı; “Kare Halka” da görmek mümkündür. Bu çalışmada yer alan FSY Çizelge 3.1’den yararlanılarak oluşturulmuştur. En ucuz maliyet ve en kolay tasarım, doğal olarak en yüksek performansı sunacağından dolayı tasarımlarımızı düşünürken Çizelge 3.1’den faydalanmamız bir avantaj sağlayacaktır.

3.5 Frekans Seçici Yüzeylerin Analizinde Kullanılan Teknikler

FSY’lerin tasarımlarının yapılmasında ve ölçümlerinin alınmasında kullanılan bazı temel teknik bulunmaktadır. Saçılma analizlerinde kullanılan bu teknikler aşağıda sunulmuştur.

- ✓ Momentler metodu (Method of Moments (MoM))
- ✓ Eşdeğer devre modeli (Equivalent Circuit (EC) Models)
- ✓ Ortak empedans metodu (Mutual Impedance Method)
- ✓ Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method (FEM))
- ✓ Zamanda sonlu farklar metodu (Finite Difference Time Domain (FDTD))

3.5.1 Momentler metodu (Method of Moments (MoM))

Saçılma analizlerinde en çok tercih edilen Momentler metodunu literatürdeki ilk çalışma Chen’indir [42]. Aynı zamanda integral eşitliği metodu (integralequation method) olarak da adlandırılmaktadır [35].

Dielektrik levha yüzeyine gelen elektromanyetik dalga nedeniyle tasarlanılan yapı üzerinde akım indüklenmiş olur. Momentler metodu ile teğetsel bileşen olan periyodik yapının fonksiyonu Floquet harmoniklerine açılabilir ve periyodik iletken yapılar üzerinde indüklenen akımın bir integral ifadesi oluşmuş olur. Sayıca çok fazla olan bu periyodik yapıların nümerik çözümü ise Momentler metodu ile elde edilebilmekte ve bilgisayar gibi çoklu işlem yapabilecek bir sistem ile çözülebilmektedir [43].

Momentler metodu her ne kadar homojen olarak tasarlanan dielektrik levhaların analizinde kullanışlı olmasına rağmen, daha karmaşık geometrilerindeki yapılarda ve homojen olmayan tasarımlarda en etkili çözümü ise Zamanda sonlu farklar metodu (Finite Difference Time Domain (FDTD)) veya Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method (FEM)) sunmaktadırlar.

3.5.2 Eşdeğer devre modeli (Equivalent Circuit (EC) Models)

Frekans seçici yüzey olarak tasarlanılan yapılarda bilgisayarlı hesaplamalar gerektirmeyen saçılma analizini yapmaya yarayan daha basit analitik çözüm sunan yöntem ise eşdeğer devre modeli (EC) tekniğidir [44,45]. Eşdeğer devre modeli analitik bir teknik olduğu için bu tekniğin uygulama alanı, doğrusal polarizasyonlar ve basit periyodik eleman geometrileri ile sınırlıdır. Bu yöntem sayesinde, dielektrik tabaka özelliklerinin ve elektromanyetik dalgaların farklı geliş açılarının hesaplanabilmekte ve oldukça farklı durumlar için yapılan analizlerde doğru sonuçlar elde edilebilmektedir.

Frekans seçici yüzey olarak basit geometrileriyle tasarlanan yapıların analizlerinde daha sağlıklı ve başarılı sonuçlar alınmaktadır. Özellikle de farklı boyutlardaki frekans seçici yüzeylerin hızlı bir şekilde modellenebilmesi ve basit geometrik yapılarda yeterli doğrulukta sonuç alabilmesi nedeniyle kesin sonuç elde edilebilen yöntemlere nazaran daha fazla tercih edilmektedir [35,43].

3.5.3 Ortak empedans metodu (Mutual Impedance Method)

Ben A. Munk tarafından geliştirilmiş olan Ortak empedans metodu; gelen elektromanyetik dalganın iletken periyodik yapılar ve periyodik elemanların birbirleri üzerinde indükledikleri gerilimden yola çıkarak ortak bir empedansın hesaplanması prensibine dayanmaktadır.

3.5.4 Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method (FEM))

Periyodik yapılarda oluşan elektromanyetik dalga saçılmalarının analizinde kullanılan bir yöntemdir. Matematiksel uygulaması ilk olarak 1943 yılında Courant tarafından gerçekleştirilmiş olmasına rağmen elektromanyetik problemlere uygulanması ancak 1968 yılında gerçekleşmiştir [43]. Sonlu farklar metodu (FDM) ve momentler metodu (MoM) uygulama ve programlama açısından daha basit olsa da, sonlu elemanlar

metodu (FEM) karmaşık geometrilerin ve homojen olmayan yüzeylerin analizinde çok daha etkili çözümler sunmaktadır. Yapısı gereği sonlu elemanlar metodu, çok çeşitli problemleri çözebilecek genel amaçlı bir bilgisayar programı geliştirilmesi için uygun bir yaklaşım yöntemidir [46].

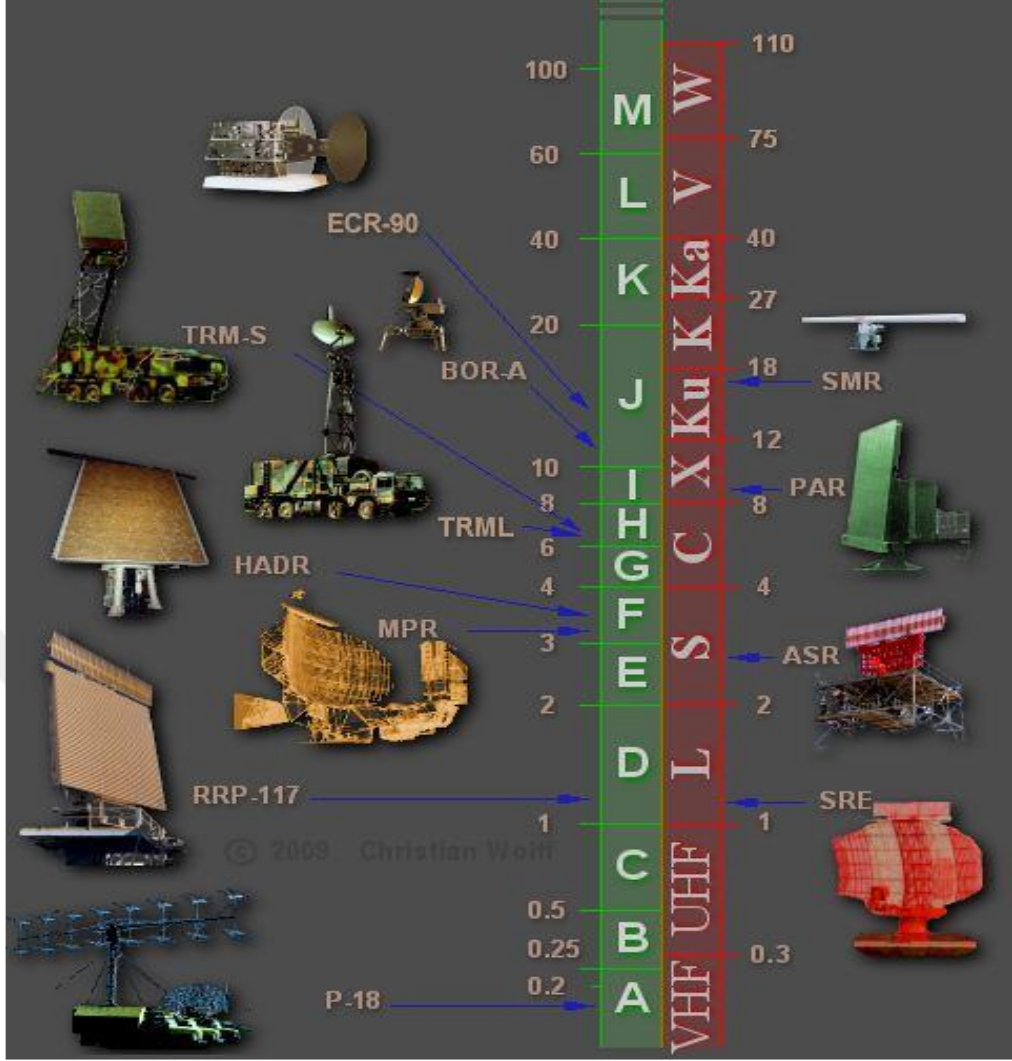
3.5.5 Zamanda sonlu farklar metodu (Finite Difference Time Domain (FDTD))

Saçılmalarının analizini frekans domeninde yapan Zamanda sonlu farklar metodu, periyodik yapılardaki elektromanyetik dalga momentler metodu ve sonlu elemanlar metodundan farklı analizleri zaman döneminde hesaplayan bir yaklaşım olmasıdır. FDTD yaklaşımı, Maxwell'in zamana bağlı rotasyonel eşitliklerinin doğrudan bir çözümüdür. Özellikle homojen olmayan dielektrik levhalar ve üç boyutlu frekans seçici yüzey yapılarının tasarlanmasında FDTD yaklaşımı oldukça etkin sonuçlar ortaya koymaktadır [35].

3.6 Frekans Seçici Yüzeylerin Uygulama Alanları

Günümüzde sıklıkla kullanmakta olduğumuz fakat birçoğumuzun farkında bile olmadığı frekans seçici yüzeyleri yakından incelemek gerekirse; evlerde sıklıkla kullanmış olduğumuz, elektromanyetik korumanın gerçekleştiği en yaygın cihaz mikrodalga fırınlardır. Gündelik yaşamda en yaygın kullanım yeri olan mikrodalga fırınlar; elektromanyetik korunmanın sağlandığı en güzel örnektir. İçerisinde bulunan su moleküllerini hareket ettirmek için yayılan mikrodalgaların dışarı yayılmasını engelleyen ve içerisine ısınması için konulan malzemenin ısınmasını sağlayan yüksek geçirgenliğe sahip bir yapıdadır.

Kara, hava ve deniz gibi alanlarda bulunan platformların antenlerini; özellikle şiddetli fırtına, dolu, kar gibi doğa olaylarından korumak amacıyla antenleri çevreleyip muhafaza eden yapıya "RADOM" denilmektedir. Radomlar; çalışma frekans band aralığında gelen ve giden sinyallere karşı geçirgen fakat çalışma bandı dışındalere ise sinyal geçirmez yapıda tasarlanmış, anten doğal olaylardan ve elektromanyetik sinyallerden koruma amacıyla üretilmiş yapılardır. Özellikle kara, hava ve deniz platformlarının antenlerinde meydana gelen saçılma, radomun şekline göre farklı yönlerde saçılması sayesinde, sistemlerin ve cihazların görevlerini aksatmadan yerine getirmesine yardımcı olacaktır. Şekil 3.18'de farklı radar türlerinin çalışma frekansları gösterilmiştir [Url-1].

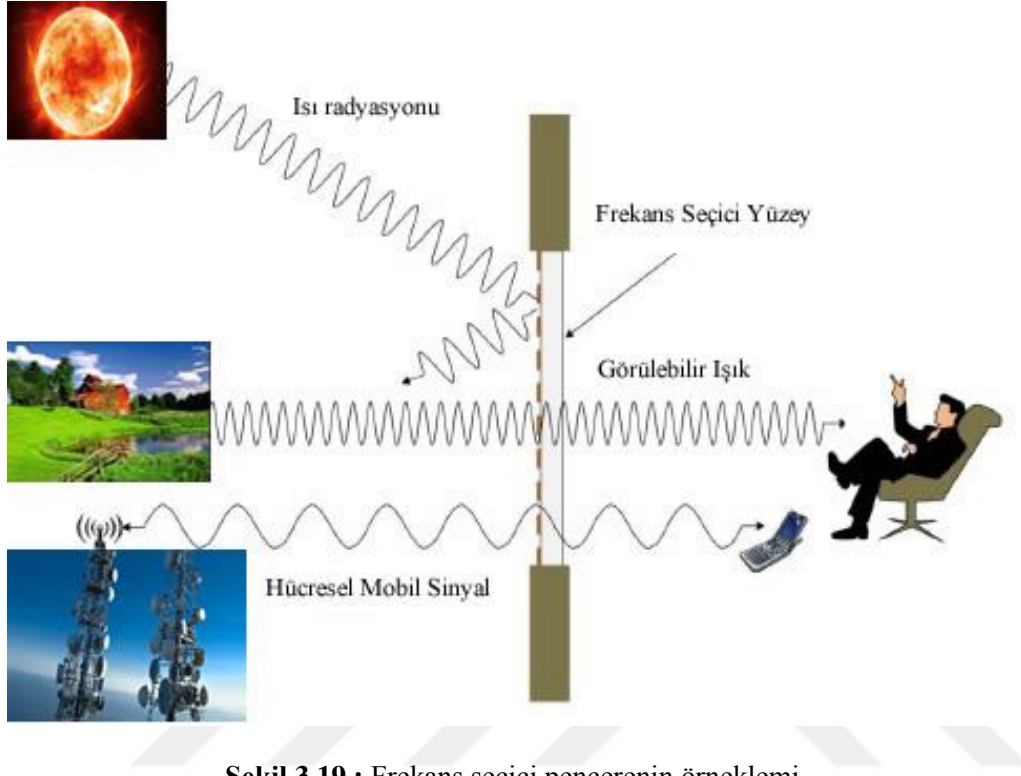


Şekil 3.18 : Bazı radar türlerinin çalışma frekansları.

FSY'ler gelen sinyali soğurucu, kutuplaştırıcı ve ışık ayırıcı olarak da kullanılabilirler. Eğer FSY olarak tasarlanan yapı, polarizasyona bağımlı rezonans karakteristiği sergilerse, oluşturulan yapıyla polarizör üretmek mümkün olabilmektedir. Kıvrımlı hatta sahip kutuplaştırıcılarla, dalganın polarizasyonunu doğrusaldan dairesele veya tersine değiştirmek için kullanılır [9]. Bu polarizasyon bağımlılığı, diğer kutuplaşmaların dalgalarını yansıtırken belirli polarizasyonun iletilmesini sağlamak için kullanılırsa, bu tür FSY'ler ışın dağıtıcı olarak kullanılabilir.

Son yıllarda, kablosuz iletişim sistemleri içerisinde FSY uygulamalarına sıklıkla rastlamaktayız. Cep telefonları ve baz istasyonlarının yaratmış oldukları gereksiz gürültü ve sinyal kirliliği nedeniyle farklı çözümlerine gidilmiştir. FSY'ler, cep telefonu sinyallerinin engellenmesi ve yalnızca acil çağrılara izin verilmesi için tiyatrolar, hastaneler, hapisane hücreleri veya halk kütüphaneleri gibi binaların

duvarlarında kullanılarak, toplumun uyması gereken kurallara yine teknolojik gelişme yardımıyla çözüm sunabilmektedir. Gelişmiş iletişim sistemi içerisinde kullanılan FSY'nin diğer bir kullanım şekli ise, Şekil 3.19' da gösterilmiştir.



Şekil 3.19 : Frekans seçici pencerenin örnekleme.

Şekil 3.19'da frekans seçici pencerenin kullanımındaki özellikler belirtilmiştir. İstenmeyen kızılötesi (veya termal) radyasyon frekans pencereyle engellenir, ancak görünür ışık ve hücrel radyo frekanslarına karşı geçirgen davranır. Termal radyasyonun serbest alan dalga boyu 1 mm ila 750 nm, görünür ışığın 380 nm ila 780 nm arasında ve radyo dalgasının binlerce kilometre ila 0.1 mm. arasında değişmekte olduğu bilinmektedir [32]. Modern evlerdeki bu pencereler nedeniyle, radyo dalgalarının kendilerinden yayılmasına izin vermediğinden çok sorunludur. Dolayısıyla, kapalı kapsama konusu gündeme gelmektedir. Bu sorunun çözümü olarak radyo dalgalarının, enerji verimliliğini korurken doğada yayılmasına izin verecek frekans seçici pencerelerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu ek şebeke yapılandırması olmaksızın modern evlerde kapalı alanların iç iletişim ağının iyileştirilmesi için yeni bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Frekans seçici pencereler temel olarak, camların metalik kaplamasında FSY yapıları oluşturularak enerji tasarruflu bir yapı meydana getirmiştir. Radyo dalgalarının verimli bir şekilde yayılması için frekans

seçici pencere olarak tasarlanan yapılar hakkında yapılan çok sayıda araştırmalar gerçekleştirilmiştir [37,47-51].

Evlerin, binaların veya özel alanların dış veya iç yüzeylerine uygulanan frekans seçici yüzeyler sayesinde istenmeyen sinyaller alınmazken, istenilen sinyal ve ışınların alınması sağlanmış olacaktır. Penceredeki ince bir metal tabaka kullanımı sayesinde termal izolasyon özelliği sunması nedeniyle, günümüzde çoğu kişi tarafından tercih edilen bir yapı halini almıştır. Yapılan bu kaplama sonucunda güneşten gelen ısı dalgasının enerjisini azaltacağından radyasyonuda önlemiş olarak, bulunduğumuz alanlarda daha verimli çalışmamızı sağlamış olacaktır. Şeffaf bir yapıda cama uygulanan bu yapının örneğini Şekil 3.20’ de görebiliriz.



Şekil 3.20 : Şeffaf olarak cama uygulanmış FSY örneği.



4. FSY MODELLEME VE SİMÜLASYON

Yapılan araştırmalar sonucunda, özellikle askeri alanlar başta olmak üzere, hayatımızın her alanında frekans seçici yüzeyler kullanılabilir. Kablosuz ağlar, akıllı ev sistemleri ile hava ve deniz platformlarında sıklıkla karşımıza çıkan bu yapılar için denemeler devam etmektedir. Bu düşünceden yola çıkılarak iki farklı yapı tasarlanmıştır. Yeni tasarlanan yapılar sayesinde daha geniş bantlarda yansımanın sağlanması hedeflenmektedir. Tasarlanan Ultra-Geniş Band (UGB) Frekans Seçici Yüzey ile II ve F Şeklindeki Frekans Seçici Yüzeylerin C, X ve Ku Bantlarında oluşan iletim katsayıları incelenmiştir. Tasarlanılan yapılardan elde edilen sonuçlar sırasıyla simülasyon ortamında ölçümleri alınarak aşağıda sunulmuştur.

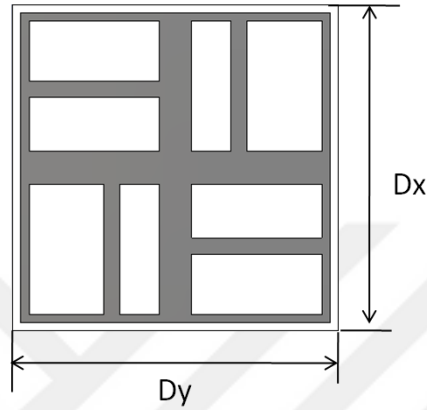
4.1 F Şeklinde Tasarlanan Ultra-Geniş Band (UGB) Frekans Seçici Yüzey

4.1.1 Giriş

Literatür incelendiğinde; Kesavan A. [27] tarafından geliştirilen Kudüs Haçı (Jerusalem cross-JC) tek başına uygulandığında elde edilen yansıma frekans bant genişliği yaklaşık 10 GHz ve Fan Şekli için tek başına uygulandığında yaklaşık 15 GHz olan band genişliği elde edilmiştir. Kudüs Haçı ve Fan Şeklini tek katman dielektrik levhanın, Rogers R04003, her iki yüzeyine uyguladığında U (40-60 GHz) ve V (50-75 GHz) bandlarını kapsayan, 30 GHz'lik geniş band durdurucu karakteristiği gösteren frekans seçici yüzey elde etmişlerdir. Bu yapı 30 GHz'de geniş band durdurucu ve normal etki alanı için 16 dB'den fazla sönümleme sergilemektedir. Buradan hareketle tez kapsamında; U (40-60 GHz) ve V (50-75 GHz) bandlarını kapsayan ve geniş band durdurucu karakteristiği gösteren FSY tasarımı yapabilmek ve sönümlemeyi arttırabilmek amacıyla rezonans frekansları benzer olan ve daha fazla sönümleme gösteren iki ayrı yapı önerilerek, üstüste kullanılmış ve iletim katsayıları sonuçları [27]'de verilen çalışma ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Bölüm 4.1.2 ve Bölüm 4.1.3 başlıkları altında detaylı olarak sunulmuştur.

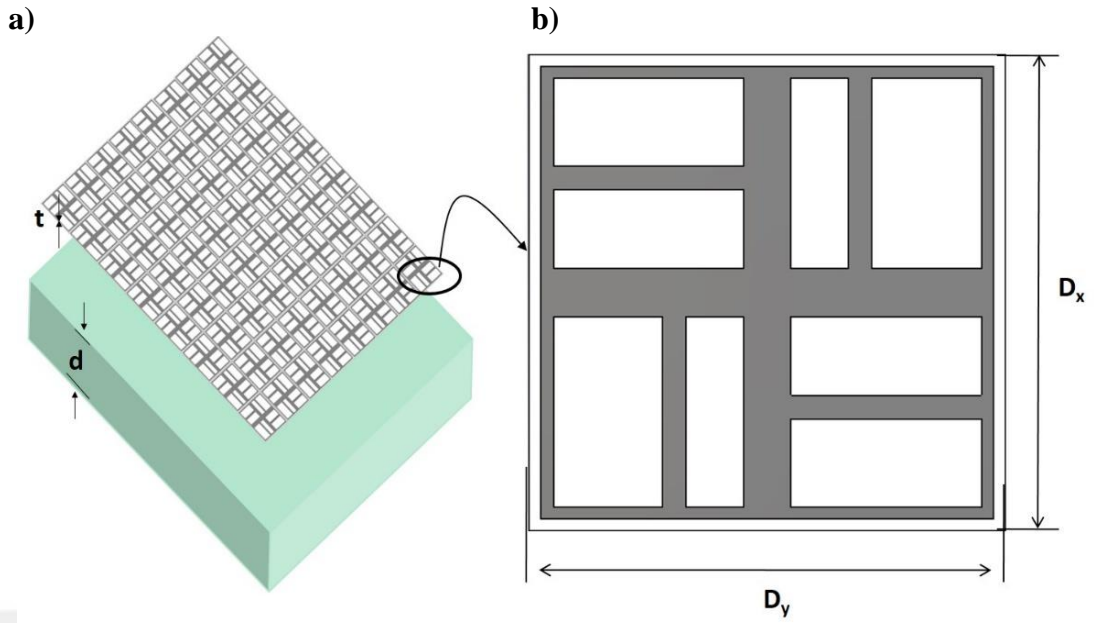
4.1.2 F şeklinde tasarlanan ultra-geniş band frekans seçici yüzeyin simülasyon tasarımı

Tez kapsamında önerilen ultra geniş bant durdurucu FSY yapısı Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Frekans seçici yüzeyin birim hücrenin boyutları x ve y yönlerinde sırasıyla $D_x = 2 \text{ mm}$ ve $D_y = 2 \text{ mm}$ ’ dir. Dielektrik malzeme olarak kayıpsız FR 4 kullanılmıştır ve dielektrik levhanın kalınlığı $d = 1 \text{ mm}$, dielektrik katsayısı $\epsilon_r = 4.3$ ’ tür.

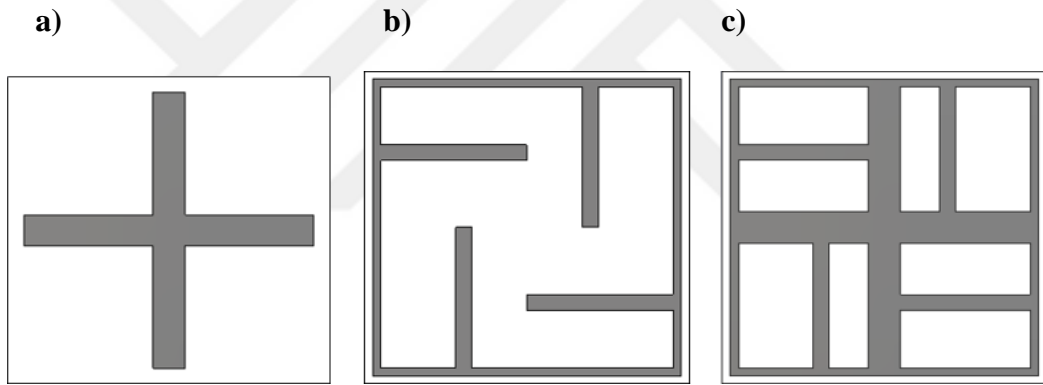


Şekil 4.1 : Dielektrik levhanın ön yüzü.

Ultra geniş bant frekans seçici yüzey, Şekil 4.2a’da gösterildiği gibi Şekil 4.2b’de verilen birim hücrenin x-y yönlerinde periyodik olarak yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Önerilen yapı Şekil 4.3a ile verilen Çapraz Dipol Frekans Seçici Yüzey ile Şekil 4.3b ile verilen F şeklindeki Frekans Seçici Yüzeylerin birleşiminden oluşan Şekil 4.3c’de sunulmuştur. Dielektrik levhanın arka yüzeyinde herhangi bir şekil yoktur. Tez kapsamında önerilen FSY’lere ait iletim / yansıtma katsayılarının belirlenmesinde Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio Suite isimli yazılım kullanılmıştır.



Şekil 4.2 : a) F Şeklinde Tasarlanılan Ultra Geniş Bant Frekans Seçici Yüzey. b) Birim Hücresi.



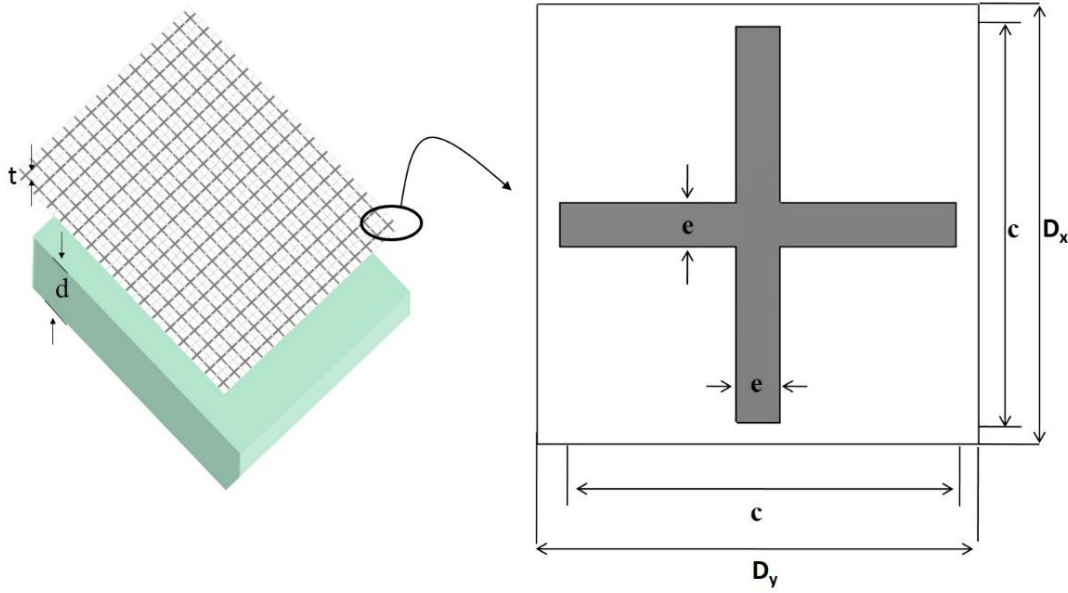
Şekil 4.3 : a) Çapraz Dipol b) F Şekli ve c) Önerilen UGB F

4.1.3 Metod

Her bir şekil öncelikle ayrı ayrı ele alınmış olup iletim ve yansımaya katsayıları CST Microwave Studio Suite yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. İlk olarak Şekil 4.3 a)'daki Çapraz Dipol ele alınmıştır. İkinci olarak Şekil 4.3 b)'deki F şekli yalnız olarak incelenmiştir. Son olarak iki şeklin birleşimi olan Şekil 4.3 c)'deki ultra geniş bant frekans seçici yüzey elde edilmiş ve iletim yansımaya katsayıları hesaplanmıştır.

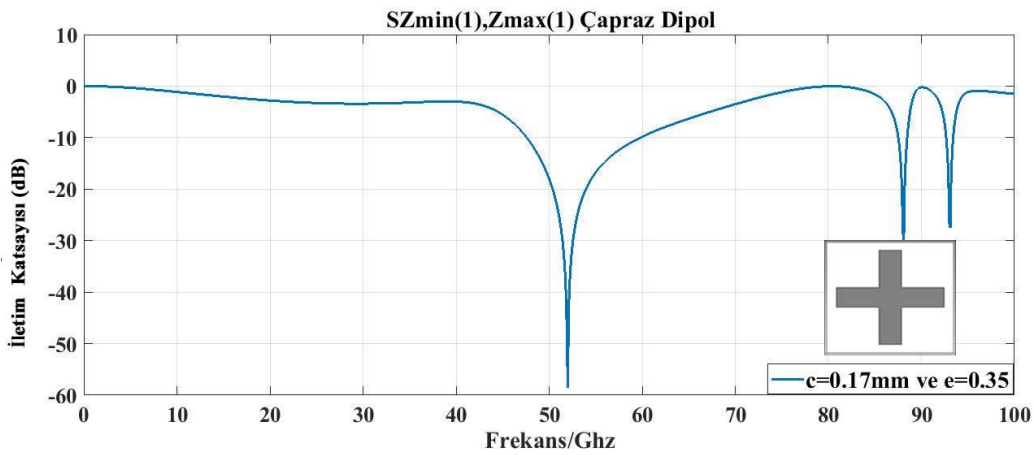
Ultra geniş bant FSY'yi oluşturan Çapraz Dipol FSY'nin boyutlandırılması Şekil 4.4 ile gösterilmiştir. x-y yönlerinde periyodik hücrelerin boyutları D_x - D_y , ön yüzde bulunan Çapraz Dipol Metalik malzemenin uzunluğu $c = 1.65$ mm ve kalınlığı

$t = 0.035$ mm sabit olarak alınmış olup, “e” parametresi ise farklı değerler olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4 : Çapraz Dipollerden oluşan FSY.

Çapraz Dipol’lerden oluşan frekans seçici yüzeye ait iletim katsayıları Şekil 4.5’te gösterilmiştir. Şekil 4.4’te “c” ile belirtilen uzunluk 0.17 mm, dielektrik levhanın kalınlığı $d = 1$ mm ile baskı malzemesinin kalınlığı olan $t = 0.035$ mm olarak sabit tutulmuş olup, “e” uzunluklarını sırasıyla 0.17 mm, 0.2 mm, 0.3 mm ve 0.35 mm alınmış ve CST Microwave Studio yazılımı ile iletim katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 4.5 : Çapraz dipol için iletim katsayıları [dB].

Bu konuda yapılan çalışma ve deneylerde elde edilen sonuçlara bakıldığında, rezonans frekans band genişliklerini arttırmak için dielektrik levhanın üzerinde bulunan yapının

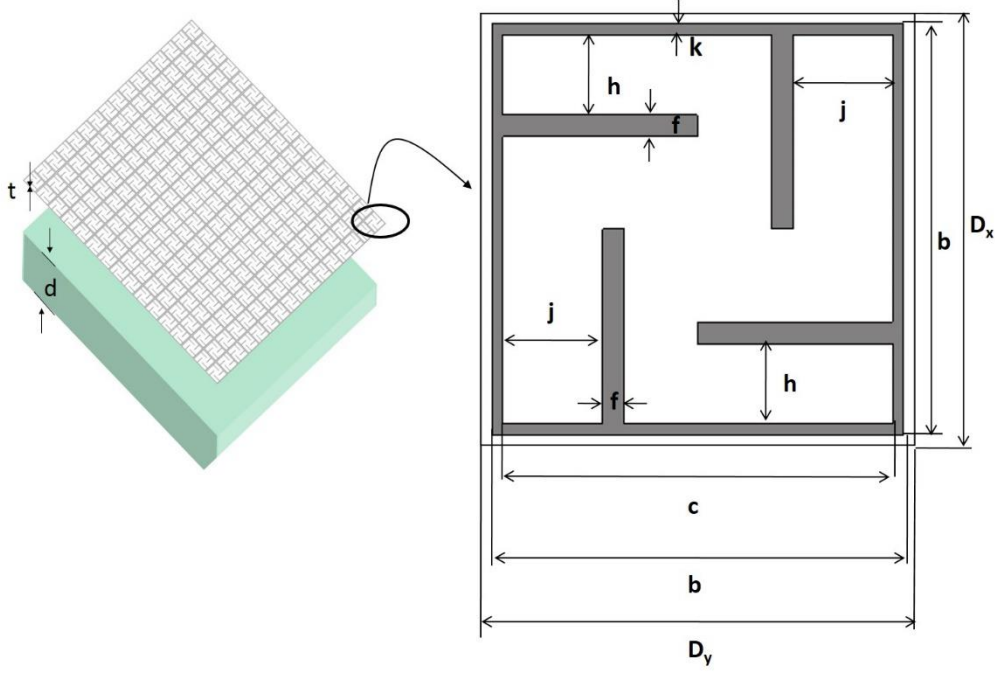
genişliğini, kalınlığını, sinyalin geliş açısını gibi parametreler üzerinden değişiklik yapılarak elde edildiği görülmüştür. Bu makalede -10 dB değerinde rezonans bant genişliğinin arttırmak hedeflendiği için öncelikle Çapraz Dipol yapının genişliğini arttırarak istenilen bant genişliği elde edilmeye çalışılmıştır. Çapraz Dipol şeklinin “e” parametresi ile gösterilen genişliği değiştirilmek suretiyle elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Çapraz Dipol tasarlanan FSY’de “e” parametresindeki değişim ve sonuçları.

“e” (mm)	Rezonans Frekans Bant Aralığı (GHz)	Rezonans Frekans Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Yansıtma Frekans (GHz)	Maksimum Yansıtma Performansı (dB)
e = 0.17 mm	46.07-54.19 GHz	8.12 GHz	48.9 GHz	-49.33 dB
e = 0.2 mm	52.90-60.83 GHz	7.93 GHz	52.50 GHz	-49.48 dB
e = 0.3 mm	50.49-60.95 GHz	10.5 GHz	54.4 GHz	-57.69 dB
e = 0.35 mm	47.59-59.81 GHz	12.29 GHz	52 GHz	-57.60 dB

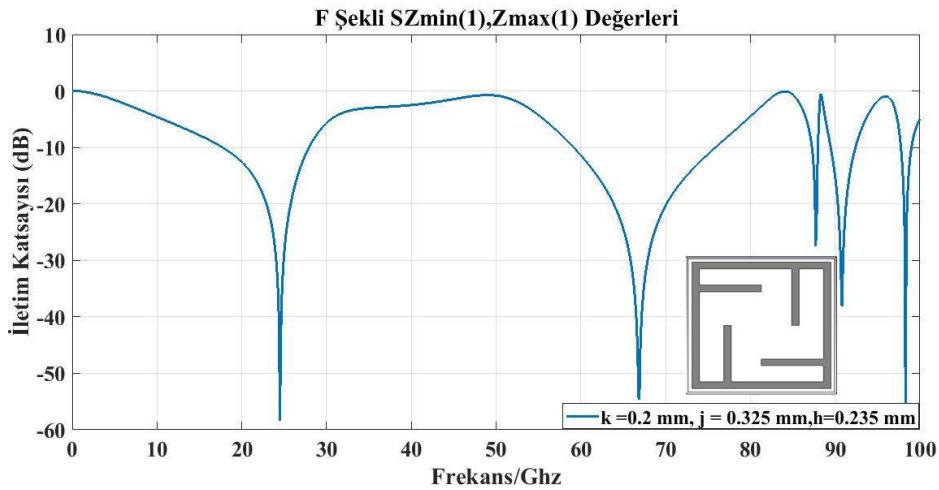
-10 dB kazanç değerinde bant genişliğinin arttırılması amacıyla yapılan optimizasyon çalışmaları Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Çapraz Dipol’ün “e” genişliğinin 0.35 mm olduğu durumda rezonans frekansının maksimum yansıtma frekansı 52 GHz’e olduğu, maksimum sönümlenmesinin 57.60 dB ve bant genişliğinin ise 12.29 GHz olduğu yapılan ölçümler sonucunda elde edilmiştir. 47.59-59.81 GHz frekansları arasında Çapraz Dipol FSY bant durduran karakteristiği göstermekte ve Çapraz Dipol FSY’nin “e” genişliğinin arttırılmasıyla bant genişliğinin de arttığı tespit edilmiştir.

F şeklinin 90° döndürülerek yerleştirilmesiyle elde edilen F şekli FSY’nin boyutlandırılması Şekil 4.6 ile gösterilmiştir. Yapıda f = 0.1 mm ve t = 0.035 mm sabit olarak alınmış olup, “h, j ve k” parametreleri ise farklı değerlerde olarak hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 4.6 : F Şekilli FSY.

F Şeklinden oluşan frekans seçici yüzeye ait iletim katsayıları Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Şekil 4.6’da belirtilen “k, j ve h” değerleri Çizelge 4.2’de belirtilen ölçülerde alınmış ve dielektrik levhanın kalınlığı $d = 1$ mm olarak alınmıştır. CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak iletim katsayıları -10 dB’de hesaplanmıştır. F Şeklinde oluşan frekans seçici yüzeyin iletim katsayıları incelendiğinde iki farklı frekans band aralığında, band durdurucu karakteristiği gösterdiği gözlenmiştir.



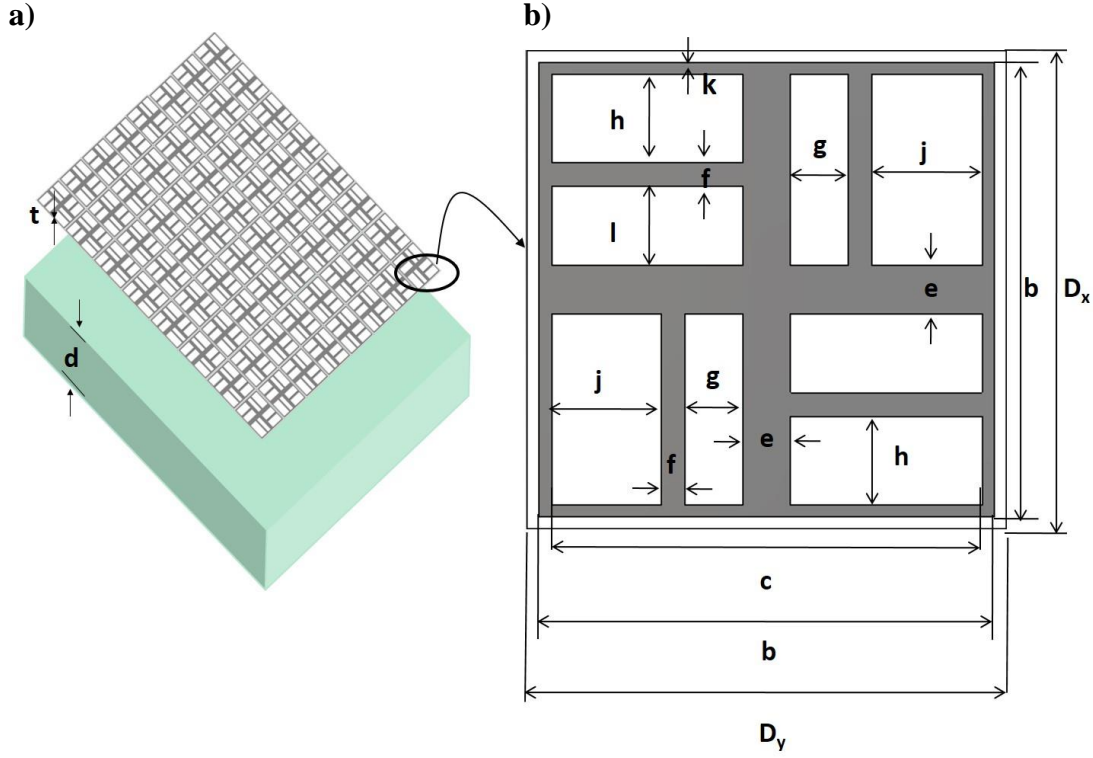
Şekil 4.7 : F şekli için iletim katsayıları [dB].

Çizelge 4.2 : F Şeklinde tasarlanan FSY’de “k, j ve h” parametresindeki değişim ve sonuçları.

“k” (mm)	“j” (mm)	“h” (mm)	Rezonans Frekans Bant Aralığı (GHz)	Rezonans Frekans Band Genişliği (GHz)	Maksimum Yansıma Frekansı (GHz)	Maksimum Yansıma Performansı (dB)
k=0.1 mm	j= 0.4195 mm	h=0.321 mm	15.59-23.31 GHz 53.72-66.40 GHz	7.72 GHz 12.69 GHz	52 GHz	-57.60 dB
k=0.125mm	j = 0.31 mm	h=22 mm	16.05-24.49 GHz 54.51-67.92 GHz	8.44 GHz 13.41 GHz	54.4 GHz	-57.69 dB
k=0.15 mm	j = 0.36 mm	h=0.27 mm	16.49-25.22 GHz 55.97-72.03 GHz	8.74 GHz 16.06 GHz	52.50 GHz	-49.48 dB
k =0.2 mm	j = 0.325 mm	h=0.235 mm	17.72-27.93 GHz 59.15-75.88 GHz	10.21 GHz 16.73 GHz	48.9 GHz	-48.41 dB

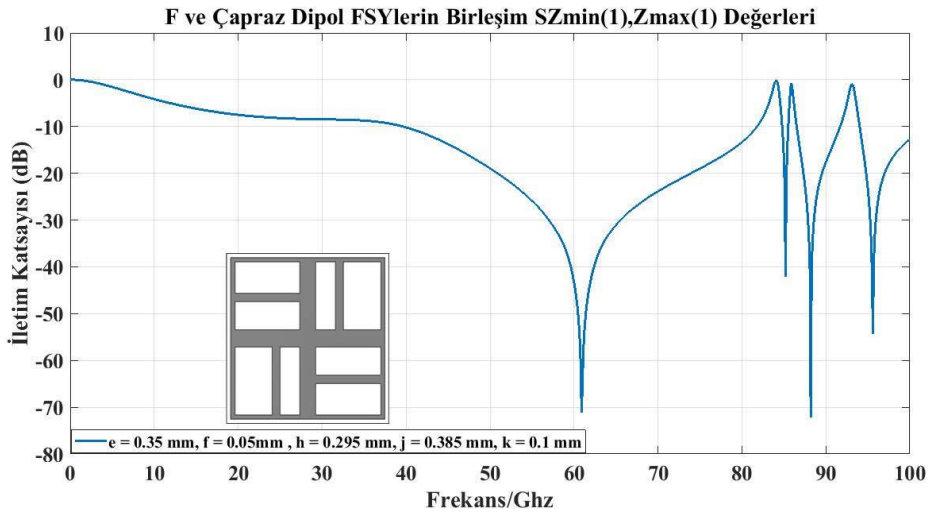
Yapılan ölçümler sonucunda Çizelge 4.2’ de de belirtildiği üzere k = 0.2 mm, j= 0.325 mm ve h = 0.235 mm alındığında elde edilen sonuç; 17.72-27.93 GHz frekans bantları arasında 10.21 GHz frekans genişliği ve 59.15 GHz – 75.88 GHz frekans bantları arasında 16.93 GHz’lik bant genişliği sağlayan 48.9 GHz’de -48.41 dB ile en yüksek yansıma performansı sunan çift bant band durdurucu tasarım elde edilmiştir.

Çapraz Dipol ve F Şeklinin birleştirilmesinden meydana getirilen frekans seçici yüzeye ait iletim katsayıları Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Aynı ayrı ele alınan F ve Çapraz Dipol Şekillerinin meydana getirdiği yansıma frekansını 30 GHz’in üzerine çıkartmak hedeflendiği için her iki ayrı şekil, tek bir yüzeyde birleştirilerek yansıma frekansları hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapılırken e = 0.35 mm, f = 0.05 mm, h = 0.295 mm, j = 0.385 mm ve k = 0.1 mm genişliklerinde alınmıştır.



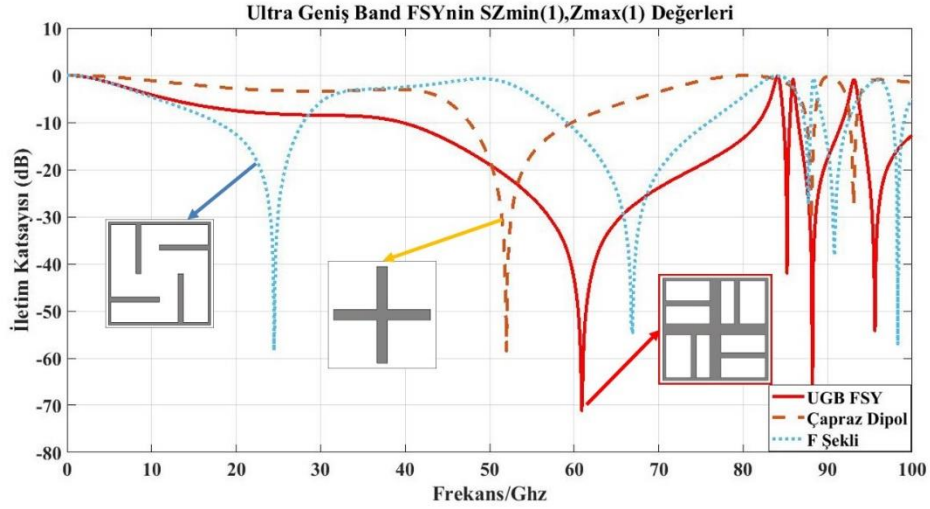
Şekil 4.8 : F Şeklinde tasarlanılan ultra geniş bant frekans seçici yüzey.

CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak -10 dB yansıma performansında iletim katsayıları hesaplanmıştır. Çapraz Dipol ve F Şeklinde oluşan frekans seçici yüzeyin iletim katsayıları incelendiğinde 39,59 – 81,80 GHz frekansları arasında, 42.21 GHz'lik bant genişliğinde band durduran karakteristiği sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 4.9 : UGB F şekli için iletim katsayıları [dB].

Çapraz Dipol, F Şekli ve her iki şeklin birleşimi olarak önerilen UGB frekans seçici yüzeye ait iletim katsayıları Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Her üç şeklin birlikte gösterilmesinde de anlaşılacağı gibi tasarlanmış olunan UGB FSY, en yüksek bant genişliğinde yansıma etkisi sergilemiştir.



Şekil 4.10 : Çapraz Dipol, F Şekli ve Önerilen UGB FSY’lerin rezonans frekans bant genişliklerinin bir arada gösterilmesi.

Yukarıda tasarlanan Çapraz Dipol ve F Şekli FSY’ler incelendiğinde V Bandı (40-75 GHz) sınırları içerisinde oldukları ve bu bandı tam kapsamadığı gözlemlenmektedir. Bunun üzerine iki yapının üst üste dielektrik levhanın bir yüzüne yerleştirilerek Şekil 4.2 deki önerilen UGB F şeklindeki frekans seçici yüzey elde edilmiştir. Oluşturulan bu yeni yapı üzerindeki F ve Çapraz Dipol’ün aralarındaki boşlukların ve metalik yüzeylerin genişliklerinin değiştirilmesiyle farklı sonuçlar elde edilmiştir.

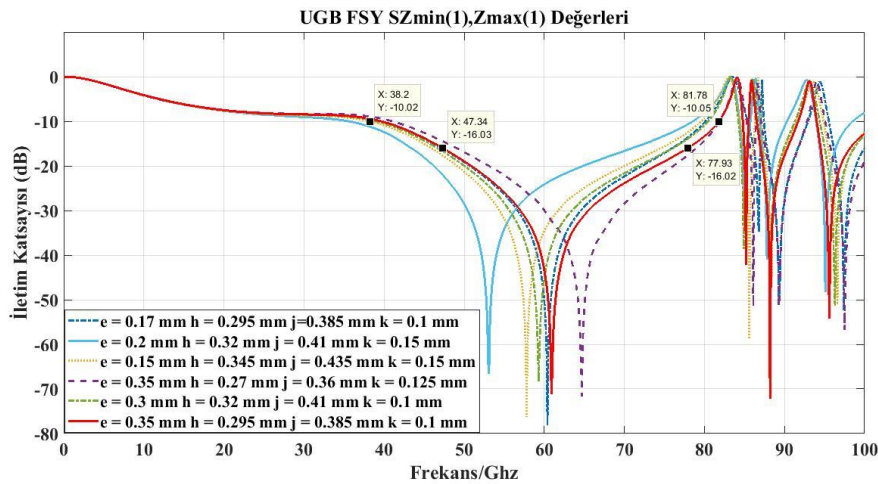
Önerilen F Şeklindeki UGB FSY’nin “e, h, j, ve k” ile Şekil 4.2’de gösterilen parametreler üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Değişikliklerin detayı olarak Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : F Şeklinde tasarlanan UGB FSY’de “e, h, j, ve k” parametrelerindeki değişim ve sonuçları.

“e” (mm)	“h” (mm)	“j” (mm)	“k” (mm)	Rezonans Frekans Bant Aralığı (GHz)	Rezonans Frekans Band Genişliği (GHz)	Maksimum Yansımaya Frekans (GHz)	Maksimum Yansımaya Performansı (dB)
e = 0.17 mm	h = 0.295 mm	j=0.385 mm	k = 0.1 mm	39.36–80.13 GHz	40.77 GHz	60.4 GHz	-68.07 dB
e = 0.2 mm	h = 0.32 mm	j = 0.41 mm	k = 0.15 mm	38.14-79.61 GHz	41.47 GHz	57.8 GHz	-66.32 dB
e = 0.15 mm	h = 0.345 mm	j = 0.435 mm	k = 0.15 mm	35.52-78.56 GHz	43.04 GHz	53.1 GHz	-56.50 dB
e = 0.35 mm	h = 0.27 mm	j = 0.36 mm	k = 0.125 mm	41.04-81.89 GHz	40.9 GHz	64.7 GHz	-61.65 dB
e = 0.3 mm	h = 0.32 mm	j = 0.41 mm	k = 0.1 mm	38.99-80.45 GHz	41.46 GHz	59.3 GHz	-58.22 dB
e = 0.35 mm	h = 0.295 mm	j = 0.385 mm	k = 0.1 mm	39.59-81.80 GHz	42.21 GHz	60.90 GHz	-61.10 dB

Kesavan A., Karimian R., ve Denidni T.A.’nın hazırlamış oldukları makalede -10 dB’ de 40-70 GHz frekans bantları aralığında 30 GHz’lik bant genişliği elde etmiştir. Ancak yeni tasarlanmış olunan UGB FSY yapısı sayesinde 39.59-81.80 GHz bantları aralığında 42.21 GHz’lik bant genişliği sağlayarak literatüre, daha geniş frekans bant aralıklı bir yapı eklenmiş oldu.

Çizelge 4.3. ve 4.4’nün birleştirilerek gösterildiği grafik Şekil 4.10’ da sunulmuştur.



Şekil 4.11 : UGB FSY’nin -10 dB ve -16 dB kazançlı “e, h, j ve k” parametrelerindeki değişim grafiğinin gösterimi.

Şekil 4.10’da görüldüğü gibi Çapraz Dipol’ün kalınlığında meydana gelen azalmada frekans bandı 35 GHz - 78 GHz bant aralığına kayarken; Çapraz Dipol’deki kalınlığın arttırılmasında frekans aralığının 39.6 GHz’ler ile 81 GHz frekansları arasına kaydığı görülmüştür.

Ayrıca Kesevan A., ve arkadaşları tarafından -16 dB değerinde tasarlanmış oldukları yapının frekans bant aralığı olarak 30 GHz tespit edilmiştir. Bu makalede de yeni tasarlanan Çapraz Dipol ve F Şeklinin -16 dB değerinde frekans bant genişlikleri ve parametrik değer ölçümleri Çizelge 4.4 de gösterilmiştir. Yeni tasarlanmış FSY ile Kesevan A. ve arkadaşlarının yaptıkları FSY’lerin -16 dB’de frekans bant genişliklerinin 30 GHz olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.4 : F Şeklinde tasarlanan UGB FSY’de -16 dB kazancında, “e, h, j, ve k” parametrelerindeki değişim ve sonuçları.

“e” (mm)	“h” (mm)	“j” (mm)	“k” (mm)	Rezonans Frekans Bant Aralığı (GHz)	Rezonans Frekans Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Yansım Frekans (GHz)	Maksimum Yansım Performansı (dB)
e = 0.17 mm	h = 0.295 mm	j=0.385 mm	k = 0.1 mm	47.18-76.00 GHz	28.82 GHz	60.4 GHz	-68.07 dB
e = 0.2 mm	h = 0.32 mm	j = 0.41 mm	k = 0.15 mm	45.88-74.60 GHz	28.73 GHz	57.8 GHz	-66.32 dB
e = 0.15 mm	h = 0.345 mm	j = 0.435 mm	k = 0.15 mm	43.39-71.03 GHz	27.64 GHz	53.1 GHz	-56.50 dB
e = 0.35 mm	h = 0.27 mm	j = 0.36 mm	k= 0.125 mm	49.00-79.03 GHz	30.02 GHz	64.7 GHz	-61.65 dB
e = 0.3 mm	h = 0.32 mm	j = 0.41 mm	k = 0.1 mm	46.64-76.07 GHz	29.43 GHz	59.3 GHz	-58.22 dB
e = 0.35 mm	h = 0.295 mm	j = 0.385 mm	k = 0.1 mm	47.31-77.94 GHz	30.63 GHz	60.90 GHz	-61.10 dB

4.2 II ve F Şeklinde Tasarlanan Frekans Seçici Yüzeylerin C, X ve Ku Bantlarındaki Rezonans Sonuçları

4.2.1 Giriş

Sarika, Malay R. Tripathy ve Daniel Ronnow tarafından yazılan “A Wideband Frequency Selective Surface Reflector for 4G/X-Band/Ku-Band,” makalesinde; 4G, X-bant ve Ku-bantları için geniş bant yansıtıcı bir frekans seçici yüzey reflektörü önermişlerdir. FR4 dielektrik levhanın ayrı katmanları üzerinde kazınmış, çift katmanlı yama FSY'den meydana gelmektedir. Hedeflenen frekans aralığı 5-16 GHz'dir. 10.4 GHz'lik bant durdurma genişliğine sahip iki katmanlı yapı ile elde edilmiştir. Simüle edilmiş sonuçlara yaklaşmak için Eşdeğer Devre (EC) yöntemi kullanılmıştır. Bu yansıtıcının avantajları ise 10.4 GHz'lik geniş bant durdurma ve tasarımın sadeliğidir. Çift katmanlı bir FSY'nin prototipi üretilmiş ve imalat sonuçları simülasyon sonuçlarıyla iyi bir uyum gösterdiğini ve bu nedenle de önerilen tasarımın metodolojisinin doğruluğunu ortaya koymuştur [28].

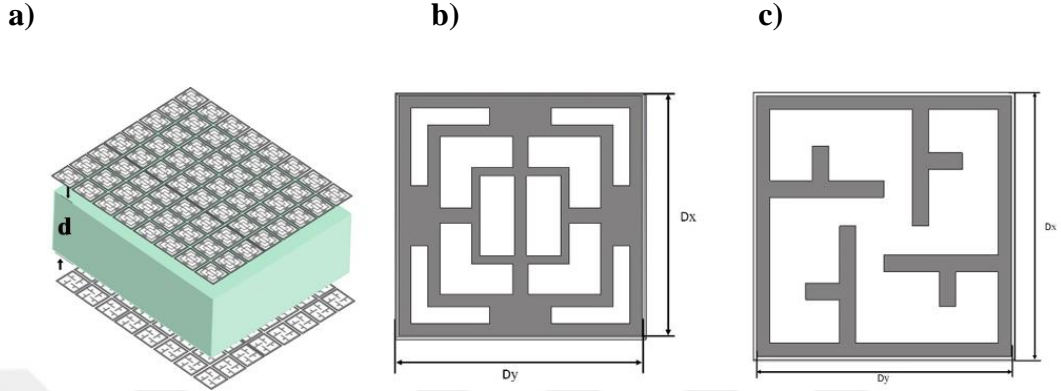
Sarika ve arkadaşlarının tasarlamış oldukları yapının sağlamış olduğu yansıma frekansı band genişliğini arttırmak hedeflenmiştir. Bu hedefi gerçekleştirmek için dielektrik levhanın her iki yüzeyine ayrı ayrı uygulanmak üzere yeni iki yapı önerilmiştir. Çalışmanın aşamalarında ilk olarak, kare halka içerisindeki boşlukta oluşan II Şekli ve ikinci olarak F Şeklinde tasarlanılan FSY'nin ayrı ayrı yansıma frekansları ele alınmıştır. Elde edilen sonuçların U (40-60 GHz) ve V (50-75 GHz) frekans bandlarının tamamını kapsamaması konusunda denemeler yapılmıştır. Dielektrik levhanın ön yüzeyinde II Şekli ve arka yüzeyinde ise F Şekli uygulandıktan sonra istenilen band genişliğine ulaşılması için yapıların parametrelerinde değişiklik yapılarak CST Microwave Studio Suite isimli yazılım ile hesaplanacaktır.

4.2.2 II ve F şeklinde tasarlanan frekans seçici yüzeylerin simülasyon tasarımı

Frekans seçici yüzeyin birim hücrenin boyutları x ve y yönlerinde sırasıyla $D_x = 8$ mm ve $D_y = 8$ mm' dir. Dielektrik malzeme olarak kayıpsız FR 4 kullanılmış ve dielektrik levhanın kalınlığı $d = 1$ mm, dielektrik katsayısı $\epsilon_r = 4.3$ tür.

Önerilen ultra geniş bant FSY, Şekil 4.12 a)'da gösterildiği gibi Şekil 4.12 b ve Şekil 4.12 c'de verilen birim hücrenin x-y yönlerinde periyodik olarak yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Önerilen yapı, Şekil 4.12 b) ile verilen iç içe

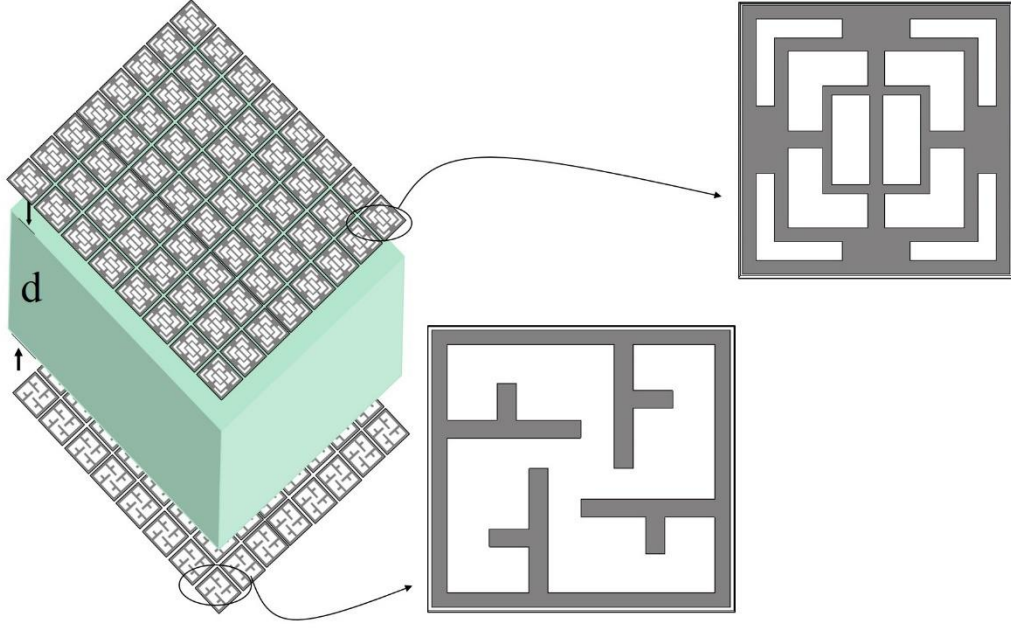
geçirilmiş kare halkaların merkezindeki II Şekli Frekans Seçici Yüzey ile Şekil 4.12 c) ile verilen F Şekli Frekans Seçici Yüzeylerin birleşiminden oluşmaktadır. Tez kapsamında önerilen FSY'lere ait iletim / yansımaya katsayılarının belirlenmesinde CST Microwave Studio Suite isimli yazılım kullanılmıştır.



Şekil 4.12 : a) Önerilen Geniş Bant FSY b) Dielektrik levhanın Ön Yüzeyi
c) Dielektrik levhanın Arka Yüzeyi.

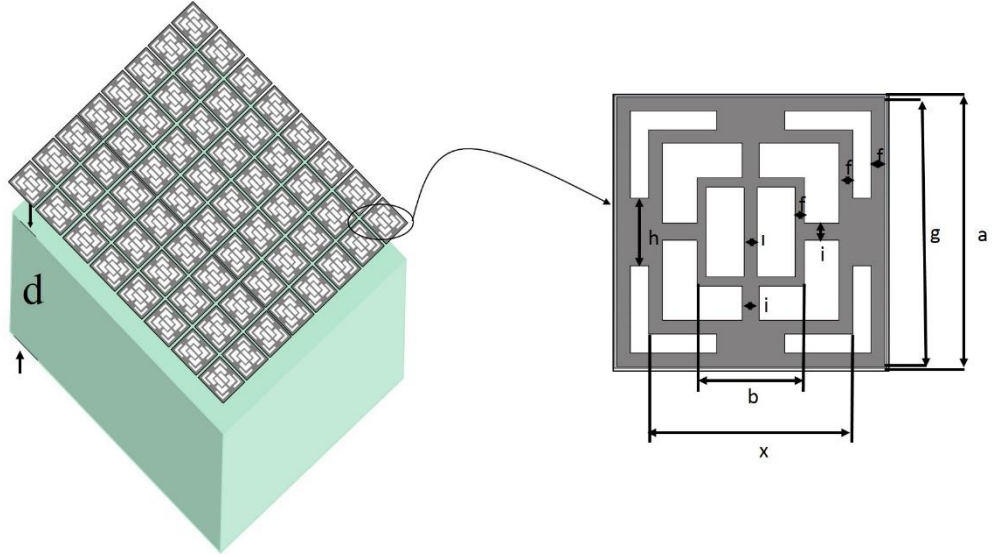
4.2.3 Metod

Her bir şekil öncelikle ayrı ayrı ele alınmış olup iletim ve yansımaya katsayıları CST programı kullanılarak hesaplanmıştır. İlk olarak Şekil 4.12 b)'deki II Şekli ele alınmıştır. İkinci olarak Şekil 4.12 c)'deki F şekli yalnız olarak incelenmiştir. Son olarak iki şekil birleştirilerek, Şekil 4.13'deki II ve F Şekillerinden oluşturulmuş, ultra geniş bant frekans seçici yüzey elde edilmiş ve iletim yansımaya katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki değerler elde edilmiştir.



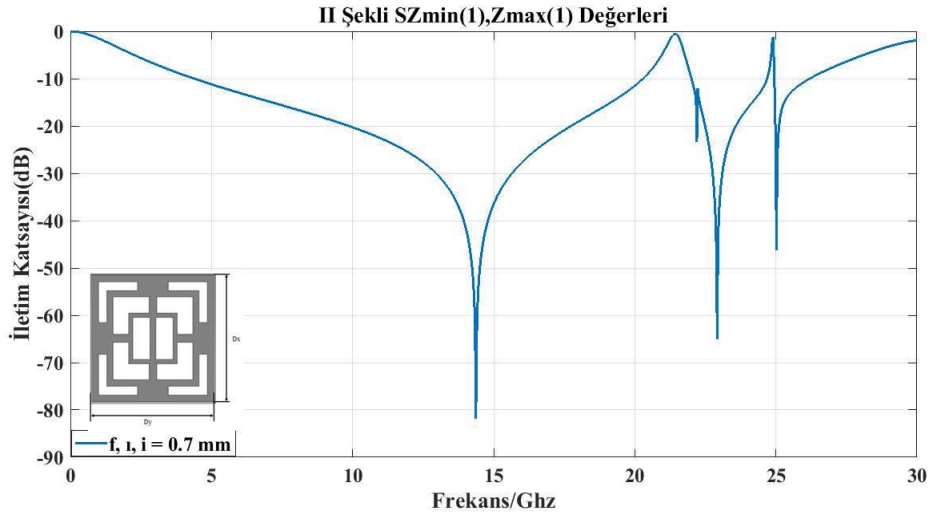
Şekil 4.13 : Ultra geniş bant frekans seçici yüzeyi oluşturan II ve F Şekillerinin birleşimi.

Şekil 4.14’te gösterilen dielektrik levhanın arka yüzeyinde herhangi bir şekil yoktur. Ön yüzeyin en dışındaki kare halkanın ölçüleri “g” ($g = 7.9 \text{ mm}$) $7.9 \text{ mm} \times 7.9 \text{ mm}$ boyutlarında ve malzeme kalınlığı ise $t=0.035 \text{ mm}$ alınmıştır. Metalik levhanın içerisinde bulunan kare halkaların genişlikleri “f” ile gösterilmiştir. Üç kare halkanın da kalınlıkları aynı olarak tasarlanmıştır. Kare halkaların en iç kısımda yerleştirilen II şeklindeki malzemenin genişliği “i” ve dıştan içe doğru kare halkanın bağlantı noktası ise “i” ile gösterilmiş ve CST Microwave Studio yazılımı ile iletim katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 4.14 : II Şeklindeki ultra geniş bant FSY.

İç içe kare halkaların merkezinde oluşan II Şeklindeki frekans seçici yüzeye ait iletim katsayıları Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Şekil 4.14'te görülen II Şeklinin “f, i ve i ” parametrelerindeki uzunlukları sırasıyla 0.2 mm'den 0.7 mm'ye kadar 0.1 mm artışla hesaplanmış ve dielektrik levhanın kalınlığı $d = 1$ mm sabit olarak alınmıştır. CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak iletim katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 4.15 : II Şekli için iletim katsayıları [dB].

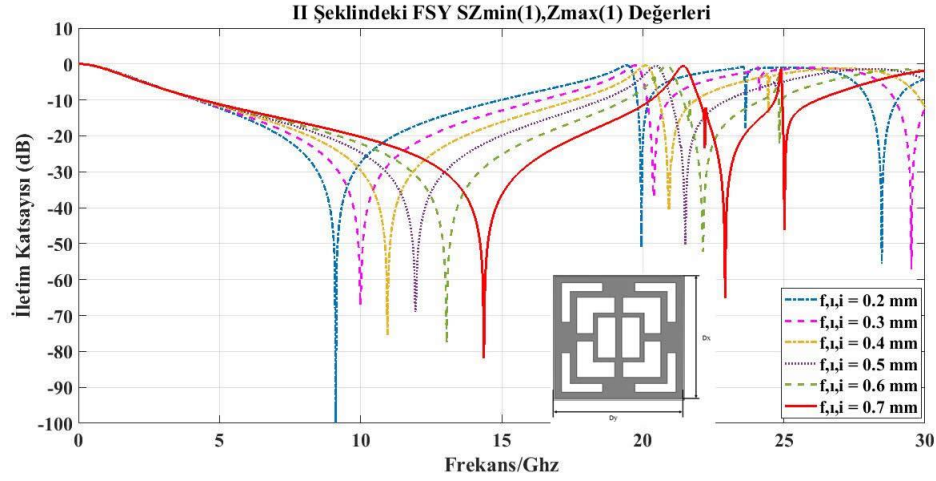
Bu konuda yapılan çalışma ve deneylerde elde edilen sonuçlara bakıldığında, rezonans frekans band genişliklerini arttırmak için dielektrik levhanın üzerinde bulunan yapının genişliği, kalınlığı, sinyalin geliş açısı gibi parametreleri üzerinde değişiklik yaparak istenen verim elde etmek mümkün olmaktadır. Bu makalede -10 dB değerinde rezonans bant genişliğinin artırılarak C, X ve Ku Bantlarında yansıma elde edebilme

hedeflendiği için öncelikle II Şeklindeki yapının genişliği arttırılarak istenilen bant genişliği elde edilmeye çalışılmıştır. II Şeklinin “f” (Dış kare iç çizgi), “ı” (İç dikey köprü Kalınlığı) ve “i” (Köprü bağlantıları) parametreleri ile gösterilen genişlikleri değiştirilmek suretiyle elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 : F Şeklinde tasarlanan FSY’de “f”, “ı” ve “i” parametrelerindeki değişim ve sonuçları.

“f” (mm)	“ı” (mm)	“i” (mm)	Rezonans Frekans Bant Aralığı (GHz)	Rezonans Frekans Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Yansıtma Frekans (GHz)	Maksimum Yansıtma Performansı (dB)
0.2 mm	0.2 mm	0.2 mm	4.17-14.98 GHz	10.82 GHz	9.12 GHz	-92.51 dB
0.3 mm	0.3 mm	0.3 mm	4.19-16.42 GHz	12.22 GHz	10 GHz	-57.10 dB
0.4 mm	0.4 mm	0.4 mm	4.28-17.58 GHz	13.30 GHz	10.95 GHz	-65.47 dB
0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	4.33-18.55 GHz	14.22 GHz	11.93 GHz	-59.10 dB
0.6 mm	0.6 mm	0.6 mm	4.32-19.40 GHz	15.07 GHz	13.05 GHz	-68.01 dB
0.7 mm	0.7 mm	0.7 mm	4.38-20.29 GHz	15.91 GHz	14.37 GHz	-71.80 dB

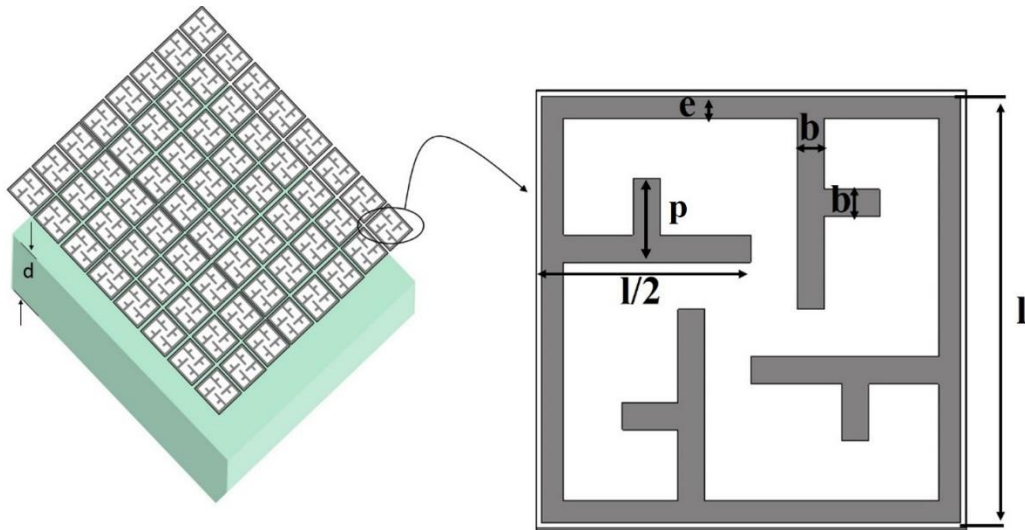
-10 dB kazanç değerinde bant genişliğinin arttırılması amacıyla yapılan optimizasyon çalışmaları Çizelge 4.5’te sunulmuştur. II Şeklinin “f, ı ve i” parametrelerindeki genişliklerin 0.7 mm olduğu durumda rezonans frekansının maksimum yansıtma frekansı 14.37 GHz’de olduğu, maksimum yansıtma performansının 71.80 dB ve bant genişliğinin ise 15.91 GHz olduğu yapılan ölçümler sonucunda elde edilmiştir. 4.38-20.29 GHz frekansları arasında II Şeklindeki FSY bant durduran karakteristiği göstermekte ve II Şeklindeki FSY’nin “f, ı ve i” genişliklerinin arttırılmasıyla bant genişliğinin de arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca her bir elde edilen sonucu aşağıda gösterilen Şekil 4.16’daki grafiği incelersek:



Şekil 4.16 : II Şeklinin dielektrik levhanın ön yüzeyine uygulanarak farklı parametrelerdeki değişim grafiği.

Kalınlık arttıkça frekans da alçak frekanslardan yüksek frekans istikametine doğru hareket ettiği ve bant genişliğinin de arttığını görmek mümkündür.

Dielektrik levhanın arka yüzeyinde periyodik olarak yerleştirilen, F Şeklindeki yapının dış karesinin, uzun ve kısa bacalarının genişlik ölçüleri “b ve e” ve F şeklinin kısa bacağının uzunluğu ise “p” ile gösterilmiştir. F Şeklinin boyutları Şekil 4.17’de sunulmuştur. Dielektrik levha üzerine uygulanan bakır F Şeklindeki yapının kalınlığı $t = 0.035$ mm alınmıştır.

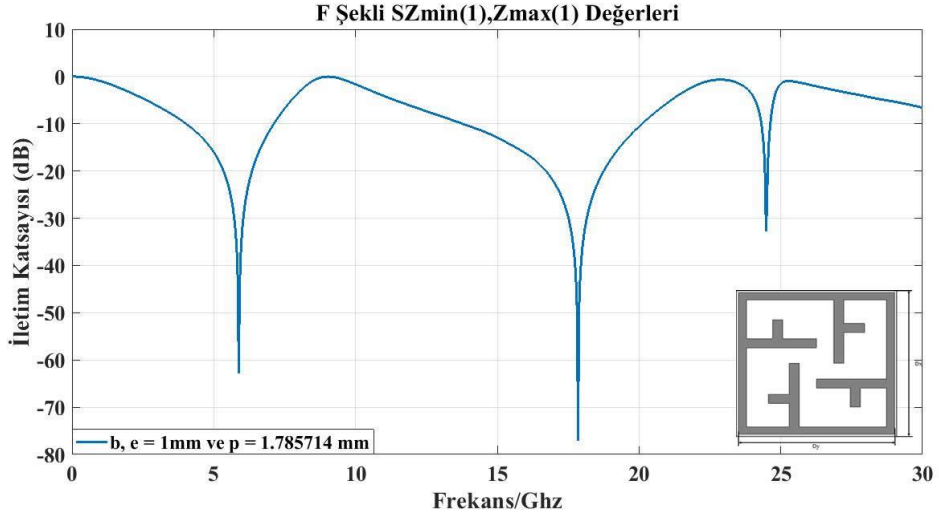


Şekil 4.17 : Dielektrik levhanın arka yüzeyine uygulanan F şeklindeki ultra geniş bant FSY.

Dielektrik levhanın arka yüzeyinde oluşturulan F Şeklindeki frekans seçici yüzeye ait iletim katsayıları Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Şekil 4.17’de belirtilen “b ve e” uzunluklarının her biri 0.25 mm’ den 1 mm’ye kadar, 0.25 mm değerinde artış gösterecek şekilde ve “p” değeri 1,410714 mm’den 0,125 mm artış göstererek hesaplanmış ve dielektrik levhanın kalınlığı d = 1 mm olarak alınmıştır. CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak F Şeklinde oluşan frekans seçici yüzeyin iletim katsayıları incelendiğinde, iki farklı frekans band aralığında band durduran karakteristiği gösterdiği gözlenmiştir.

Çizelge 4.6 : II Şeklinde tasarlanan FSY’de “b”, “e” ve “p” parametrelerindeki değişim ve sonuçları.

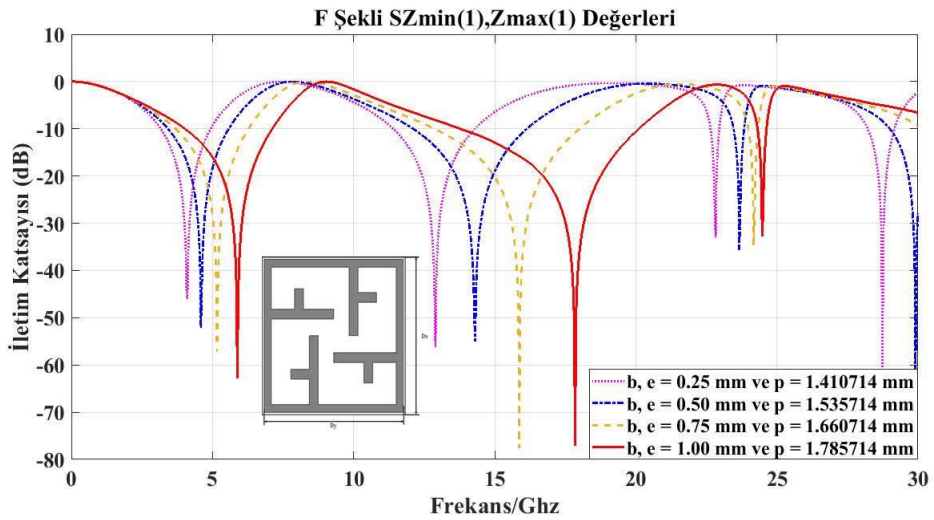
“b ve e” F Alt Kısım Ölçüleri (mm)	“p” (F Şekli Kısa Bacak Uzunluğu) (mm)	Rezonans Frekans Bant Aralığı (GHz)	Rezonans Frekans Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Yansım Frekans (GHz)	Maksimum Yansım Performansı (dB)
b,e=0.25 mm	p = 1,410714 mm	3.16-4.93 GHz	1.77 GHz	4.11 GHz	-35.75 dB
		11.40-14.30 GHz	2.90 GHz	12.9 GHz	-46.18 dB
b,e=0.50 mm	p = 1,535714 mm	3.42-5.57 GHz	2.15 GHz	4.59 GHz	-42.18 dB
		12.11-16.14 GHz	4.03 GHz	14.31 GHz	-44.37 dB
b,e=0.75 mm	p = 1,660714 mm	3.69-6.27 GHz	2.59 GHz	5.17 GHz	-47.2 dB
		12.87-18.00 GHz	5.14 GHz	15.87 GHz	-67.68 dB
b,e = 1 mm	p = 1,785714 mm	4.02-7.12 GHz	3.09 GHz	5.88 GHz	-53.40 dB
		13.77-20.11 GHz	6.33 GHz	17.85 GHz	-66.81 dB



Şekil 4.18 : F Şekli için iletim katsayıları [dB].

Yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçları Çizelge 4.6’da görmek mümkündür. -10 dB’de, “b ve e” parametrelerini 1 mm ve “p” parametresinin 1,785714 mm aldığıında, 4.02-7,12 GHz ile 13,77-20,11 GHz çift frekans bandları arasında sırasıyla 5,88 GHz ile 6,33 GHz bant genişliğini olduğu görülmüştür. F Şeklinde oluşan frekans seçici yüzeyin iletim katsayıları incelendiğinde, band durduran karakteristiği gösterdiği gözlenmiştir.

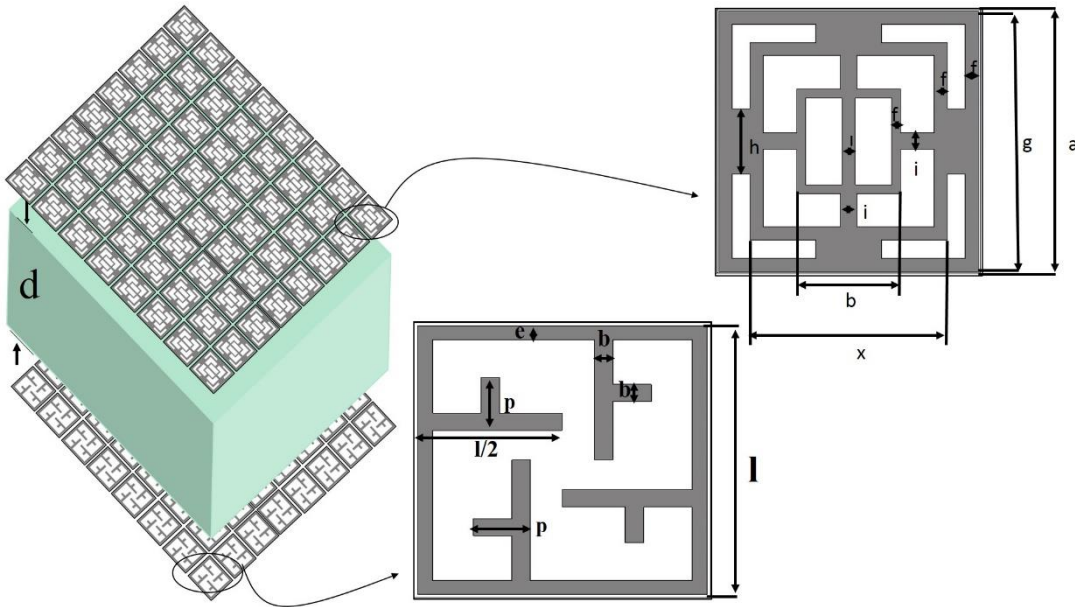
Şekil 4.17’de gösterilen yalnız F şekli kullanıldığında ise “b, e ve p” parametrelerini değiştirmek suretiyle yeni değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçları gösterir Çizelge 4.6 gösterilmiştir. “b, e ve p” parametrelerindeki değişimleri gösterir grafik aşağıdadır.



Şekil 4.19 : F Şeklinin dielektrik levhanın arka yüzeyine uygulanarak farklı parametrelerdeki değişim grafiği.

Grafikten de görüldüğü gibi kalınlık arttıkça yansıma frekanslarının alçak frekanslardan yüksek frekanslara doğru hareket ettiği ve bant genişliğinin de arttığını söylemek mümkündür.

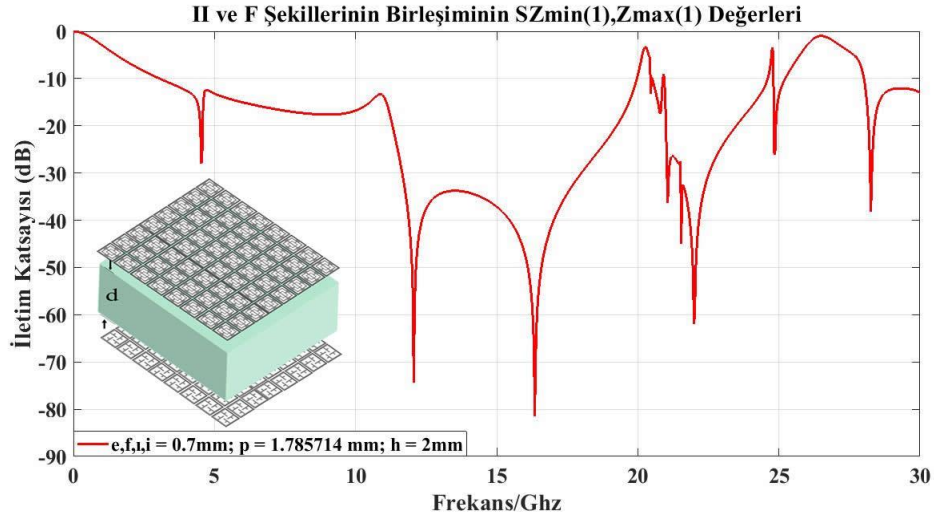
Şekil 4.19’da iç içe geçirilmiş karelerin merkezinde oluşan II Şekli ve F Şeklinden oluşan frekans seçici yüzeye ait iletim katsayıları gösterilmiştir. Her biri tek tek ele alınan II ve F Şekillerinin meydana getirdiği yansıma frekansını C, X ve Ku frekanslarının tamamını kapsayabilecek ölçülere çıkartmak hedeflendiği için her iki ayrı şekil, dielektrik levhanın ayrı yüzeylerinde birleştirilerek yansıma frekansları hesaplanmıştır.



Şekil 4.20 : II ve F Şeklinde Tasarlanan Ultra Geniş Bant FSY.

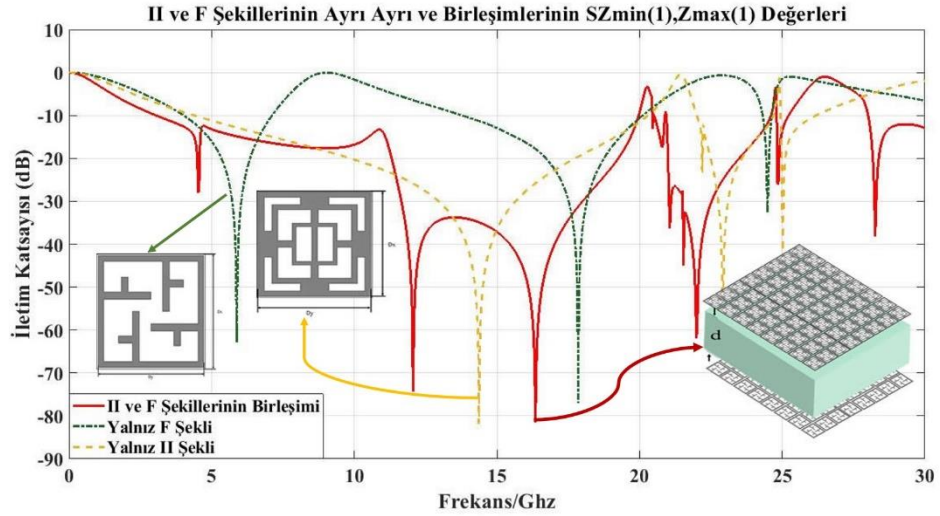
Şekil 4.19’da belirtilen genişlikler “e, f, l, i, p ve h” parametreleri dikkate alındığında en etkin değerleri “e, f, l ve i” parametreleri için 0.7 mm; “p” parametresi için 1.785714 mm, “h” parametresi sabit tutularak 2 mm olarak ve dielektrik levhanın kalınlığı $d = 1$ mm olarak alınmıştır.

CST Microwave Studio programı kullanılarak -10 dB yansıma performansında iletim katsayıları hesaplanmıştır. II ve F Şekillerinin birleşiminden meydana gelen frekans seçici yüzeyin iletim katsayıları incelendiğinde 3,05-19,97 GHz frekansları arasında, 16.92 GHz bant genişliğinde band durduran karakteristiği gösterdiği gözlenmiştir.



Şekil 4.21 : II ve F şekilleri için iletim katsayıları [dB].

II Şekli, F Şekli ve her iki şeklin iki farklı yüzeye uygulanarak birleşimi olarak önerilen UGB frekans seçici yüzeyin iletim katsayıları Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Her üç şeklin birlikte gösterilmesinde de anlaşılacağı gibi tasarladığımız II ve F Şekli UGB FSY, en yüksek bant genişliği sunmuştur.



Şekil 4.22 : Önerilen UGB FSY’ler; II, F ve her iki şeklin birleştirilmesi sonucunda elde edilen değerlerin bir arada gösterilmesi.

Yapılan ölçümler sonucunda Çizelge 4.6’da belirtildiği üzere, 1 mm genişlikte, 4.02-7.12 GHz ile 13.77-20.11 GHz frekans bant aralığında 3.09 GHz ve 6.33 GHz bant genişliği sağlayan 5.88 GHz’de -53.40 dB ve 17.85 GHz’de -66.81 dB ile en yüksek kazanç elde edilmiştir.

Yukarıda tasarlanan II ve F Şeklinde tasarlanan FSY’ler ayrı ayrı incelendiğinde C-bandı (4-8 GHz), X-bandı (8-12 GHz) ve Ku-bandı (12-18 GHz) sınırları içerisinde

oldukları; ancak bu bantları tam kapsamadığı gözlemlenmektedir. Bunun üzerine iki yapının dielektrik levhanın iki ayrı yüzeyine yerleştirilmek suretiyle Şekil 4.19’da önerilen UGB II ve F Şeklindeki birleşmiş FSY elde edilmiştir. Oluşturulan bu yeni yapı üzerindeki F ve II Şekillerin aralarındaki boşlukların ve metalik yüzeylerin genişliklerinin değiştirilmesiyle farklı sonuçlar elde edilmiştir.

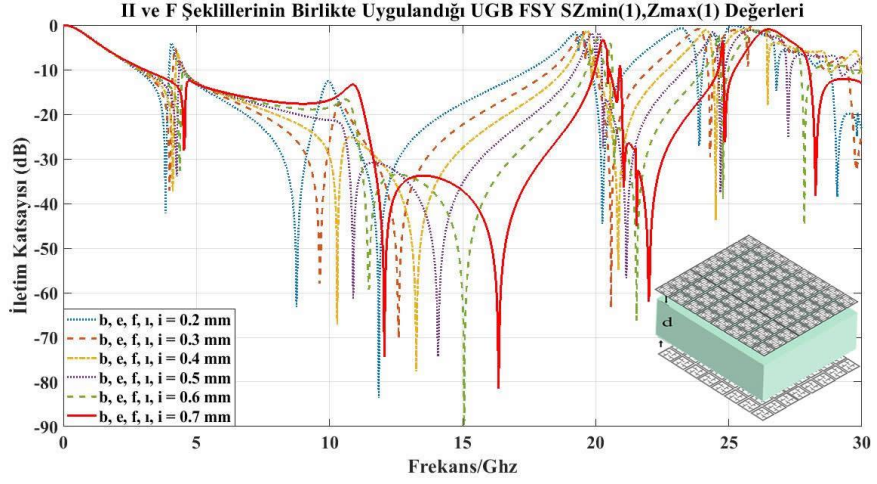
Önerilen II ve F Şeklindeki UGB FSY’nin -10 dB kazancı sabit tutulmuş ve “b, e, f, i, i” parametreleri Şekil 4.19’da gösterilen değerler üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Değişiklikler detaylı olarak Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : F Şeklinde tasarlanan UGB FSY’nin -10 dB kazancında, “c” ve “e” değişimleri ve sonuçları.

“b, e, f, i, i” Parametrik Değerleri (mm)	Rezonans Frekans Bant Aralığı (GHz)	Rezonans Frekans Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Yansıma Frekans (GHz)	Maksimum Yansıma Performansı (dB)
0.2 mm	2.76-3.94 GHz	1.22 GHz	3.84 GHz	-32.26 dB
	4.42-17.51 GHz	13.09 GHz	11.84 GHz	-73.97 dB
0.3 mm	2.83-4.17 GHz	1.29 GHz	4 GHz	-27.33 dB
	4.49-18.33 GHz	13.84 GHz	12.60 GHz	-70.42 dB
0.4 mm	2.87-4.23 GHz	1.36 GHz	4.21 GHz	-27.80 dB
	4.52-18.83 GHz	14.31 GHz	13.27 GHz	-67.93 dB
0.5 mm	2.91-4.35 GHz	1.44 GHz	4.26 GHz	-24.28 dB
	4.55-19.24 GHz	14.70 GHz	14.07 GHz	-64.17 dB
0.6 mm	2.92-19.65 GHz	16.73 GHz	15.06 GHz	-80.10 dB
0.7 mm	3.05-19.97 GHz	16.92 GHz	16.35 GHz	-71.33 dB

Sarika, Malay R. Tripathy ve Daniel Ronnow; 4G / X-bant / Ku-bantları için geniş bant yansıtıcı bir FSY reflektörü önermişler ve bu geniş bantlı FSY reflektör; FR4 dielektrik levhanın ayrı katmanları üzerinde kazınmış, çift katmanlı yama FSY’den meydana gelmiştir. Hedefleri frekans aralığı 5-16 GHz’dir. 10.4 GHz’lik bant genişliğine sahip iki katmanlı bant durdurucu bir yapı elde etmişlerdir.

Tasarlanmış olunan bu yeni II ve F Şeklindeki yapı sayesinde, 3.05-19.97 GHz bantları aralığında 16.92 GHz’lik bant genişliği sağlayan, daha geniş bantlı ve üç bantlı C-bandı (4-8 GHz), X-bandı (8-12 GHz) ve Ku-bandı (12-18 GHz)’nin tamamını kapsayacak yeni bir yapı elde edilerek literatüre katkı sağlanmıştır.



Şekil 4.23 : Dielektrik levhanın ön yüzeyine II ve arka yüzeyine F Şeklinin uygulanarak farklı parametrelerdeki değişim grafiği.

Şekil 4.23'deki grafikten de anlaşılacağı gibi, kalınlık arttıkça frekansta da alçak frekanslardan yüksek frekanslara doğru kayma hareketi görülmekte ve bant genişliğinin de arttığını söylemek mümkün olmaktadır.



5. F ŞEKLİNDEKİ UGB FSY İLE II ve F ŞEKLİNDE TASARLANAN FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERİN ÜRETİMİ VE ÖLÇÜMÜ

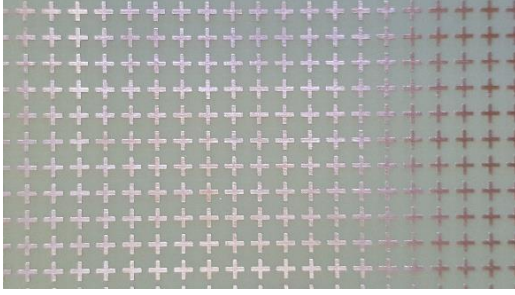
5.1 Giriş

F şeklindeki UGB FSY ile II ve F şekillerinin oluşturduğu FSY'nin tasarımları ve performanslarını sunan frekans analiz sonuçları Bölüm 4'de sunulmuştur. Her bir yapının simülatörde modellenmiş ve analizleri yapılmıştır. FSY'lerin FR4 dielektrik levha üzerine fabrikasyonunu Mega Sistem (MS) Elektronik Baskı firmasının katkılarıyla gerçekleştirmiştir. Üretilen yapılardan alçak frekansta çalışan II ve F şeklindeki UGB FSY'nin laboratuvar sonuçlarını TÜBİTAK/BİLGEM'in katkılarıyla elde edilmiştir. Burada öncelikle baskıları yapılan yapılar gösterilecek ve laboratuvar test sonuçları ele alınacaktır.

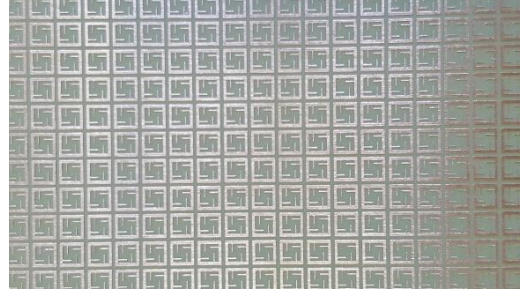
5.2 F Şeklinde Tasarlanan UGB FSY'nin Üretilmesi

F şeklinde tasarlanan UGB FSY'nin prototipi Şekil 5.1'de gösterildiği gibi üretilmiştir. Çapraz Dipol, F Şekli ve her iki şeklin birleşimi olan FSY, $d = 1$ mm kalınlığa sahip FR4 dielektrik levhanın üzerine, $t = 0.035$ mm kalınlıkta uygulanmıştır. CST Microwave Studio programı aracılığıyla bu yapılardan elde edilen analiz sonuçları 4. Bölümde detaylı bir şekilde incelenmiştir. F ve Çapraz Dipol Şekillerinin birleşiminden elde edilen yansıma frekansları ise 39,59 – 81,80 GHz frekansları arasında, 42.21 GHz'lik bant genişliğinde, band durduran karakteristiği sergilediği gözlenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, tasarlanan yapının çalışma frekans bant aralığının yüksek olması nedeniyle mevcut imkanlar dahilinde laboratuvar ortamında ölçümleri alınamamıştır.

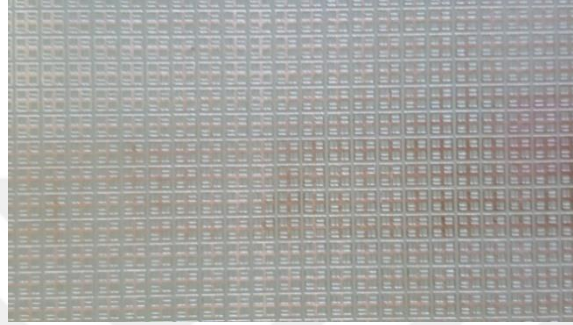
a)



b)



c)

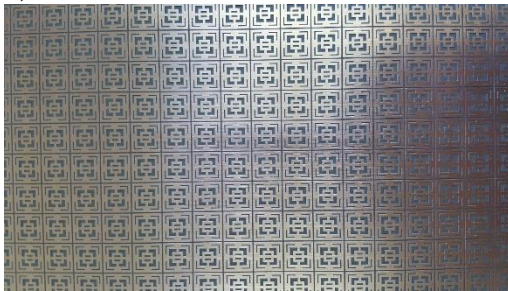


Şekil 5.1 : Prototipi üretilen a) Çapraz Dipol, b) F Şekli ve c) Çapraz Dipol ve F şeklinin birleşimi UGB FSY.

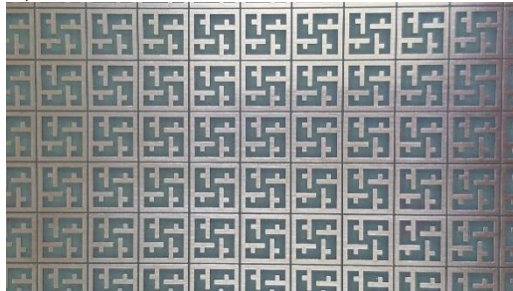
5.3 II ve F Şeklinde Tasarlanan Prototip FSY'nin Ölçümü

Modelleme ve simülasyon denemelerinde sayısal sonuçları analiz edilen II ve F Şeklindeki UGB FSY (Şekil 4.12) tasarımlarının fabrikasyonu gerçekleştirilerek yansıma frekans ölçümleri alınmıştır. II şekli dielektrik levhanın ön yüzüne ve F şekli ise arka yüzüne uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Metalik II ve F şekli yapıların kalınlıkları $t = 0.035$ mm, dielektrik levhanın kalınlığı $d = 1$ mm'lik FR4 ($\epsilon_r = 4.3$ mm) malzemesinden ve her iki yapı arasında 0.3 mm boşluk bırakılan bir prototip meydana getirilmiştir. Dielektrik levhanın boyutları ise 30 x 30'lik prototip panel Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

a)



b)



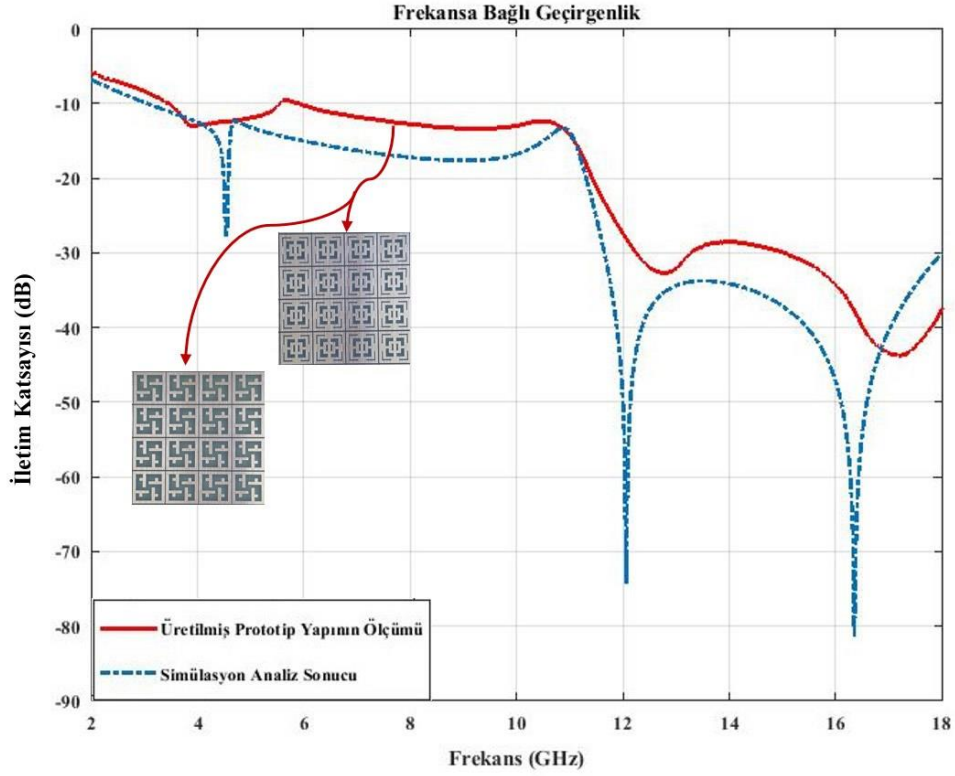
Şekil 5.2 : Prototipi üretilen a) II Şekli b) F Şeklindeki FSY'ler.

Şekil 5.2’de gösterilen yapılar simüle edilerek ölçülen yapıların aynısı olarak üretilmiştir.



Şekil 5.3 : Fabrikasyonu yapılarak ölçümleri alınacak olan FSY için hazırlanan düzenek.

FSY prototiplerinin yansıma frekans ölçümleri, 1-18 GHz bandında çalışan iki adet horn anten (ETS-Lindgren Model-3115) ve Agilent™ E8362B PNA Network Analyzer kullanılarak TÜBİTAK laboratuvarında yapılmıştır. Şekil 5.2’de görüldüğü üzere, iki anten birbirini görececek şekilde aynı doğrultuda ve aralarındaki uzaklık yaklaşık yarım metre olacak şekilde yerleştirilmiştir. 30 cm x 30 cm ölçülerindeki prototik yapının 25x25’lik bir alanına uygulanmıştır. Hazırlanmış olunan düzenekte 25 cm x 25 cm için 50 cm x 50 cm’lik metal bir çerçevenin içerisine 25 cm x 25 cm’lik boşluk oluşturulmuş ve II ve F şeklinde tasarlanan yapı içerisine oturtularak ölçümü alınmıştır.



Şekil 5.4 : Üretilmiş prototip yapının ölçümü ile simülasyon analiz sonucu.

Yapılan ölçümler ile simülasyon programında elde edilen sonuçları Şekil 5.4'te birlikte görmek mümkündür. Görüldüğü üzere; prototip yapının ölçüm sonucunda; 3.52 GHz ile 5.625 GHz'e ve 5.625 GHz'den 18 GHz'e kadar -10dB kazanç değerinde 5.625 GHz'den 18 GHz'e kadar -10dB kazanç değerinde ve genel olarak simülasyon değerlerine yakın olduğu gözlenmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Frekans seçici yüzeyler konusunda çok farklı çalışmalar incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda FSY'nin, hayatımızın pek çok alanlarında kullanıldığı anlaşılmıştır. İnsanlara çok önemli faydalar sağladığı gözlemlenmiştir. Özellikle askeri alanda yapılan çalışmaların hayati öneme haiz olduğu görülmüştür. Kara, hava ve deniz platformlarının beka tedbirleri kapsamında, FSY'lerin kullanılmasının zorunlu olduğu anlaşılmıştır. İstenilen frekansta sinyalin iletilmesi, istenilmeyen frekansta sinyalin yansıtılması ya da emilmesi sonucunda, mevcut sistemlerin çalışması sağlanabilir. Önerilen FSY tasarımlarının pratik uygulamalarda performanslarını görmek için prototip yapılar üretilmiş ancak mevcut imkanlar ölçüsünde II ve F şeklinde tasarlanan yapının ilgili iletim/frekans ölçümleri gerçekleştirilmiştir; benzetim ve ölçüm sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

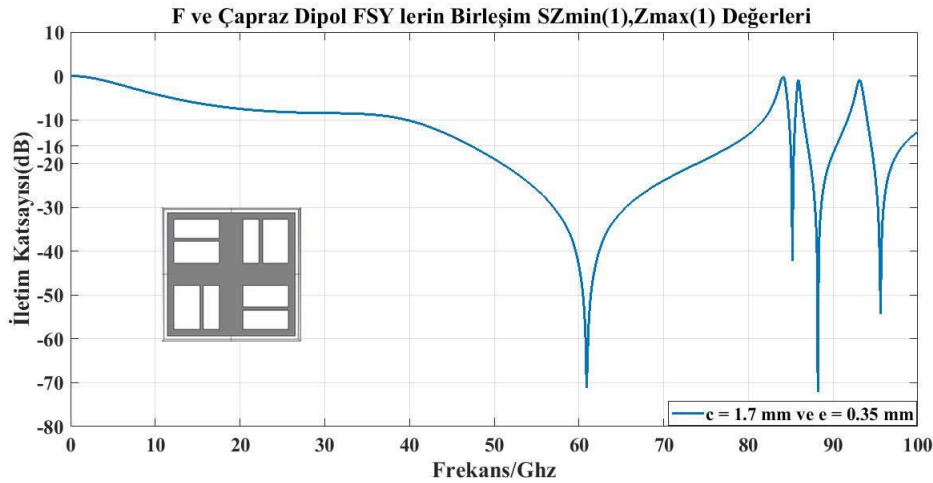
İlk yapılan çalışmada, iki farklı şeklin öncelikle ayrı ayrı rezonans frekansları ele alınmış ve daha sonra şekiller bir araya getirilerek oluşturulan FSY birim hücrenin karakteristiği incelenmiştir. Kesavan A., Karimian R., ve Denidni T.A.'nın 2016 yılında hazırladıkları makalede, V Bandı (40 GHz-75 GHz) içerisinde -10 dB yansıtma performansında, 40-70 GHz frekans bantları aralığında, 30 GHz'lik bant genişliği elde etmişlerdir. Tasarlanan yeni FSY ise, Kesavan A. ve arkadaşlarının önerdiği yapıdan, frekans bant genişliği açısından, daha geniş bir bant aralığına sahip olduğu görülmüştür.

İlk olarak Çapraz Dipol olarak tasarlanan yapının meydana getirdiği rezonans frekansı incelenmiş ve bu yapının V bandının tamamını kapsamadığı görülmüştür. İkinci olarak yeni tasarlanan F şekli ele alınmış ve Çapraz Dipol şeklinde olduğu gibi rezonans frekansının V bandını tam olarak kapsamadığı anlaşılmıştır. Ayrıca Çapraz Dipol ve F şekillerinin uygulandığı dielektrik levhalar değiştirilmiş fakat elde edilen sonuçlar incelendiğinde; frekansların çok az bir farkla yüksek frekanslara kaydığı görülmüştür.

rağmen rezonans frekans bant genişliğinin eşit olduğu görülmüştür. Verimliliğin artırılması hedeflenerek iki farklı şekil bir araya getirilmiştir.

Yeni üretilen Çapraz Dipol ve F şekillerinin birleşiminde, orta değerler hesaplama için belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmada elde edilen değerler incelenmiş ve verimin en iyi şekilde elde edilmesi maksadıyla iki farklı parametre üzerinde değişikliğe ağırlık verilmiş ve çok sayıda farklı parametrik değerlerin ölçülmesinde CST Microwave Studio yazılımı kullanılmıştır.

Sonuç olarak önerilen Çapraz Dipol ve F Şekilleri; -10 dB kazanç değerinde, 39.59 GHz ile 81.80 GHz frekans aralığında, 42.21 GHz'lik bant genişliği sağlayarak, U-bandı (40-60 GHz) ve V Bandı (50-75 GHz)'nın tamamını kapsayacak şekilde rezonans sağladığı görülmüştür. Bu konuda Kesevan A. ve arkadaşlarının tasarlamış oldukları Çapraz Dipol ve Fan Şekli -10 dB yansıma değerinde, 40-70 GHz bant aralığında 30 GHz bant genişliği sağlarken; yeni tasarlanan F Şeklindeki UGB FSY ise 39.59-81.80 GHz frekans bant aralığında, 42.21 GHz'lik bant genişliği sağlayarak daha geniş bir bant genişliği sunan sonuç elde edilmiştir. Ayrıca -16 dB'de ise Kesevan A. ve arkadaşlarının tasarlamış oldukları değer ile aynı bant genişliğinin elde edildiği de görülmüştür.



Şekil 6.1 : F Şeklinde tasarlanan UGB FSY'nin -10 dB ve -16 dB kazançlı $c=1.7\text{mm}$ ve $e=0.35\text{mm}$ olduğu durum için iletim katsayıları.

Normal geliş açısında maksimum yansıtma performansı 66.90 GHz'de, -61.10 dB olarak ölçülmüştür. CST Mikrodalga Studio simülasyon sonuçları, önerilen UGB FSY'nin 39.59-81.80 GHz frekansları aralığında band durduran filtre karakteristiği göstermektedir. Tasarlanan FSY'nin tek katmanlı minyatür geometriye ve geniş bantı

durduran yapıya sahip olması gibi faydaları vardır. Önerilen FSY filtresi, sistem korumasının gerekli olduğu çeşitli mm dalga uygulamalarında kullanılabilir.

İkinci olarak yapılan çalışmada; II ve F şekillerinin, öncelikle ayrı ayrı rezonans frekansları ele alınmış ve daha sonra şekilleri dielektrik levhanın ön yüzeyine II Şeklini ve arka yüzeyine F Şeklini uygulayarak oluşturulan FSY'nin birim hücre karakteristiği incelenmiştir.

Sarika ve arkadaşları, 2018 yılında 4G / X-bant / Ku-bantları için geniş bant yansıtıcı bir frekans seçici yüzey reflektörü önermişler ve bu geniş bantlı FSY reflektör; FR4 dielektrik levhanın ayrı katmanları üzerinde kazınmış, çift katmanlı yama FSY'den meydana gelmiştir. Hedeflenen frekans aralığı 5-16 GHz' dir. 10.4 GHz' lik bant genişliğine sahip iki katmanlı bant durdurucu bir yapı elde ettikleri görülmüştür.

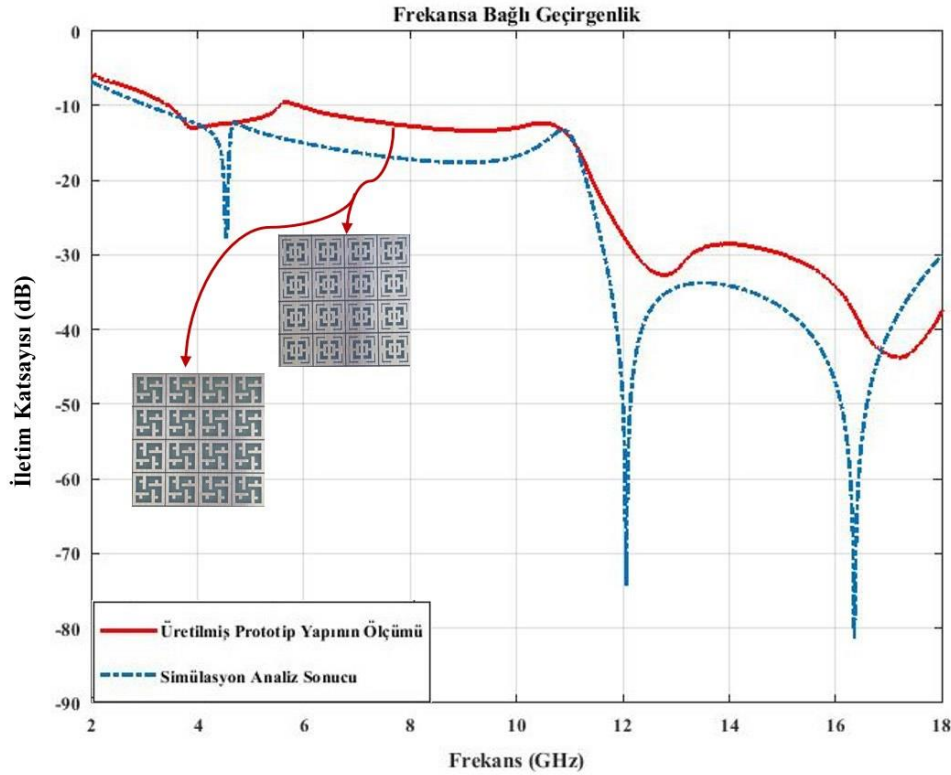
Bahsedilen çalışmadan yola çıkılarak, ilk olarak dielektrik levhanın ön yüzeyine üç kare halka içerisinde II Şekli uygulanmış ve meydana getirdiği rezonans frekansı incelenmiştir. Bu yapının 4.38-20.29 GHz'de 15.91 GHz'lik bant genişliği sağlayarak X ve Ku Bandını kapsadığı görülmüştür. İkinci olarak dielektrik levhanın arka yüzüne yeni tasarlanan F şekli ele alınmıştır. Rezonans frekansının 4.02-7.12 GHz ve 13.77-20.11 GHz bantlarında sırasıyla 3.09 GHz ve 6.33 GHz bant genişliğinde C, X ve Ku Bantlarını tam olarak kapsamadığı anlaşılmıştır. Verimliliğin artırılması hedeflenerek iki farklı şekil dielektrik levhanın farklı yüzeylerine uygulanarak bir araya getirilmiştir.

Yeni üretilen II ve F şekillerinin birleşiminde, farklı değerler hesaplama için belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmada elde edilen değerler incelenmiş ve verimin en iyi şekilde elde edilmesi amacıyla, iki farklı parametre ve çok sayıda parametrik değerlerin ölçülmesinde CST Microwave Studio programı ile hesaplamalar yapılmış ve grafikler MATLAB yazılımı kullanılarak çizilmiştir.

II ve F Şeklinde tasarlanan yapının prototipi üretilmiş ve 1-18 GHz frekans bant genişliğinde, TÜBİTAK laboratuvarında ölçüm sonuçları alınmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; benzetim ile ölçüm sonuçlarından meydana gelen yansıma frekans bantlarının birbiriyle çok uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak önerilen dielektrik levhanın iki ayrı yüzeyinde birleştirilerek uygulanan II (ön yüzey) ve F (arka yüzey) Şekilleri; -10 dB kazanç değerinde 3.05 GHz ile 19.97 GHz frekans aralığında 16.92 GHz'lik bant genişliği sağlayarak C-bandı (4-8 GHz),

X-bandı (8-12 GHz) ve Ku-bandı (12-18 GHz)'nin tamamını kapsayacak şekilde rezonans sağladığı tespit edilmiştir. Bu konuda Sarika, ve arkadaşları; 5-16 GHz'lik bant aralığı elde etmişlerdir. 10.4 GHz' lik bant genişliğine sahip 4G, X-bant ve Ku-bantları için geniş bant yansıtıcı bir frekans seçici yüzey reflektörü önerirken; bu çalışmada, CST Mikrodalga Studio simülasyon sonuçları ve prototip ölçüm sonuçlarına bakıldığında, yeni tasarlanan II ve F Şekillerindeki UGB FSY normal geliş açısında 3.05 GHz ile 19.97 GHz frekans aralığında, 16.92 GHz'lik bant genişliği ile maksimum yansıma performansı 16.65 GHz'de -71.33 dB'kazancında, 16.92 GHz'lik bir bant genişliği ile verimliliği ve ilave bir bandı daha içine alan yapı önerilmiştir. Ayrıca elde edilen simülasyon sonucu ile prototipi üretmiş olan yapının Şekil 6.2'de görüldüğü gibi yansıma frekans bant genişlikleri birbirine çok yakındır.



Şekil 6.2 : Üretilmiş prototip yapının ölçümü ile simülasyon analiz sonucu.

Önerilen FSY filtresi, sistem korumasının gerekli olduğu çeşitli mm dalga uygulamalarında kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında önerilen FSY yapıları, askeri ve sivil haberleşme sistemlerinde, bant-durduran geniş bant uygulamalarında kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Reid, S., ve Fara P.** (2013). Scientists Fromn Archimedes to Einstein, *Bilim Adamları TÜBİTAK Yayınları* ISBN 9754031010.
- [2] **Balanis, C.** (2005). Antenna Theory Analysis And Design, ISBN 047166782X., 978-0471667827.
- [3] **Balanis, C.** (2008). Modern Antenna Handbook, *John Wiley & Sons, Inc.*, ISBN: 9780470036341.
- [4] **Hand, T. H.** (2009). Design and Applications of Frequency Tunable and Reconfigurable Metamaterials, *Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Electrical and Computer Engineering in the Graduate School of Duke University.*
- [5] **Bayer Keskin, S. E.** (2013). İnce Tel Yapılardan Oluşan Frekans Seçici Yüzeylerden Ve Düz İletken Yüzeylerden Saçılma Analizi, Doktora Tezi.
- [6] **Jenn, D.** (1995). Radar and Laser Cross Section Engineering, *2nd Edition, AIAA.*
- [7] **Marconi, G. ve Franklin, C. S.** (1919). Reflector for use in wireless telegraphy and telephony, *US Patent* 1,301,473.
- [8] **Munk, B. A.** (1974). Periodic Surface for Large Scan Angles, *US Patent* 3,789,404, January.
- [9] **Munk, B. A.** (2000). Frequency selective surfaces – theory and design. *USA: JohnWiley & Sons, Inc.*, April.
- [10] **O’Nians, F. ve Matson, J.** (1966). Antenna feed system utilizing polarization independent frequency selective intermediate reflector, *US Patent* 3,231,892 January.
- [11] **Agrawal, N. D. ve Imbriale, W. A.** (1979) Design of a dichroic cassegrain subreflector, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 27, no. 4, pp. 466–473.
- [12] **Wu, T. K.** (1995). Frequency Selective Surface and Grid Array, *John Wiley & Sons, New York*, 1-14.
- [13] **Costa, F. ve Monorchio, A.** (2012). A Frequency Selective Radome With Wideband Absorbing Properties, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (Volume: 60, Issue: 6, June 2012) 2740 – 2747.
- [14] **Sohail, I., Ranga, Y., Esselle, K. P. ve Hay S. G.,** (2013). A linear to circular Polarization Converter Based On Jerusalem Cross FSS, *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).*

- [15] **Zahra, H., Rafique, S., Farhan, M.S. ve Esselleb, K. P.** (2015). A switchable frequency selective surface based on a modified Jerusalem-cross unit cell, *Antennas and Propagation (EuCAP), 2015 9th European Conference on*, 2164-3342
- [16] **Çiğdem, S., Tunca, C., Can, S., ve Yılmaz, A.E.** (2014). Frekans Seçici Yüzey; Kelebek Şekilli Birim Hücre Yapı Önerisi, *URSI-TÜRKİYE'2014 VII. Bilimsel Kongresi*, ELAZIĞ, 28-30 Ağustos.
- [17] **Tunca, C., Çiğdem, S., Can, S. ve Yılmaz A. E.,** (2014). KU ve K Bant Uygulamaları için Birleşik Altıgen Frekans Seçici Yüzey Tasarımı, *URSI-TÜRKİYE'2014 VII. Bilimsel Kongresi*, ELAZIĞ.
- [18] **Kutlu, Y.** (2014). Frekans Seçici Yüzeyler, Teknikleri ve Uygulamaları, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi ANTAKYA.*
- [19] **Ekici, S. ve Yazgan, E.** (2009). Frekans Seçici Yüzeylerin İletim ve Yansıma Karakteristiklerinin İncelenmesi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi ve Fuarı Bildirileri*
- [20] **Veselago, V. G.** (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, Jan., Feb.
- [21] **Pendry, J. B., Holden, A. J., Stewart, W. J., ve Youngs, I.** (1995). Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructure, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 25, pp. 4773–4776, 17 June.
- [22] **Bilim, D., Ünal, E. ve Karaaslan, M.** (2007). Halka Rezonatör (SRR) İçeren Metamateryal Yapıların Ansoft-HFSS Simülatör Kullanılarak İncelenmesi, *İTUSEM 2007: 3. İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu/ Bildiriler Kitabı.*
- [23] **Ünal, S., Çakır, G., Çimen, S. ve Ayten, U. E.** (2014)., İnce Tabakalı Dar-Dual Bant Frekans Seçici Yüzey Tasarımı, *ELECO 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, BURSA, 27-29 Kasım.
- [24] **Hosseinipannah, M. ve Wu, Q.** (2008). Frequency selective surfaces designing by modification of Jerusalem cross slot, *Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT 2008. International Conference on*, 2740 – 2747.
- [25] **Delihacioğlu, K.** (2012). S-Seklindeki Metal İletkenlerin Çok Bantlı Frekans Seçici Yüzey Özelliği, *ELECO 2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, BURSA, 29 Kasım - 01 Aralık.
- [26] **Delihacioğlu, K., Karaaslan, M., Ünal, E., Sabah, C., Bakir, M. ve Dinçer, F.** (2014). U-Şekilli Frekans Seçici Yüzeylerle Band Durduran Filtre Tasarımı *URSI-TÜRKİYE'2014 VII. Bilimsel Kongresi*, ELAZIĞ, 28-30 Ağustos.

- [27] **Kesavan, A., Student Member Karimian, R. ve Denidni, T. ,A.** (2016). A Novel Wideband Frequency Selective Surface for Millimeter-wave Applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (Volume:15), 1711 – 1714.
- [28] **Sarika, Tripathy, M. R. ve Ronnow, D.** (2018). A Wideband Frequency Selective Surface Reflector for 4G/X-Band/Ku-Band, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 81, 151-159, 2018
- [29] **Rappoport T. S.** (2002). Wireless Communucations – Principles and Practice, *Second Edition, Prectice-Hall, Inc.2002*, ISBN 0-13-042232-0.
- [30] **Molish A. F.** (2011). Wireless Communucations, *Second Edition, John Wiley and Sons Ltd.*, ISBN: 978-0-470-74186-3
- [31] **Huang, Y. ve Boyle, K.** (2008). Antennas: From Theory to Practice, *John Wiley and Sons, Inc., U.K.* ISBN 978-0-470-51028-5 (HB).
- [32] **Räisänen, A. V. ve Lehto, A.** (2003). Radio Engineering for Wireless Communication and Sensor Applications, *Artech House*, ISBN 1-58053-542-9.
- [33] **Saunders, S. R. ve Arajon-Zavala, A.** (2007). Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, *Second Edition, John Wiley and Sons Ltd.*, ISBN 0471-98857-X.
- [34] **Blaunstein, N. ve Christodoulou, C. G.** (2007). Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links, *John Wiley & Sons, Inc.*, , ISBN: 978-0-471-25121-7.
- [35] **Sung, H.H.** (2006). Frequency Selective Wallpaper for Mitigating Indoor Wireless Interference, *University of Auckland*,
- [36] **Celozzi, S., Araneo, R. ve Lovat, G.** (2008). Electromagnetic Shielding *John Wiley & Sons, Inc.*, ISBN: 978-0-470-05536-6.
- [37] **Mias, C., Tsakonas, C. ve Oswald C.** (2001). An Investigation into the Feasibility of designing Frequency Selective Windows employing periodic structures, *Dept. of Electrical & Electronic Eng. The Nottingham Trent University Burton Street Nottingham NG1 4BU U.K.* (Ref.AY3922).
- [38] **Tan, M. Z. ve McDonald, K. T.** (2012). Babinet’s Principle for Electromagnetic Fields, *Joseph Henry Laboratories, Princeton University*, (January 19, 2012; updated December 20, 2016).
- [39] **Marcuvitz N.**, (1986). “Waveguide Handbook” *New York: Peter Peregrinus Ltd.*,vol. 21.
- [40] **Callaghan, P., Parker, E. A. ve Langley, R. J.** (1991). Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces, *Microwave Antennas and Propagation, IEE Proceedings H*, vol. 138, no. 5, pp. 448–454.
- [41] **Hooberman, B.** (2005). Everything you ever wanted to know about frequency selective surface filters but were afraid to ask., 88(May), s.1-22.
- [42] **Vardaxoglou, J.C.** (1997). Frequency selective surfaces analysis and design. *USA: John Wiley & Sons, Inc.*

- [43] **Döken, B.** (2011). Geniş bantlı kablosuz iletişime uygun yapısal yüzey malzemesi tasarımı., *Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.*
- [44] **Mittra, R., Chan C.H. ve Cwik, T.** (1988). Techniques for analyzing frequency selective surfaces a review., *IEEE. 76(12)*, s.1593-1615.
- [45] **Lee, D.C.K., Sowerby K.W. ve Neve, M.J.** (2005). Shielding strategies for interference mitigation in indoor wireless communications with frequency selective surfaces., *Proc.IEEE AP-S Int. Symp.*, s.260-263.
- [46] **Bardi, I., Remski, R., Perry, D. ve Cendes, Z.** (2002). Plane wave scattering from frequency – selective surfaces by the finite – element method., *IEEE Transactions on Magnetics. 38(2)*, s.641-644.
- [47] **Kiani, G.I., Karlsson, A., Olsson, L., ve Esselle, K.P.** (2007). Glass Characterization for Designing Frequency Selective Surfaces to Improve Transmission through Energy Saving Glass Windows, *APMC Microwave Conference*,
- [48] **Ghaffer, I., Kiani Lars G. Olsson, Karlsson A., Karu, Esselle, P. ve Nilsoon M.**, Cross-Dipole Bandpass Frequency Selective Surface for Energy-Saving Glass Used in Buildings, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 2, February 2011.;
- [49] **Widenberg, B., Poulsen, S., ve Karlsson, A.** (2000). The design of window panes with high transmission at 900 MHz and 1800 MHz, *in Antenna 00, Nordic Antenna Symposium, Lund, Sweden*, pp. 185–190.
- [50] **Rafique, U., Ahmed, M. M., Haq, M. A. ve Rana, M. T.** (2011). Transmission of RF Signals through Energy Efficient Window Using FSS, *Emerging Technologies (ICET), Seventh International Conference.*
- [51] **Ullah, I., Zhao, X., Habibi, D. ve Kiani, G.** (2011). Transmission Improvement of UMTS and Wi-Fi Signals Through Energy Saving Glass Using FSS, *WAMICON 2011 Conference Proceedings*, 18-19 April.
- Url-1** <<http://www.radartutorial.eu>>, alındığı tarih: 23.10.2017.
- Url-2** <<http://www.fsemb.com/>>, alındığı tarih: 04.06.2018.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Fatih GÖKSEL
Doğum Yeri ve Tarihi : Yozgat 1981
E-Posta : efatihgoksel@gmail.com
ÖĞRENİM DURUMU :
Lisans : 2006, Kara Harp Okulu, Sistem Mühendisliği, Elektrik
Yükseklisans : 2018, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

TSK'nın farklı kadro ve görevlerinde, elektronik sistemlerin işletilmesi, kontrollerinin yapılması ve komuta edilmesinde yönetici olarak çalışmıştır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

BAYER KESKİN S.E., GÖKSEL F., 2018. A New Ultra-Wideband Frequency Selective Surface Design. *International Congress on engineering and life science -26-29 April 2018, Abstract Book ISBN: 978-605-4697-15-1Kastamonu/TURKEY*