



**ÇOK BANTLI KARAKTERİSTİĞE SAHİP AÇISAL KARARLI
ANTIPODAL F-TİPİ FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI VE ANALİZİ**

Mert KARAHAN

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mert KARAHAN

29/06/2021

ÇOK BANTLI KARAKTERİSTİĞE SAHİP AÇISAL KARARLI ANTİPODAL F-TİPİ FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI VE ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Mert KARAHAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Bu tez çalışmasında üç farklı frekans bandında bant durdurma ve iki farklı frekans bandında bant geçirme filtre özelliği gösteren çok bantlı karakteristiğe sahip frekans seçici yüzey (FSY) tasarımı sunulmaktadır. Önerilen FSY birim hücresi, dielektrik alttaşın her iki yüzeyi üzerinde antipodal (ters simetrik) olarak yerleştirilmiş F-tipi iletken elemanlar ve üst yüzeydeki F-tipi iletkenleri çevreleyen bir kare döngü iletken elemandan oluşmaktadır. Çok bantlı FSY yapısı yer kontrol istasyonunda C-bant uydu haberleşmesine imkân sağlarken, aynı zamanda Wi-Fi, WiMAX ve WLAN gibi yaygın olarak kullanılan belirli frekanslardaki geniş bant iletişim sinyallerini filtrelemek için özel olarak tasarlanmıştır. Önerilen yapı 2,4 GHz, 5,2 GHz ve 5,9 GHz'de çalışan üç durdurma bandının yanı sıra bant geçiren filtre özelliği gösteren 4,1 GHz ve 5,5 GHz'deki iki geçirme frekansında sahiptir. Bu yapı çok bantlı karakteristiğe sahip olmasına rağmen, yüzeye geliş açısı 0° ile 60° arasında değişen elektromanyetik (EM) dalgalara karşı hem enine elektrik (TE) hem de enine manyetik (TM) polarizasyonlarda yüksek kararlılıkta performans sergilemektedir. Çok bantlı FSY'nin eğik açılarda gelen EM dalgaya karşı rezonans frekanslarındaki bozulma (RFB) oranının geliş açısı 60° iken beş farklı rezonans frekansında ortalama %0,6'nın altında olduğu ve literatürdeki benzer çok bantlı yapılarla kıyaslandığında RFB değerinin çok düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. Önerilen yapının iletim karakteristiğini tahmin etmek ve analiz etmek amacıyla ayrıntılı eşdeğer devre modeli (EDM) çıkarılmıştır. Benzetim ortamında, eşdeğer devre analizinde ve üretimde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında tamamının uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Bilim Kodu : 90516
Anahtar Kelimeler : Frekans seçici yüzeyler, çok bantlı karakteristik, açısız kararlı yapılar, uydu haberleşmesi, elektromanyetik kalkanlama
Sayfa Adedi : 146
Danışman : Doç. Dr. Ertuğrul AKSOY

DESIGN AND ANALYSIS OF ANGULAR STABLE ANTIPODAL F-TYPE
FREQUENCY SELECTIVE SURFACE WITH MULTI-BAND CHARACTERISTICS

(Ph. D. Thesis)

Mert KARAHAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

This dissertation presents frequency selective surface (FSS) with multi-band characteristics that features tri band band-stop and dual-band passband filter. The proposed FSS unit cell comprises the F-type resonance elements disposed of antipodal (diametrically opposed to) one to another on both layer and a square loop surrounding all resonators on the top layer of the dielectric substrate. This structure is designed to be used as a frequency selective filter in the earth station performing satellite communication within the scope of a project. The design provides three stop-bands operating at 2.4 GHz, 5.2 GHz and 5.9 GHz that is used to filter out the potential interference from some broadband wireless communication systems such as WiMAX and WLAN; besides, two pass-band operating at 4 GHz and 5.5 GHz, which is used for C-band satellite communications systems at the earth station. Although this structure has a multi-band characteristic, it exhibits high stable performance for oblique incidence ranging from 0° to 60° for both transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarizations. Considering the resonant frequency deviation (RFD) at the incidence waves with different angles of arrivals, it was found that RFD at 60° is less than 0.5% on average and very low when compared with existing papers about multi-band FSS. The detailed equivalent-circuit model (ECM) is employed to predict and analyze the transmission characteristic of the proposed structure, and a good agreement between the simulated and measured transmission coefficients is obtained.

Science Code : 90516

Key Words : Frequency selective surfaces, multi-band characteristics, angular stability structures, satellite communication, electromagnetic shielding

Page Number : 146

Supervisor : Assoc. Prof. Ertuğrul AKSOY

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında bilgi birikimi ve deneyimiyle desteklerini esirgemeyen, yenilikçi görüşleri ve yol göstericiliğiyle bu uzun süreci yılmadan tamamlamamı sağlayan ve doktora eğitimimin ilk gününden itibaren akademik olarak gelişimimde benzersiz katkılar sağlayan değerli danışman hocam sayın Doç.Dr. Ertuğrul AKSOY'a, bu uzun süreçte yoğun çalışmalarına sabır gösterdiği ve manevi desteğinin yanında bana her zaman güzel bir çalışma ortamı sunduğu için canım eşime, çalışmalarımınla birlikte büyüyen oğullarıma ve bugünlere gelmemde pay sahibi olan tüm dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xixx
1. GİRİŞ.....	1
2. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER.....	5
2.1. Giriş.....	5
2.2. Periyodik Yapıların Analizi	8
2.2.1. Floquet teoremi ve uzamsal harmonikler	8
2.2.2. Tek yönlü düzlemsel periyodikliğe sahip yapılarda gelen düzlem dalgası	10
2.2.3. İki yönlü düzlemsel periyodikliğe sahip yapılarda gelen düzlem dalgası	12
2.3. Temel Çalışma Prensibi ve Karakteristikleri	13
2.4. Performansını Etkileyen Temel Faktörler	14
2.4.1. Birim eleman türleri ve geometrileri.....	14
2.4.2. FSY elemanlarının iletkenliği	18
2.4.3. FSY’de kullanılan dielektrik tabakalar	19
2.4.4. Dalganın FSY’ye geliş açısı ve polarizasyonu	21
2.5. Analiz Yöntemleri.....	24
2.5.1. Sonlu elemanlar metodu.....	25

	Sayfa
2.5.2. Moment metodu.....	25
2.5.3. Zamanda sonlu farklar metodu.....	26
2.5.4. İntegral denklem metodu.....	26
2.5.5. Eşdeğer devre modeli.....	27
2.6. Sınıflandırılması.....	30
2.7. Uygulama Alanları.....	33
3. FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI.....	37
3.1. Tek Bantlı FSY Tasarımları ve Analizleri	39
3.2. Antipodal F-Tipi FSY (AFTFSY) Tasarımı ve Analizleri.....	59
3.2.1. Tek ve çift bant F-tipi FSY'nin tasarım aşamaları.....	60
3.2.2. Çift bant AFTFSY'nin parametrik ve benzetim analizleri.....	66
3.2.3. Ultra geniş bant AFTFSY tasarımı	75
3.2.4. AFTFSY'nin konformal yüzeylere uygulanması (radom çalışmaları)	80
3.3. Çok Bantlı Karakteristiğe Sahip AFTFSY Tasarımı ve Analizi.....	82
3.3.1. Çift bant AFTFSY'den çok bantlı yapıya geçiş aşamaları.....	83
3.3.2. Uygulanabilir çok bantlı karakteristiğe sahip AFTFSY (ÇBKFSY) tasarımı	89
3.3.3. UÇBFSY'nin parametrik ve benzetim analizleri	95
3.3.4. UÇBFSY'nin eşdeğer devre analizi	101
3.3.5. UÇBFSY'nin rezonans frekanslarını değiştirme yöntemleri	118
3.3.6. UÇBFSY'nin literatürdeki benzerleri ile karşılaştırılması.....	125
3.3.7. UÇBFSY'nin üretimi ve deney düzeneği	129
3.3.8. UÇBFSY'nin benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	132
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	135

Sayfa

KAYNAKLAR 139

ÖZGEÇMİŞ 139



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. FSY'nin farklı eleman türlerinin performans analizi	17
Çizelge 2.2. Rezonans özelliklerine uygun olarak sıralanan FSY elemanlarının eşdeğer devre modellerine göre sınıflandırılması	29
Çizelge 3.1. Kare ve halka döngü FSY'nin parametre değerleri	40
Çizelge 3.2. 4'lü ve 6'lı yaprak FSY'nin parametre değerleri.....	42
Çizelge 3.3. Kare fraktal ve kare döngü fraktal FSY'nin parametre değerleri	44
Çizelge 3.4. Birleşik kare fraktal ve girintili birleşik kare fraktal FSY'nin parametre değerleri	46
Çizelge 3.5. Tek yönlü ve çift yönlü tırmık FSY'nin parametre değerleri	49
Çizelge 3.6. Testere dişi ve iç içe testere dişi FSY'nin parametre değerleri	52
Çizelge 3.7. Tek bantlı FSY tasarımlarına ait analiz sonuçları.....	58
Çizelge 3.8. F-tipi ve iç içe F-tipi FSY'nin parametre değerleri	61
Çizelge 3.9. İç içe yapıların normal yapılar üzerindeki meydana getirdiği değişim	62
Çizelge 3.10. UÇBFSY ve ÇBKFSY parametre değerlerinin karşılaştırılması	93
Çizelge 3.11. EDA'nın elektriksel (indüktif ve kapasitif) parametre değerleri	115
Çizelge 3.12. UÇBFSY'nin benzetim sonuçlarıyla EDA sonuçlarının karşılaştırılması	117
Çizelge 3.13. UÇBFSY'nin literatürdeki benzer çok bantlı FSY'lerle karşılaştırılması.....	128

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. FSY hakkında yapılan ilk patent çalışmaları, (a) Guglielmo MARCONI ve Charles Samuel FRANKLIN, “kablosuz telefon ve telgrafta kullanılmak üzere reflektör” – 1919, (b) Benedikt A. Munk, “büyük tarama açıları için periyodik yüzey” – 1968, (c) Benedikt A. Munk, “üç kutuplu yarık periyodik anten yüzeyi elemanları” – 1976	6
Şekil 2.2. Radar sistemleri tarafından yakalanmaması için Lockheed Martin firması tarafından tasarlanan F-117A Nighthawk (Gece Şahini – Hayalet Uçak) savaş uçağı	7
Şekil 2.3. Gelen düzlem dalga altında (a) 1B ve (b) 2B periyodik yapılar	11
Şekil 2.4. Frekans seçici yüzeyler ve temel filtre karakteristikleri	13
Şekil 2.5. Geometrik şekillerine göre FSY eleman türleri	15
Şekil 2.6. Birim elemanı kare döngü olan FSY’nin (3x3) sırasıyla üstten ve yandan görünüşü	18
Şekil 2.7. Kayıplı bir iletken üretilen kare döngü FSY’nin iletkenliğe bağlı olarak frekansındaki değişim ve eşdeğer devre analizi	19
Şekil 2.8. Dielektrik malzemenin gelen EM dalgaya etkisi, 1. Durum dielektrik tabakanın bir yüzüne yerleştirilmiş FSY, $\epsilon_{eff} = (\epsilon_r + 1)/2$; 2. Durum dielektrik tabakanın arasına yerleştirilmiş FSY, $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$	21
Şekil 2.9. Elektromanyetik dalgaın geliş açısına göre periyodik elemanlar arasındaki mesafenin değişimi	22
Şekil 2.10. Elektrik alan vektörü ile dipol eleman aynı düzlemde ve aynı yönde (solda), elektrik alan vektörü ile dipol eleman birbirine dik konumda (sağda)	23
Şekil 2.11. TE (Transverse Electric) dalgalar ile indüklenen indüktif bileşenler (solda), TM (Transverse Magnetic) dalgalar ile indüklenen indüktif bileşenler (sağda)	24
Şekil 2.12. (a) Manyetik alana paralel sonsuz uzunluktaki periyodik ızgaralar ve eşdeğer devresi, (b) elektrik alana paralel sonsuz uzunluktaki periyodik ızgaralar ve eşdeğer devresi	28
Şekil 2.13. Frekans seçici yüzeylerin taksonomisi	30

Şekil	Sayfa
Şekil 2.14. (a) Esnek yapılı geniş frekans bandına sahip tekstil FSY, (b) varikap diyot ile ayarlanabilir aktif FSY (üstte), yedi periyodik dipol ile üretilmiş giyilebilir FSY (altta) tasarımları.....	32
Şekil 2.15. (a) Subreflektörü FSY'den yapılan Cassegrain Reflektör Anten ve (b) Yansıtıcı yüzeyi ızgara biçiminde FSY'den olan bir Parabolik Reflektör Anten.....	34
Şekil 2.16. (a) Uçakların radar anten koruyucuları (radom) ve (b) mikrodalga fırınların cam kapak yapıları.....	34
Şekil 3.1. CST MWS tarafından periyodik yapıların analizinde kullanılan Floquet modları (a) TE(0,0) modu, (b) TM(0,0) modu	37
Şekil 3.2. Dielektrik altaş ve iletken elemandan oluşan tek katmalı bir FSY görünüşü	38
Şekil 3.3. (a) Kare döngü ve (b) Halka döngü FSY'nin birim eleman yapısı.....	39
Şekil 3.4. Farklı θ açıları için kare döngü FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği.....	40
Şekil 3.5. Farklı θ açıları için halka döngü FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği.....	41
Şekil 3.6. (a) 4'lü ve (b) 6'lı yaprak FSY'nin birim eleman yapısı	41
Şekil 3.7. Farklı θ açıları için 4'lü yaprak FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği.....	42
Şekil 3.8. Farklı θ açıları için 6'lı yaprak FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği.....	43
Şekil 3.9. (a) Kare fraktal ve (b) kare döngü fraktal FSY'nin birim eleman yapısı	44
Şekil 3.10. Farklı θ açıları için kare fraktal FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği.....	45
Şekil 3.11. Farklı θ açıları için kare döngü fraktal FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği.....	45
Şekil 3.12. (a) Birleşik kare fraktal ve (b) girintili birleşik kare fraktal FSY'nin birim eleman yapısı	46
Şekil 3.13. Farklı θ açıları için birleşik kare fraktal FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği.....	47
Şekil 3.14. Farklı θ açıları için girintili birleşik kare fraktal FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği	47

Şekil	Sayfa
Şekil 3.15. (a) Tek yönlü tırmık ve (b) çift yönlü tırmık FSY'nin birim eleman yapısı.	48
Şekil 3.16. Farklı θ açıları için tek yönlü tırmık FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği.....	49
Şekil 3.17. Farklı θ açıları için çift yönlü tırmık FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği.....	50
Şekil 3.18. (a) Testere dişi modelinin en küçük kesiti (b) testere dişi ve (c) iç içe testere dişi FSY'nin birim eleman yapısı.....	51
Şekil 3.19. Farklı θ açıları için testere dişi FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği.....	52
Şekil 3.20. Testere dişi ve iç içe testere dişi FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE moddaki S-parametre grafiği.....	53
Şekil 3.21. Tek yönlü tırmık ve iç içe tek yönlü tırmık FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE moddaki S-parametre grafiği	53
Şekil 3.22. Ölçek çarpanı (sf) parametresinin iç içe testere dişi FSY üzerindeki etkisini gösteren TE moddaki S-parametre grafiği	55
Şekil 3.23. İletken genişliği (w) parametresinin iç içe testere dişi FSY üzerindeki etkisinin gösteren TE moddaki S-parametre grafiği	55
Şekil 3.24. Farklı θ açıları için iç içe testere dişi FSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği.....	56
Şekil 3.25. Farklı θ açıları için iç içe testere dişi FSY'nin TM moddaki S-parametre grafiği.....	56
Şekil 3.26. Dielektrik alttaş malzemenin iç içe testere dişi FSY üzerindeki etkisinin gösteren TE moddaki S-parametre grafiği.....	57
Şekil 3.27. İç içe F-tipi FSY'nin tasarım aşamaları; (a) F-tipi FSY modelinin temel rezonans elemanı (FTR), (b) F-tipi ve (c) iç içe F-tipi FSY'nin birim eleman yapısı	60
Şekil 3.28. F-tipi ve iç içe F-tipi FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiği	61
Şekil 3.29. 18,4 GHz rezonans frekansında F-tipi FSY'nin yüzey akım dağılımı (A/m)	62
Şekil 3.30. 17,7 GHz rezonans frekansında iç içe F-tipi FSY'nin yüzey akım dağılımı (A/m)	63

Şekil	Sayfa
Şekil 3.31. Çift bant antipodal F-tipi FSY'nin (AFTFSY) tasarım aşamaları (a) Dielektrik alttaşın ön yüzündeki iç içe FSY yapısı, (b) alttaşın arka yüzüne yerleştirilen ters simetriği alınmış iç içe FSY yapısı, (c) AFTFSY'nin önden görünüşü, (ç) AFTFSY'nin 3B görünüşü.....	64
Şekil 3.32. İç içe F-tipi FSY ile AFTFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması.....	65
Şekil 3.33. AFTFSY ile normal F-tipi çift bant FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması.....	66
Şekil 3.34. f_x parametresinin AFTFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	67
Şekil 3.35. d_x parametresinin AFTFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	68
Şekil 3.36. l_x parametresinin AFTFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	68
Şekil 3.37. w_x parametresinin AFTFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	69
Şekil 3.38. sf parametresinin AFTFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	70
Şekil 3.39. Farklı θ açıları için AFTFSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği	71
Şekil 3.40. Farklı θ açıları için AFTFSY'nin TM moddaki S-parametre grafiği	72
Şekil 3.41. AFTFSY (iki), üç ve dört kollu F-tipi çift bant FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması.....	73
Şekil 3.42. AFTFSY (iki) ve yarım daire (YD) kollu F-tipi çift bant FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması....	74
Şekil 3.43. AFTFSY (iki) ve tek kollu F-tipi FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması	74
Şekil 3.44. AFTFSY'nin; (a) dielektrik yüzeyi üzerinde delikler açılması, (b) FTR üzerinde delikler açılması, (c) iletken elemanlarına ilave parça eklenmesi ve (ç) parametrelerin değiştirilmesi yoluyla yapılan UGB FSY birim eleman tasarım çalışmaları	76
Şekil 3.45. AFTFSY (1), delikli dielektrik AFTFSY (2) ve delikli FTR AFTFSY'nin (3) $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması.....	77

Şekil	Sayfa
Şekil 3.46. AFTFSY ile iletken parça eklenmiş AFTFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması	78
Şekil 3.47. AFTFSY ile parametre değerleri değiştirilmiş (1. yapı - Param.) AFTFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 3.48. AFTFSY ile parametre değerleri değiştirilmiş (2. yapı - Param.) AFTFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 3.49. Radom tasarımının yandan görünüşü ve konformal radom yüzeyine uygulanmış AFTFSY'nin perspektif görünüşü	80
Şekil 3.50. Konformal radom yüzeyine uygulanmış AFTFSY'nin ön yüz ve arka yüzden dimetrik perspektif görünüşü	81
Şekil 3.51. AFTFSY ile konformal AFTFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de ve TE moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması.....	82
Şekil 3.52. Halka döngü FSY ve çift bantlı AFTFSY'nin üst üste yerleştirilmesiyle elde edilen çok katmanlı yapının önden, arkadan, yandan ve 3B görünüşü.	84
Şekil 3.53. Farklı θ açıları için çok katmanlı halka / F-tipi FSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği	85
Şekil 3.54. Sekizgen döngü FSY ve çift bantlı AFTFSY'nin üst üste yerleştirilmesiyle elde edilen çok katmanlı yapının önden, arkadan, yandan ve 3B görünüşü	86
Şekil 3.55. Farklı θ açıları için çok katmanlı sekizgen/F-tipi FSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği	87
Şekil 3.56. İç içe testere dişi FSY ve çift bantlı AFTFSY'nin üst üste yerleştirilmesiyle elde edilen çok katmanlı yapının önden, arkadan, yandan ve 3B görünüşü	87
Şekil 3.57. Farklı θ açıları için çok katmanlı testere/F-tipi FSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği	88
Şekil 3.58. İç içe F-tipi FSY'nin tasarım aşamaları; 1. Adım - F-tipi FSY modelinin temel rezonans elemanı (FTR), 2. adım - F-tipi FSY'nin birim eleman yapısı, 3. Adım - iç içe F-tipi FSY'nin birim eleman yapısı, 4. Adım - Çift bant antipodal F-tipi FSY'nin (AFTFSY) ve son adım - çok bantlı karakteristiğe sahip AFTFSY (ÇBKFSY) tasarımı	89
Şekil 3.59. ÇBKFSY'nin tasarımında AFTFSY'den farklı olarak kullanılan parametreler	90

Şekil	Sayfa
Şekil 3.60. Farklı θ açıları için ÇBKFSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği.....	90
Şekil 3.61. UÇBFSY'nin birim hücre yapısı ve uzunluk parametreleri	92
Şekil 3.62. UÇBFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de TE ve TM moddaki iletim (trans.) ve yansıma (refl.) karakteristiği	93
Şekil 3.63. UÇBFSY'deki iletken elemanların dielektrik alttaşı üzerindeki yerleşimini gösteren üç boyutlu birim eleman yapısı.....	95
Şekil 3.64. l_F parametresinin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	96
Şekil 3.65. f_F parametresinin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	96
Şekil 3.66. w_F parametresinin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	97
Şekil 3.67. d_F parametresinin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	98
Şekil 3.68. l_S parametresinin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	99
Şekil 3.69. Farklı θ açıları için UÇBFSY'nin TE moddaki iletim (trans.) ve yansıma (refl.) karakteristiği	100
Şekil 3.70. Farklı θ açıları için UÇBFSY'nin TM moddaki iletim (trans.) ve yansıma (refl.) karakteristiği	101
Şekil 3.71. UÇBFSY görünümünün basitleştirilmesi (iç içe kare döngü yapılar).....	102
Şekil 3.72. Çerçeve eleman kare döngü yapının eş değer devre analizi	105
Şekil 3.73. Dört yöne simetrik 90° döndürülmüş FTR'nin parçaları ve ifade şekilleri	105
Şekil 3.74. Dört yöne simetrik 90° döndürülmüş dış FTR'nin eş değer devre analizi	106
Şekil 3.75. Dielektrik alttaşı üst yüzeyindeki dış FTR ile alt yüzeyindeki (a) komşu dış FTR ve (b) ölçeklendirilmiş iç FTR'ler arasında oluşan kapasitif etkiler	108
Şekil 3.76. Dielektrik alttaşı her iki yüzeyindeki FTR'lerin birbirlerine paralel yüzeyleri arasında oluşan kapasitanslar.....	109

Şekil	Sayfa
Şekil 3.77. Dielektrik alttaşın üst yüzeyindeki FTR'lerin eşdeğer devre modeli	110
Şekil 3.78. Dielektrik alttaşın alt yüzeyindeki dış FTR ile üst yüzeyindeki dış FTR, kare döngü iletken, komşu birim hücrenin üst yüzeyindeki dış FTR ve kare döngü FTR'ler arasında oluşan kapasitif etkiler.....	111
Şekil 3.79. UÇBFSY ve DKF'si olmayan yapının $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması.....	112
Şekil 3.80. Dielektrik alttaşın alt yüzeyindeki FTR'lerin eşdeğer devre modeli.....	112
Şekil 3.81. Dielektrik alttaşın UÇBFSY'nin eşdeğer devre modelindeki etkisi.....	113
Şekil 3.82. UÇBFSY'nin eşdeğer devre modeli	116
Şekil 3.83. UÇBFSY'nin rezonans frekansını değiştirmek için iletken ekleme/çıkarma.....	118
Şekil 3.84. FTR'ye eklenen iletken boyunun (dek) UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	119
Şekil 3.85. FTR'ye eklenen iletken kalınlığının (wek) UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	120
Şekil 3.86. FTR'den çıkarılan iletken boyunun (dek) UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	120
Şekil 3.87. FTR üzerindeki girinti (oyuk) sayısı artırılarak elde edilen iki yeni yapı	121
Şekil 3.88. FTR üzerinde oluşturulan oyukların etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	122
Şekil 3.89. PIN diyotlarla rezonans frekansı ayarlanabilen aktif FSY tasarımı	123
Şekil 3.90. Kesimde ve iletimde olan PIN diyotların önerilen yapının eşdeğer devre modeline etkisi.....	124
Şekil 3.91. PIN diyotların UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği	125
Şekil 3.92. UÇBFSY'nin baskı devre kazıma cihazı ile üretimi	129
Şekil 3.93. UÇBFSY'nin iletken soyma yöntemi ile hazırlanışı	130
Şekil 3.94. Üretimi tamamlanan UÇBFSY'nin detaylı görünümü	131
Şekil 3.95. UÇBFSY'nin ölçümü için kurulan deney düzeneği	132

Şekil	Sayfa
Şekil 3.96. UÇBFSY'nin ölçümü için kullanılan yankısız oda	133
Şekil 3.97. UÇBFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE moddaki benzetim ve ölçüm sonuçları.....	134



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
C	Kapasitif devre elemanı
dB	Desibel
fr	Rezonans Frekansı
Ghz	Giga Hertz
L	İndüktif devre elemanı
m	Metre
mm	Milimetre
nH	Nanohenry
Θ	Gelen bir dalganın yüzey normali ile yaptığı açı
pF	Pikofarad
R	Direnç
S	Siemens
Tanδ	Kayıp tanjant değeri
X	Reaktans
Y	Admitans
ε	dielektrik sabiti
λ	Dalga boyu
σ	Elektriksel iletkenlik
Ω	Ohm

Kısaltmalar

Açıklamalar

1B	Tek boyutlu
2B	İki boyutlu
3B	Üç boyutlu

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AD	Atenüasyon değeri
AFTFSY	Antipodal F-tipi frekans seçici yüzey
BDF	Bant durduran filtre
BG	Bant genişliği
BG_f	Kesirli bant genişliği
BGF	Bant geçiren filtre
CST	Computer Simulation Technology
MWS	Microwave Studio Suite
ÇBKFSY	Uygulanabilir Çok Bantlı Karakteristiğe Sahip AFTFSY
DKF	F'in dış kısa kolu
EDA	Eşdeğer analizi
EDM/	Eşdeğer devre modeli
EM	Elektromanyetik
EMG	Elektromanyetik girişim
EMK	Elektromanyetik korunma/kalkanlama
FDTD	Zamanda sonlu farklar metodu
FEM	Sonlu elemanlar metodu
FSY	Frekans seçici yüzey
FTR	F-tipi rezonatör
GBHA	Geniş bantlı boynuz anten
GPS	Küresel konumlama sistemleri
HF-FSY	Halka / F-tipi çok katmalı FSY
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEM/BEM	İntegral denklem metodu
İK	İletim katsayısı
İK_F	F'in iç kısa kolu
KF	Kare fraktal
MoM	Moment metodu
ORFB	Ortalama rezonans frekansındaki bozulma
PCB	Baskı devre kartı
RFB	Rezonans frekansındaki bozulma

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiyle birlikte insanların iletişim ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik ticari ve askeri kullanıma sunulan birçok elektronik cihaz bulunmaktadır. Radyodan televizyona, cep telefonlarından uydu haberleşme sistemlerine kadar uzanan bu elektronik cihazların sayısı ve çeşitliliği artan ihtiyaçlarla orantılı olarak gün geçtikçe çoğalmaktadır. Küresel dünyada bilgiye ulaşma isteği insanları daha uzak mesafelerde çalışmaya zorlamaktadır. Bu uzaklığın artması haberleşme sistemlerinde kullanılan iletişim ortamının kabloludan kablosuza doğru geçişini hızlandırmaktadır.

Küçük veri paketleri ve ses iletimiyle kullanıma sunulan kablosuz haberleşme sistemleri teknolojinin gelişimi, ihtiyaçlar ve artan talepler doğrultusunda görüntü ve büyük veri paketlerinin gönderilmesine olanak sağlar hale gelmiştir. Kablosuz bilgi iletiminde kullanılan elektromanyetik (EM) dalgaların frekans aralığı, bir başka deyişle frekans spektrumu, kullanıldıkça tükenmeyen ancak belirli kapasiteye sahip sınırlı bir kaynaktır. Sınırlı bir kaynağın kullanımının artması iletişim sistemlerinin birbirinden etkilenme olasılığını gün yüzüne çıkarmaktadır. Elektromanyetik girişim (EMG) olarak da adlandırılan bu olay haberleşme sistemlerinin çalışma performansını düşürmekte, dayanıklılığını azaltmakta, istenmeyen karakteristik özellikler sergilemesine ve/veya bilgilerin hatalı işlenmesine neden olabilmektedir.

Son yıllarda kesintisiz ses ve veri haberleşmesini sağlamak amacıyla sınırlı frekans bandının farklı haberleşme/modülasyon teknikleriyle kullanılması elektromanyetik girişimi engelleyememektedir. Bu durum elektromanyetik korunmanın/kalkanlamanın (EMK) önemini daha da artırmaktadır. EMK, istenmeyen EM dalgaların etkisini azaltmak amacıyla bir sistemin belirli bir yöntemle EM olarak izole edilmesi olarak adlandırılabilir. EMK'yı sadece dışarıdan gelen istenmeyen ışıınımı/radyasyonu engelleme olarak düşünmemek gerekir. Bazı durumlarda elektronik sistemlerden saçılan EM dalgaların başka sistemler tarafından tespit edilmesini önlemek amacıyla da kullanılabilir. EMK'da temel prensip gelen/yayılan istenmeyen EM dalgayı yansıtma/saçılma yöntemiyle dağıtmak veya soğurma yöntemiyle ısıya dönüştürerek kaybolmasını sağlamaktır.

Günümüzde; kablosuz bağlantı sistemleri (Wi-Fi, WiMAX ve WLAN), cep telefonları (GSM), kablosuz tanımlama sistemleri (RFID ve NFC), bluetooth cihazları, televizyon ve radyo yayınları, uydu haberleşme sistemleri, küresel konumlama sistemleri (GPS) gibi kablosuz haberleşme sistemlerinin kullanımı insan yaşamını kolaylaştırması nedeniyle kaçınılmaz olmuştur. Hatta birkaç kablosuz haberleşme yönteminin aynı elektronik sistem içerisinde kullanılması gereksinim haline gelmiştir. Bu durum EMK'nın çeşitli ortamlarda farklı yöntem ve malzemelerle kullanımını artırmaktadır. EMK için kullanılabilen geleneksel malzemeler metal, seramik ve plastik malzemelerdir. Düşük frekanslı EM alan koruması sırasında soğurma kaybı yansıma kaybından daha önemlidir, bu nedenle genellikle çelik, plastik malzemeler veya yüksek geçirgenliğe sahip EM malzemeler kullanılmaktadır. Yüksek frekanslı EM alan korumasında ise yansıma kaybı oldukça kritiktir, bu yüzden alüminyum folyo veya iletken kaplama malzemeler daha çok tercih edilmektedir [1].

EMK'da kullanılan yöntem korunacak elektronik sistemin işleviyle doğrudan alakalıdır. Eğer sistemin dış dünya ile kablosuz bir bağlantı ihtiyacı yoksa ve dışarıdan gelen EM dalgalardan tamamen izole edilmesi gerekiyorsa yüksek yansıtıcılıklarından ötürü metal gibi iletken malzemeler bu sistemlere Faraday Kafesi ilkesinde bir koruma sağlayacaktır. Ancak belirli frekans aralığında hem EM koruma hem de kablosuz iletişim ihtiyacı var olduğunda EMK için frekans soğurucu veya seçici özellikli malzemelerin kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bu durum için kullanılan yöntemler (malzemeler) birisi de Frekans Seçici Yüzeylerdir (FSY).

Frekans seçici yüzeyler, gelen elektromanyetik (EM) dalganın frekansına bağlı olarak iletim ve yansıma karakteristikleri değişen iletken eleman dizilerine sahip periyodik yapılardır. FSY'ler genellikle EM dalgaları yansıtmak, iletmek veya soğurmak için tasarlanmış iletken yamalar veya açıklık elemanlarından oluşan periyodik yapılar olarak da tanımlanırlar [2]. FSY; yapısına, tasarımına ve şekline bağlı olarak yüzeyine belirli bir açıyla gelen EM dalgayı tamamen ya da kısmen diğer tarafına geçirmekte veya geri yansıtmaktadır. Bundan dolayı uzamsal filtreler olarak da tanımlanır [3].

FSY'lere yönelik çalışmalar, özellikle askeri uygulama alanlarındaki gelişim nedeniyle son yıllarda artış göstermiştir. Radar kesitinin ayarlanması FSY teknolojisinin en heyecan verici işlevi olarak düşünülse de frekans seçici yüzeylerle geçmişten günümüze, telekomünikasyon sistemlerinden optik sistemlere kadar çok geniş bir yelpazede birçok yararlı ve farklı

uygulamada kullanılmaktadır. Mikrodalga fırınlar, reflektör antenler, radome yapıları, radyo frekansı ile tanımlama (RFID) sistemleri, giyilebilir teknolojiler ve akıllı ürünler FSY'lerin başlıca uygulama alanlarındandır.

Bu tez çalışmasında ilk olarak FSY'lerle ilgili literatür taraması yapılarak farklı geometrilere sahip yapıların karakteristik davranışları incelenmesi hedeflenmektedir. Elde edilen bilgi birikimi kullanılarak tek bantlı basit yapıları birbirinden farklı FSY tasarımları gerçekleştirilecektir. Tez çalışması boyunca FSY tasarımını yapmak, bileşenlerinin EM karakteristiklerini analiz etmek ve parametrelerini optimize etmek amacıyla Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio Suite (MWS) programı kullanılacaktır. Tasarlanan tek bantlı yapılarla FSY'lerin modellemesinin nasıl yapıldığı, analizlerinde hangi grafiklerin kullanıldığı, yapılan analizlerin sonucunda FSY'lerin hangi karakteristik özellikleri gösterdikleri ve bu özelliklerin grafikler üzerinden nasıl okunduğu, rezonans elemanlarına ait parametrelerin ve kullanılan dielektrik malzemelerin FSY'nin performansı üzerindeki etkilerinin neler olduğu konusunda çalışmalar gerçekleştirilecektir. Her tasarımın birbirinden farklı üstünlükleri ve zayıf noktaları olacağı değerlendirildiğinden tek bantlı yapıların analiz sonuçlarına dayalı sayısal bir karşılaştırma yapılması hedeflenmektedir.

Tek bantlı yapıların benzetim analizlerinden elde edilen verilerle bu tez çalışmasının temel birim elemanı olacak, özgün bir yapıya sahip FSY tasarımı yapılacaktır. İletim ve yansıma karakteristiğini belirleyen bant sayısını arttırmak için literatürdeki yöntemler incelenecek ve en uygunu belirlenerek önerilecek yapıya uygulanacaktır. Öncelikle çift bantlı bir FSY tasarımının gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. İletim karakteristiklerini geliştirmek amacıyla FSY parametreleri frekans eğrileri üzerinden analizler edilerek yapının eniyilemesi gerçekleştirilecek ve boyutları değişen bileşenlerin FSY'nin performansına etkisi incelenecektir.

Bundan sonraki bölümde çok bantlı karakteristiğe sahip FSY tasarımının gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Tasarım sonucunda, en az üç farklı frekans bandı aralığında bant durduran filtre ve en az iki çalışma bandında bant geçiren filtre özelliğini sahip bir yapı elde edilmesi hedeflenmektedir. Gelen EM dalga açısı 0° ila 60° arasında iken önerilecek yapının açısal kararlılığa sahip ve iletim/yansıma frekanslarındaki bozulma oranının en fazla %2 olması beklenmektedir. Ayrıca tasarımın karakteristik özelliklerine ait benzetim ortamında elde edilen verilerin farklı yöntemlerle, özellikle matematiksel olarak hesaplanarak,

doğrulanması önem arz etmektedir. Son olarak önerilen çok bantlı karakteristiğe sahip AFTFSY'nin çalışma bantlarının (rezonans frekanslarının) uygulanabilir bir alanda ve 2-7 GHz aralığında kullanılabilir olması hedeflenmektedir.

Tasarımı tamamlanan çok bantlı FSY'nin, benzetim ortamında elde edilen verilerinin doğruluğunu kanıtlamak için eşdeğer devre modeli (EDM) çıkarılacak ve eşdeğer analizi (EDA) yapılacaktır. Eşdeğer devre belirli bir yapının tüm elektriksel özelliklerini barındıran teorik bir devreyi ifade etmektedir. Bilgisayarlara veya uzun formüllere dayanan analiz yöntemlerinin aksine, EDA karmaşık yapılarının hesaplamasını basitleştiren bir yöntem olarak tercih edilmektedir. Bu bölümde çok bantlı FSY'nin EDA ve benzetim sonuçları karşılaştırılarak EDM'nin doğruluğunu ve geçerliliğini göstermek önemli hedeflerden birisidir.

Tasarımı gerçekleştirilen çok bantlı FSY'nin üretimi için baskı devre kazıma cihazı kullanılacak ve tasarım cihaz yardımıyla seçilecek dielektrik alttaş malzeme yüzeyine işlenecektir. Üretim için sonsuza yakın sayıda birim elemandan oluşan FSY'yi temsil edebilecek yeterli sayıda birim hücreden oluşan düzlemsel dizilime sahip bir yapı oluşturulacaktır. Üretimi tamamlanan çok bantlı FSY'nin ölçümü için bir deney düzeneği kurulacaktır. Ölçümler için alıcı/verici antenler, vektör ağ analizörü, frekans emici sünger malzemelerle kaplı yankısız oda kullanılacaktır. Bundan sonra benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılarak çok bantlı yapının performans analizi gerçekleştirilecektir. Bu noktada hedef sonuçların birbirleriyle uyum içinde olmasıdır.

Son olarak elde edilen çok bantlı karakteristiğe sahip FSY ile literatürdeki benzer çok bantlı yapıların karşılaştırılması yapılacaktır. Burada önerilen yapının sağlaması gereken en önemli kıstaslardan birisi belirli bir geliş açısına kadar karakteristik özelliklerini koruması, bir başka deyişle açısal kararlı olmasıdır. Kararlı bir performans sağlayarak emsallerinden üstün olması önerilecek yapının literatüre katacağı en büyük yenilik olacaktır.

2. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER

2.1. Giriş

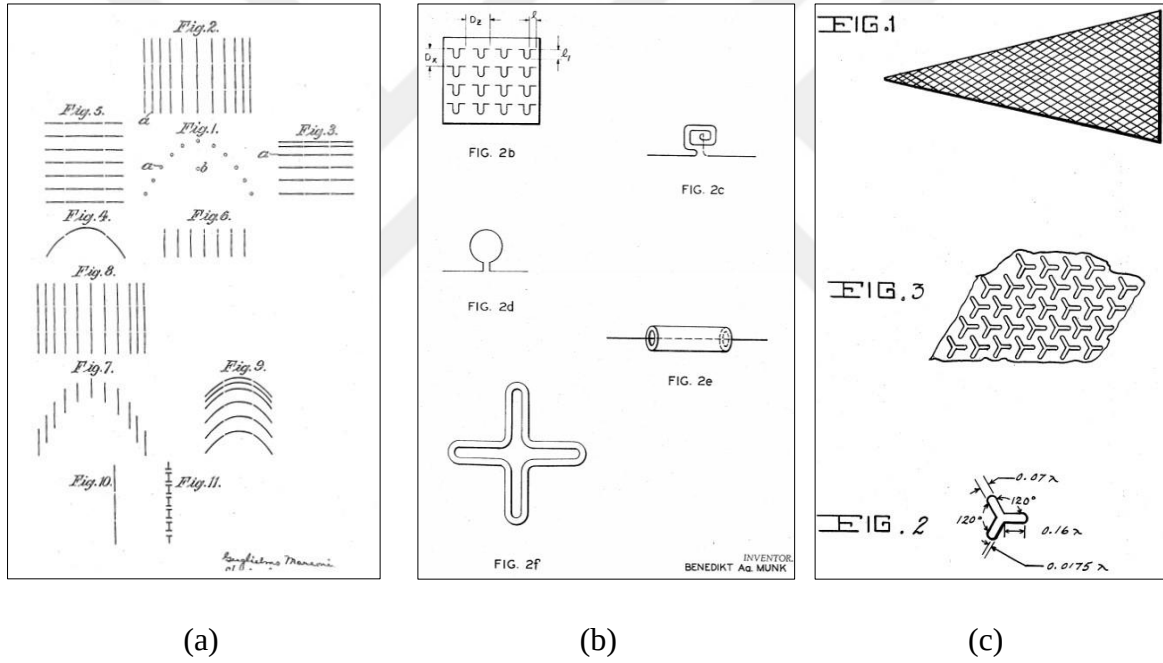
Frekans seçici yüzeyler (FSY), gelen elektromanyetik (EM) dalganın frekansına bağlı olarak iletim ve yansıma karakteristikleri değişen, yalıtkan bir alttaş üzerinde yama veya oyuklar şeklinde düzenlenmiş, iletken eleman dizilerine sahip periyodik yapılardır. FSY'ler genellikle EM dalgaları yansıtmak, iletmek veya soğurmak için tasarlanmış iletken yamalar veya açıklık elemanlarından oluşan periyodik yapılar olarak da tanımlanırlar [2].

FSY'yi oluşturan birim elemanın malzeme yapısına, şekline ve tasarımına bağlı olarak FSY'nin frekans tepkisi değişiklik göstermektedir. FSY yüzeyine herhangi bir açıyla gelen düzlemsel dalganın frekansı ile FSY elemanlarının rezonans frekansı eşleştiğinde, gelen dalga tamamen ya da kısmen yüzeyin diğer tarafına iletilecek ya da yüzeyden geri yansıyacaktır. Bu nedenle, FSY'ler boşlukta EM dalgaları belirli geliş açılarında, polarizasyon tipinde ve/veya frekanslarda geçirebilen veya durdurabilen en iyi uzamsal filtreler olarak tanımlanırlar [3].

Frekans seçici yüzeylere yönelik çalışmalar, özellikle askeri uygulama alanlarındaki büyük potansiyel nedeniyle son yıllarda kapsamlı bir şekilde artış göstermiş, gelişim süreci basit geometrilere kadar uzanmıştır. 1876 yılında David Rittenhouse tarafından “Optikte kırınım ızgaraları” konulu yayın periyodik yapıların dalga boyu üzerindeki etkisiyle ilgili yapılan ilk çalışma olarak kabul edilmektedir. Çalışmada; kırınım ızgarası, ışığı farklı yönlerde hareket eden birkaç kirişe bölen ve dağıtan periyodik yapıya sahip optik bir bileşen olarak sunulmuş ve bu tür ızgaraların aktarıcı veya yansıtıcı olabileceğinden bahsedilmiştir. Rittenhouse tarafından açıklanan bu yapı, periyodik olarak yerleştirilmiş yamalardan veya yarıklardan oluşan herhangi bir düzlemsel yapı için de temel olarak kabul edilmektedir [4].

FSY'ler ile ilgili çalışmaların başlangıcı 1960'ların ortaları olarak görünse de ilk referans noktası 1919 yılında Guglielmo MARCONI ve Charles Samuel FRANKLIN tarafından alınan “kablosuz telefon ve telgrafta kullanılmak üzere reflektör” adlı patenttir [5]. Bu çalışmada sonsuz uzunlukta çubuk antenler yerine yarım dalga boyundaki periyodik olarak

dizilen parabolik reflektör antenlerin kullanılabileceği belirtilmiştir (Şekil 2.1.a). Frekans seçici yüzeylerden periyodik yüzeyler olarak bahseden ilk çalışma ise Benedikt A. Munk tarafından 1968 yılında yayımlanan “Büyük tarama açıları için periyodik yüzey” adlı patenttir [6]. Bu çalışmada frekans seçici yüzey elemanı olarak artı (+) şeklinde bir birim hücre tanımlanmış (Şekil 2.1.b) ve bu elemandan oluşturulan periyodik dizilerinin istenilen frekansta, elektromanyetik dalganın geliş açısından bağımsız olarak, iletim veya yansıma karakteristiği sergilediği vurgulanmıştır. Munk tarafından 1976 yılında yayımlanan “Üç kutuplu yarı periyodik anten yüzeyi elemanları” adlı patent [7] ile de periyodik yüzeylerde kullanılan çeşitli şekiller vasıtasıyla farklı karakteristik sonuçların elde edilebileceği belirtilmiştir (Şekil 2.1.c).

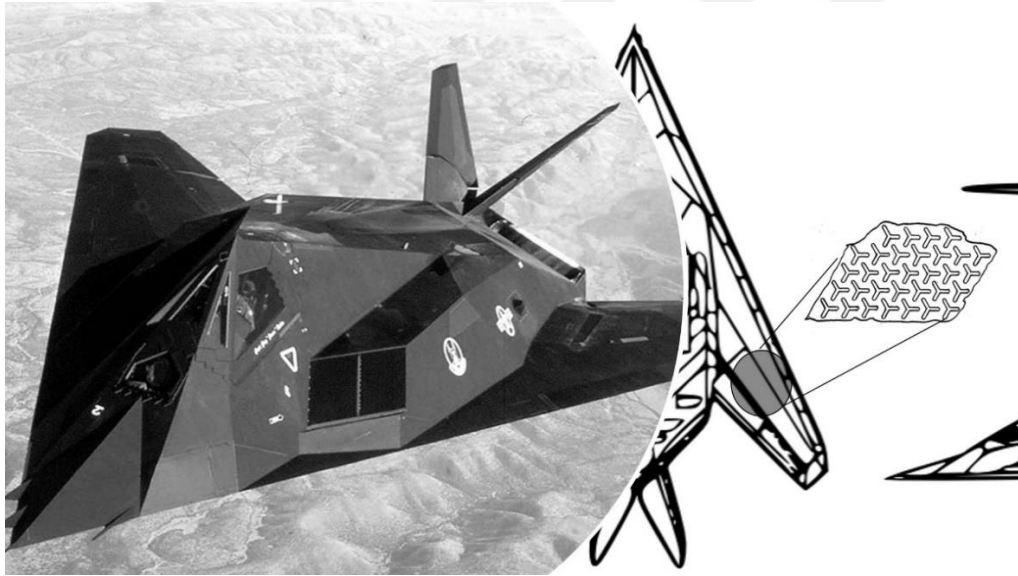


Şekil 2.1. FSY hakkında yapılan ilk patent çalışmaları, (a) Guglielmo MARCONI ve Charles Samuel FRANKLIN, “kablosuz telefon ve telgrafta kullanılmak üzere reflektör” - 1919, (b) Benedikt A. Munk, “büyük tarama açıları için periyodik yüzey” - 1968, (c) Benedikt A. Munk, “üç kutuplu yarı periyodik anten yüzeyi elemanları” - 1976

Körfez Savaşı döneminde ABD tarafından F-117A Nighthawk (Gece Şahini – Hayalet Uçak) radara yakalanmama / görünmezlik teknolojisiyle geliştirilmiş ilk hava aracı olarak tanıtılmış ve hizmete girmiştir. Hayalet uçağın görünmezlik yönü; kırınım, radyo frekansı (RF) emici malzemeler ve FSY'lerin bir kombinasyonu kullanılarak tasarlanmıştır [2]. Uçak yüzeyinde kullanılan iletken FSY elemanlar o güne kadar kullanılan tek kutuplu iletken

elemanların aksine çapraz dipoller ve üç kutuplu iletken elemanlardan oluşmaktadır. Bu yeni FSY eleman tasarımları, geliş açısına (bir düzlem dalgasının yayılma yönü ile FSY düzleminin normali arasındaki açı) duyarsızlık ve ayarlanabilirlik dahil olmak üzere daha iyi performans sunarak FSY'lerin gizli radomlar ve çok bantlı parabolik reflektör (Cassegrain) anten sistemlerinde kullanılmasının önünü açmıştır.

Bu tarihe kadar yapılan çalışmalar FSY'leri "Periyodik Yüzeyler" olarak tanımlamıştır. "Frekans Seçici Yüzey" adı ise ilk kez 1990 yılında Yee tarafından patentlenmiştir [8]. Bu çalışmada, belirlenmiş bir frekans bandında elektromanyetik enerjiyi iletmek amacıyla dielektrik malzeme ile birbirine sıkıştırılmış üç katmandan oluşan FSY'nin bir uçağın dış yüzeyine (anten radomu üzerine) uygulanmasından bahsedilmiştir.



Şekil 2.2. Radar sistemleri tarafından yakalanmaması için Lockheed Martin firması tarafından tasarlanan F-117A Nighthawk (Gece Şahini – Hayalet Uçak) savaş uçağı

1970'lerin ortasında, FSY'ler hakkında yapılan askeri çalışmaların gizliliğinin kaldırılması, araştırmaların sivil kullanım alanları için yeni FSY tasarım ve geliştirme yöntemlerine doğru kaymasını sağlamıştır. Rezonans elemanlarında kullanılan hesaplamalı analiz teknikleri ve filtre davranışlarında kullanılan eşdeğer devre analiz yöntemi FSY'lerin fiziksel özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına yol açmıştır. 1990'larda ve 2000'lerde ise bilgisayara dayalı hesaplama yöntemlerindeki gelişim sayısal çözümlemenin hızlanmasına, ayrıca analitik yöntemlerle kolayca tanımlanamayan daha karmaşık yapıların analizine imkân

vermiştir. Sonuç olarak birçok farklı FSY tasarımı ve uygulaması günümüzde yerini almış ve almaya devam etmektedir.

2.2. Periyodik Yapıların Analizi

FSY'lerin periyodik bir yapıya sahip olması EM problem analizlerinin çok daha basit bir şekilde hesaplanmasına müsaade etmektedir. Bunun nedeni hesaplama alanının, psödo periyodik sınır koşulları uygulanarak, yapı geometrisinin (birim hücre elemanının) yalnızca bir periyodu ile sınırlandırılabilmesidir [9]. Bundan sonraki bölümde, periyodik yapı teorisinin temellerinin kısa bir özeti sunulmaktadır.

2.2.1. Floquet teoremi ve uzamsal harmonikler

Tek boyutlu bir periyodik yapı düşünelim. Periyodu p_x ile ifade edilsin. Floquet teoremi böyle bir periyodik yapıda Eş. 2.1'deki özelliğe sahip zamanla harmonik EM alanları, $\mathbf{U}(x,y,z)$ (kaynak içermeyen alanları), ifade eder [10].

$$\mathbf{U}(x + p_x, y, z) = \mathbf{U}(x, y, z)e^{-jk_{x0}p_x}, \quad (2.1)$$

Burada $k_{x0} = \beta_{x0} - j\alpha_x$ periyodik yapının farklı hücreleri arasındaki faz kaymasını ve alanın zayıflamasını tanımlayan kompleks bir dalga sayısıdır (temel yayılım sabitidir). Floquet teoremi $\mathbf{U}(x,y,z)$ türündeki EM alanların,

$$\mathbf{U}(x, y, z) = \mathbf{P}(x, y, z)e^{-jk_{x0}x}, \quad (2.2)$$

özelliğine sahip olduğunu belirterek de ifade edilebilir. Burada $\mathbf{P}$,

$$\mathbf{P}(x \pm mp_x, y, z) = \mathbf{P}(x, y, z) \quad (2.3)$$

gibi periyodik bir vektör fonksiyon ve m bir tamsayıdır. Eş. 2.1, 2.2 ve 2.3 özelliklerini taşıyan bir $\mathbf{U}(x,y,z)$ fonksiyonu psödo periyodik veya Floquet periyodik olarak da tanımlanabilir. Eş. 2.1 incelendiğinde göre yz düzlemindeki alan dağılımının herhangi bir x noktasından p_x periyodu boyunca gözlemlendiğinde değişmediği, tek değişikliğin bir $e^{-jk_{x0}p_x}$ faktörü ile çarpılan alanın (kompleks) genliğinde olduğu anlaşılmaktadır. Diğer bir

yandan, Eş. 2.2 ve 2.3'de ise bir birim hücre içerisindeki EM alan ve temel yayılma sabiti bilgisine dayanarak tüm uzaydaki alan dağılımının benzersiz bir şekilde belirlenebileceği ifade edilmektedir. Dahası, bir Floquet periyodik kaynağın (örneğin bir düzlem dalgası) varlığında uyarılmış EM alanının Floquet periyodik olduğu ve bu nedenle Eş. 2.1'de olduğu gibi belirtilebileceği söylenebilir [9].

$\mathbf{P}$ vektör fonksiyonu periyodik olduğundan, bir Fourier serisinde genişletilebilir,

$$\mathbf{P}(x, y, z) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \mathbf{a}_m(y, z) e^{-j\left(\frac{2\pi m}{p_x}\right)x}, \quad (2.4)$$

burada a_m katsayıları,

$$\mathbf{a}_m(y, z) = \frac{1}{p_x} \int_{-\frac{p_x}{2}}^{+\frac{p_x}{2}} \mathbf{P}(x, y, z) e^{-j\left(\frac{2\pi m}{p_x}\right)x} dx. \quad (2.5)$$

ile verilir. Eş. 2.2'ye Eş. 2.4'ü ekleyerek,

$$\mathbf{U}(x, y, z) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \mathbf{a}_m(y, z) e^{-jk_{xm}x}, \quad (2.6)$$

elde ederiz. Burada k_{xm} Eş. 2.7 ifade edildiği gibidir.

$$k_{xm} = k_{x0} + \frac{2\pi m}{p_x} = \left(\beta_{x0} + \frac{2\pi m}{p_x}\right) - j\alpha_x = \beta_{xm} - j\alpha_x. \quad (2.7)$$

Bu nedenle, $\mathbf{U}$ EM alanı, uzamsal (Floquet) harmonikleri olarak adlandırılan $\mathbf{a}_m(y, z)e^{-jk_{xm}x}$ formunun sonsuz sayıda yürüyen dalgalarının toplamı olarak ifade edilebilir [10]. Fourier serisinin yakınsama özelliklerinden dolayı, $|m|$ sonsuza yaklaşırken, $|\mathbf{a}_m|$ katsayılarının genliğinin sıfıra yakınsadığı belirtilmelidir. Ayrıca tek bir uzamsal harmonik, yapının sınır koşullarını karşılayamaz. Bu nedenle kendi başına periyodik yapının bir modunu oluşturamaz; yani tek bir harmonik kendi başına bir şey ifade etmez. Daha

ziyade, uzamsal harmoniklerin sonsuz bir şekilde üst üste bindirilmesi sonucunda periyodik yapının bir modunu temsil edebilir (Floquet modu olarak adlandırılır). $\mathbf{a}_m$ Katsayılarını hesaplamak için periyodik yapının birim hücresi, p_x genişliğinde sınırları olan (yani Floquet açılımının belirlediği sınır koşullarıyla tanımlanan duvarlar) ve dalga yayılımı x-yönünde tanımlanan paralel plakalı bir dalga kılavuzu olarak işlenmesi gerekmektedir.

2.2.2. Tek yönlü düzlemsel periyodikliğe sahip yapılarda gelen düzlem dalgası

En basit periyodik yapının şerit ızgaralar olduğu kabul edilmektedir [2]. Şekil 2.3.a'da gösterildiği gibi şerit ızgaralar xy koordinat düzleminde boşlukta duran sonsuz uzunlukta ve sonsuz incelikte iletken şeritlerin düzlemsel periyodik olarak dizilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yapının üniform düzlem dalgası tarafından uyarıldığını varsayalım.

$$\mathbf{E}^{inc}(x, y, z) = \mathbf{u}_y E_y^{inc}(x, z) = \mathbf{u}_y E_0 e^{-jk_0(x \sin \theta^{inc} + z \cos \theta^{inc})}. \quad (2.8)$$

Eş. 2.8'de görüldüğü üzere gelen dalganın elektrik alanı ($\mathbf{E}^{inc}$) Eş. 2.1'deki zamanla harmonik alanlar koşulunu yerine getirmektedir. Bu, gerçek yayılım sabiti $k_{x0} = -k_0 \sin \theta^{inc}$ ile karakterize edilen sıfır olmayan tek temel harmoniğe sahip Floquet alanının özel bir durumu olarak düşünülebileceği anlamına gelir. Yapı x yönünde periyodik ve y yönünde üniform, uyarma ise Floquet periyodik ve y'den bağımsız olduğundan saçılan elektrik alan y'den bağımsız Floquet harmoniklerinin bir süper pozisyonu olarak $\mathbf{E}_s = \mathbf{u}_y E_y^s$ şeklinde, E_y^s ise Eş. 2.9'da belirtildiği şekilde ifade edilebilir.

$$E_y^s(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e_m(z) e^{-jk_{xm}x}. \quad (2.9)$$

Her Floquet harmoniği, Helmholtz denkleminin bir çözümü olduğundan,

$$e_m(z) = E_m e^{\pm jk_{zm}z}, \quad (2.10)$$

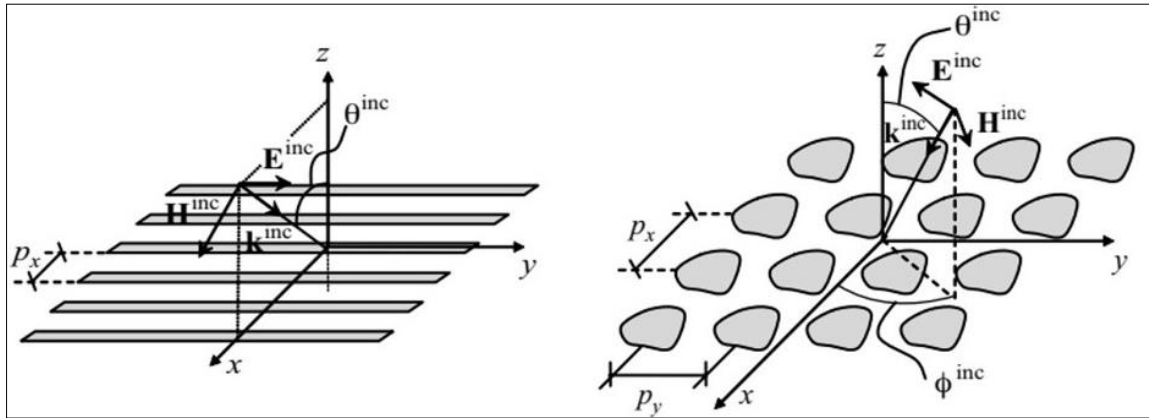
ile gösterilebilir. Burada,

$$k_{zm} = \sqrt{k_0^2 - k_{xm}^2}. \quad (2.11)$$

$k_{xm}^2 < k_0^2$ olduğu durumda, m'inci Floquet harmoniğin şerit ızgaradan uzaklaşarak yayıldığı, $k_{xm}^2 > k_0^2$ olduğunda ise z yönünde üssel olarak azaldığı görülebilir. Bu nedenle, Eş. 2.6'ya göre Floquet açılımında sadece birkaç harmonik yz düzleminde düzlem dalgaları halinde yayılırken diğerlerinin tümü kaybolan düzlem dalgaları olacaktır. Eş. 2.9-2.11 ve Eş. 2.6'dan da görüldüğü üzere, kaç harmoniğin yayılacağı frekansa ve geliş açısına bağlıdır. Özellikle, $k_{x1}^2 > k_0^2$ olduğu sürece, yalnızca temel harmonik yayılabilir; bu nedenle, birinci dereceden harmoniğin yayılmaya başladığı frekans aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\left| k_{zm} + \frac{2\pi}{p_x} \right| = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Rightarrow p_x = \frac{\lambda_0}{1 + \sin \theta^{inc}}. \quad (2.12)$$

Dolayısıyla uzamsal periyot yarım dalga boyundayken birinci dereceden harmoniğin başlangıcı geliş açısının yüzeye paralel çok yakın olduğu durumda ($\theta^{inc} \approx 90^\circ$) oluşur, tam dalga boyundayken ise ($\theta^{inc} = 90^\circ$) başlangıç geliş açısının yüzeye paralel olduğu durumda meydana gelir.



(a)

(b)

Şekil 2.3. Gelen düzlem dalga altında (a) 1B ve (b) 2B periyodik yapılar [10].

2.2.3. İki yönlü düzlemsel periyodikliğe sahip yapılarda gelen düzlem dalgası

Tek yönlü periyodik yapılarda belirtilen durum, Şekil 2.3.b'de gösterildiği gibi, iki boyutta periyodik olan düzlemsel yapılara, örneğin x ve y boyunca, sırasıyla p_x ve p_y uzamsal periyotlarla ve rasgele düzgün düzlem dalgaları tarafından uyarılan düzlemsel yapılara genişletilebilir. Bilindiği üzere, rastgele bir üniform düzlem dalgası bir TE_z ve TM_z düzlem dalgasının toplamına ayrıştırılabilir ve bu dalgaların her biri için saçılma problemi çözülebilir. Genel olarak saçılan alan,

$$E^s(x, y, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e_{mn}(z) e^{-jk_{xm}x} e^{-jk_{yn}y} \quad (2.13)$$

Floquet harmonikleri cinsinden ifade edilebilir. Sırasıyla x ve y boyunca ilerleyen düzlem dalgasının dalga sayısı $k_{x0} = -k_0 \cos \phi \sin \theta$ ve $k_{y0} = -k_0 \sin \phi \sin \theta$ olarak ayarlandığında, her Floquet harmoniğinin x ve y boyunca faz değişimi,

$$k_{xm} = k_{x0} + \frac{2\pi m}{p_x}, \quad k_{yn} = k_{y0} + \frac{2\pi n}{p_y} \quad (2.14)$$

şeklinde yazabilir. Bu durumda saçılan alan,

$$E^s(x, y, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_{mn} e^{-jk_{xm}x} e^{-jk_{yn}y} e^{\pm jk_{zmn}z} \quad (2.15)$$

olarak ifade edilebilir. Buradaki k_{zmn} Eş. 2.16'da belirtilmiştir.

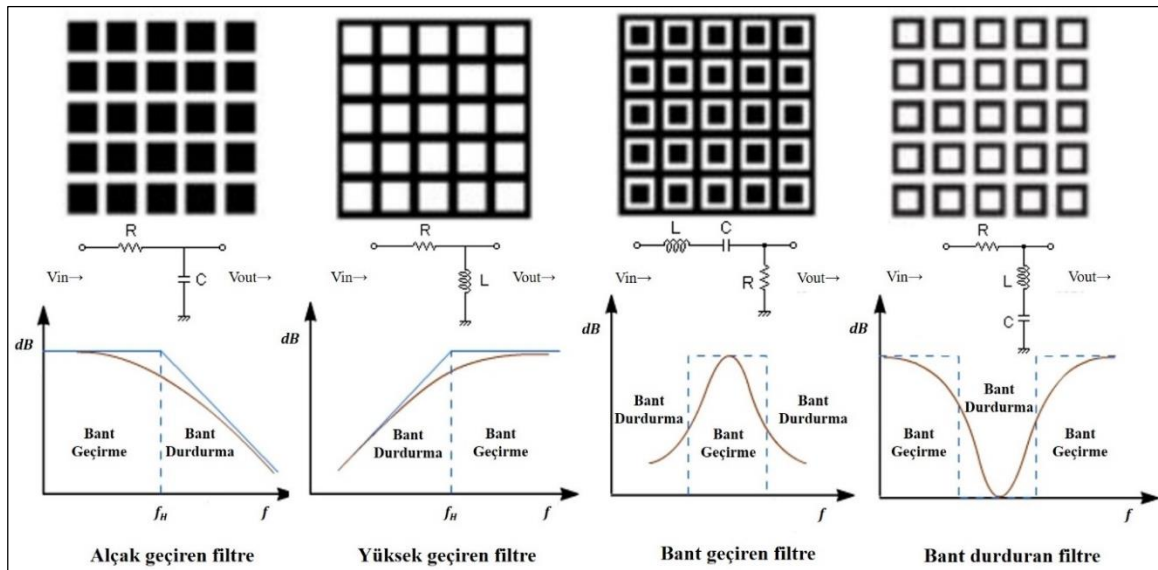
$$k_{zmn} = \sqrt{k_0^2 - k_{xm}^2 - k_{yn}^2} \quad (2.16)$$

Karekök içindeki denklemin kökü, $\text{Im}[k_{zmn}] < 0$ olacak şekilde seçilir (Eş. 2.15'deki + veya - işareti sırasıyla $z < 0$ veya $z > 0$ için kullanılır). Bu nedenle, iki boyutlu periyodik yüzeyler için elektrik alan, yüzey normaline paralel yönde yayılan veya kaybolan TE_z veya TM_z düzlem dalgalarından oluşan Floquet harmoniklerinin bir süperpozisyonu olarak yazılabilir.

Eş. 2.13 ve 2.15'deki alan ifadeleri birer dalga denklemi olduklarından yayılım sabiti Eş. 2.13 ve Eş. 2.15'deki gibidir. Bu dalga denklemleri incelendiğinde sonsuz sayıda düzlemsel dalganın toplamı olduğu görülür. " k_{xm} " x-ekseni yönündeki dalga numarasını göstermektedir ve m katsayısının değerine göre reel veya sanal değerler almaktadır. Belli bir m değerine kadar dalgalar yayılmakta, daha büyük m değerlerinde " k_{xm} " sanal olacağı için yayılan dalgalar sönümlü olmaktadır. Aynı durum " k_{yn} " ve n değerleri içinde geçerlidir. Detayları referans [10]'da sunulduğu üzere Floquet harmonikleri şeklinde ifade edilen düzlem dalgalarıyla periyodik yapıyı FSY'leri ilişkilendirmek mümkündür.

2.3. Temel Çalışma Prensibi ve Karakteristikleri

Frekans seçici yüzeylerin çalışma prensibi basitçe şu şekildedir; gelen dalga ile uyarılan FSY'nin üzerinde yüzey akımı oluşur. Yüzeyde oluşan kuplaj enerjisinin seviyesi (coupling energy level) bu yüzey akımların genliğini belirler. Bununla birlikte, üretilen yüzey akımları EM kaynakları olarak da çalışır ve ilave saçılan alanlar oluşturur. Gelen dalgalar bu saçılan alanlarla birleşerek, FSY'nin çevresindeki yeni bir EM alan oluşturur. Sonuç olarak yüzey akımı ve EM alanlar ile titreşen (uyarılan) FSY'nin iletken ve yalıtkan yapıları farklı iletim ve yansıma karakteristikleri göstererek FSY'nin bir filtreymiş gibi davranmasına neden olur. FSY'nin çalışma prensibi detayı olarak B. A. Munk tarafından [2]'de anlatılmıştır.



Şekil 2.4. Frekans seçici yüzeyler ve temel filtre karakteristikleri

Frekans seçici yüzeyler, iletken yamaların periyodik olarak sıralanmasıyla ya da iletken üzerine periyodik oyukların açılması ile tasarlanmaktadır. Yama (patch) şeklinde olan FSY kapasitif etki oluştururken, oyuk (aperture) şeklinde olan FSY indüktif etki meydana getirmektedir. Uzamsal filtreler olarak da adlandırılan FSY yapıları (kapasitif ve indüktif), devre teorisine göre mikrodalga filtrelerle benzetilmekte ve tasarım biçimine göre alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durdurucu filtre karakteristikleri olmak üzere temel olarak dört farklı filtre karakteristiği göstermektedir (Şekil 2.4). Kare iletkenler (yama) ile oluşturulan bir frekans seçici elektromanyetik dalgalara karşı alçak geçiren filtre özelliği gösterirken, iletken yüzeyden karelerin çıkarılması (oyuk-aperture) ile oluşturulan FSY ise yüksek geçiren filtre karakteristiğine sahiptir. Bunları eşdeğer devre teoremine göre sırasıyla seri direnç- kondansatör (RC) ve seri direnç-indüktör (RL) devresi olarak tanımlayabiliriz. Kare iletken döngüler dizisi (seri indüktör- kondansatör [LC]) bant durdurma davranışını gösterirken, iletken yüzey üzerindeki kare döngü oyuklar dizisi (paralel indüktör-kondansatör [LC]) bant geçirme davranışını sergiler. R ve L frekans seçici iletken yamaları, C ise elemanlar arasındaki boşlukları ifade etmektedir. R, L ve C elemanları kullanılarak, yani temel filtre karakteristikleri dışında, daha ayrıntılı ve karmaşık geometrilerle oluşturulan frekans seçici yüzeyler sayesinde daha iyi ve özel frekans karakteristikleri elde edilebilmektedir.

2.4. Performansını Etkileyen Temel Faktörler

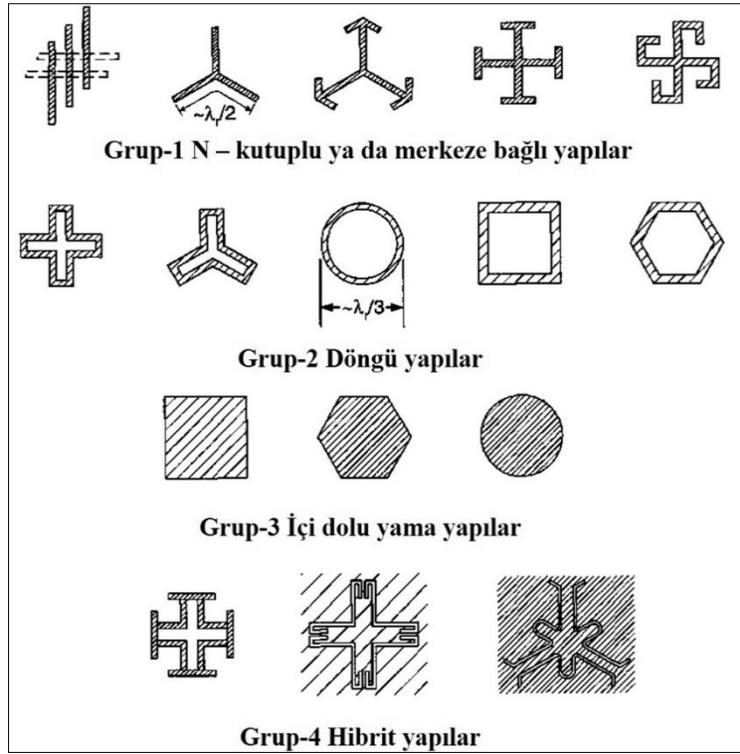
Gelen EM dalgayla (pasif olarak) veya dışarıdan verilen gerilim (aktif olarak) ile indüklenen Frekans Seçici Yüzeylerin iletken ve yalıtkan yapıları farklı iletim ve yansıma karakteristikleri sergiler, buna FSY'nin performansı denir. FSY'lerin gösterdikleri performansını etkileyen temel faktörler aşağıda sıralanmıştır.

- FSY elemanlarının geometrisi ve boyutları,
- FSY elemanlarının iletkenliği,
- FSY'de kullanılan dielektrik tabakalar,
- Dalganın FSY'ye geliş açısı ve polarizasyonu.

2.4.1. Birim eleman türleri ve geometrileri

FSY eleman türleri fiziksel yapılarına bağlı olarak dört gruba ayrılmıştır (Şekil 2.5). 2000 yılında Munk tarafından referans [2]'de sunulan bu gruplandırmada eleman şekilleri olarak

sadece iki boyutlu yapılar ele alınmış, günümüzde uygulanan üç boyutlu yapılar bu gruba dahil edilmemiştir. Her bir eleman türü gelen dalga ile indüklendiğinde farklı frekans tepkisi sergiler. Bu eleman türlerinin birleşimiyle çok bantlı FSY'ler, polarizasyondan bağımsız FSY'ler ve minyatürleştirilmiş elemanlar gibi bir dizi özellikli özelliğe sahip yeni elemanlar oluşturmak mümkündür.



Şekil 2.5. Geometrik şekillerine göre FSY eleman türleri [2]

Grup-1 N – kutuplu ya da merkeze bağlı yapılar birden fazla kutbun birleşiminden oluşan eleman yapıları bulunmaktadır. Başlıca eleman türleri Şekil 2.5'te gösterildiği üzere sırasıyla basit dipol, üç kutuplu yapı, bu yapının ucuna çapa şeklinin eklenmesi ile elde edilen yapı, dört kutuplu Kudüs hacı ve kare spiraldir. İletkenin bacak uzunluğu dalga boyunun yaklaşık yarısına eşit olduğunda, FSY'nin merkezinde rezonans meydana gelmektedir.

Dipol yapı en temel eleman olarak kabul edilmektedir. Bu gruptaki diğer tüm elemanlar dipol yapının farklı kombinasyonlarından oluşmaktadır. Basit dipoller, bant genişlikleri dar ve polarizasyona bağlı rezonans elemanlardır. Çünkü, polarizasyon yönü dipol uzunluğu boyunca olduğunda bu yönde polarize gerçekleşirken, polarizasyon yönü değiştiğinde dipolün eni yani yarı genişliği boyuncadır. Üç kutuplular çapraz polarizasyon seviyeleri daha

düşük ve bant genişliği daha büyüktür. Çapa tipinde her bir elemanın ucuna kapasitans eklenerek daha büyük bir bant genişliği elde edilebilmektedir. Kudüs hacı yapısında ise dört yöne simetrik olduğu için polarizasyondan bağımsız bir yapı düşünülerek tasarlanmıştır, ancak bant genişliği dardır. Kare spiralde ise elemanlar arası boşluğun en az olması ve indüktif boyunun en uzun olması nedeniyle açısallık kararlılığı daha iyi ve rezonans frekansı daha düşük bantlarda gerçekleşmektedir.

Grup-2 döngü yapılar farklı uzunluktaki iletken dipollerin bir araya getirilerek kapalı döngüler oluşturulmasıyla meydana gelmektedir. Başlıca eleman türleri dört ve üç bacaklı döngü, halka döngü, kare ve altıgen döngü iletken yapılardır. Bu yapıların toplam uzunlukları bir dalga boyuna eşit olduğunda rezonansa girerler. Bir kenar uzunluğu ise dalga boyunun üçte birinden daha azdır. Bundan dolayı elemanlar arası mesafe birinci gruba göre nazaran daha azdır. Örneğin, dairesel ve altıgen elemanlar, üç bacaklı döngü gibi altıgen bir desendeyle en yakın aralıklarla yerleştirilebilir. Bunun sayesinde bant genişliğinde ve açısallık kararlılıkta istenen frekans tepkisi elde edilebilmektedir. Döngü yapıların bir diğer özelliği ise iç içe dizilimleriyle birden fazla rezonans frekansına sahip olmaları yani çoklu bant özelliği sergilemeleridir.

Grup-3 içi dolu yama yapılar ikinci gruptakinin aksine içi dolu iletken yamalardan oluşmaktadır. Yukarıda FSY'lerin karakteristik yapıları açıklanırken belirtildiği üzere içi dolu iletkenler yapılar (yama) ile oluşturulan bir frekans seçici elektromanyetik dalgalara karşı alçak geçiren filtre özelliği gösterirken, iletken yüzeyden bu yapıların çıkarılması (oyuk-aperture) ile oluşturulan FSY ise yüksek geçiren filtre karakteristiğine sahiptir. Bundan dolayı bu tür yama yapılar alçak veya yüksek geçiren filtre elde etmek amacıyla kullanılmaktadırlar. Bu yapıların dezavantajı elemanlar arasındaki mesafenin açısallık kararlılığı sağlamak ve istenmeyen lobları engellemek amacıyla yeterince büyük seçilmesi zorunluluğudur. Bu da periyodik yapıya sahip bir FSY'nin boyutunun gereğinden fazla büyük olmasına neden olmaktadır.

Grup-4 hibrit yapılar 1-3 arasındaki grup elemanlarının, istenen özelliği (bant genişliği, geliş açısı ve polarizasyon duyarlılığı vb.) elde edebilmek için, birleştirilmesiyle veya birlikte kullanılmasıyla elde edilen yapılardır.

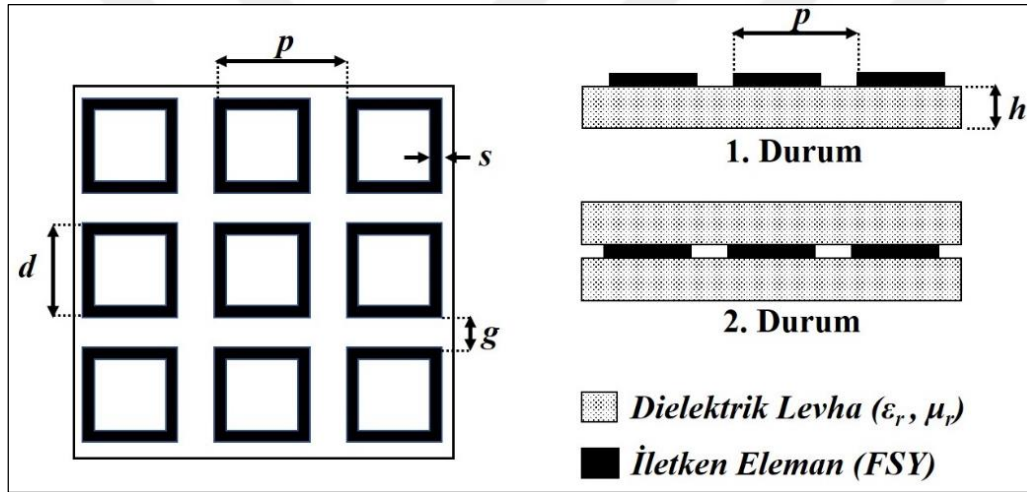
Sık kullanılan FSY elemanlarının dört farklı özelliğe karşı gösterdiği tepkinin derecelendirilmesi Çizelge 2.1’de sunulmuştur. Bu çizelgede elemanların performans analizi 1’den 4’e kadar *en iyisi 1 (bir) olacak* şekilde değerlendirilmiştir. Burada görülmektedir ki geliş açısına göre eleman tepkisi değişimi en az olan yani en kararlı eleman çeşidi döngü yapılarıdır. Ayrıca kare halka döngü yapıların, bant genişliği büyük bir FSY üretilmek istendiğinde kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır. Yukarıda da belirtildiği üzere dipol yapılarda çapraz polarizasyon seviyesi diğerlerine nazaran daha yüksektir. Bant ayrımı küçüklüğü, iletim ve yansıma rezonans frekansların birbirine oranı olarak ifade edilmektedir. Bu oran ne kadar küçük olur ise iki rezonans frekansı birbirine daha yakın olmaktadır. Bu özellik genellikle bant geçiren filtrede frekans seçiciliğinin yüksek olması istendiğinde tercih edilmektedir. Bu özellikte de en iyi performansı dipol ve döngü yapılar göstermektedir.

Çizelge 2.1. FSY'nin farklı eleman türlerinin performans analizi [11]

Yapı Şekli		Açısal Kararlılık	Çapraz Polarizasyon Seviyesi	Bant Genişliğinin büyüklüğü	Bant Ayrım Küçüklüğü
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 Döngü		1	1	1	1

Frekans Seçici Yüzeyin boyutları, FSY tasarımında kullanılan birim eleman türleri ve geometrilerinin yanında FSY’nin performansını etkileyen önemli faktörlerden birisidir. Periyodik olarak dizilen birim elemanların boyutlarındaki farklılıklar frekans seçici yüzeyin rezonans frekansı, filtre bant genişliği ve elektromanyetik dalganın geliş açısına duyarlılığı gibi önemli karakteristik özelliklerini değiştirebilmektedir.

Örnek olarak birim elemanı iletken kare döngü olan ve bu elemanların dielektrik bir yüzey üzerine periyodik dizilimiyle oluşan bir FSY ele alalım (Şekil 2.6). Bu FSY Şekil 2.5'te de gösterildiği üzere bant durduran filtre karakteristiğine sahiptir. Bu FSY'nin parametreleri sırayla; p , birim elemanın periyodunu; d , kare döngünün bir kenar uzunluğunu; s , iletken kalınlığını; g , birim elemanlar arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Bant durduran filtre karakteristiğine sahip FSY'nin rezonans frekansı (f_r) p , d ve s 'ye, açısız kararlılığı ise elemanlar arası mesafeye (g) bağılı olarak değişmektedir. Literatürdeki benzer yapılar da incelendiğinde kare döngünün boyutunun küçültülmesi (p , d ve s değerlerinin azalması) rezonans frekansını artırırken [12], elemanlar arasındaki mesafenin azaltılması FSY'nin açısız kararlılığını azaltmaktadır [13].



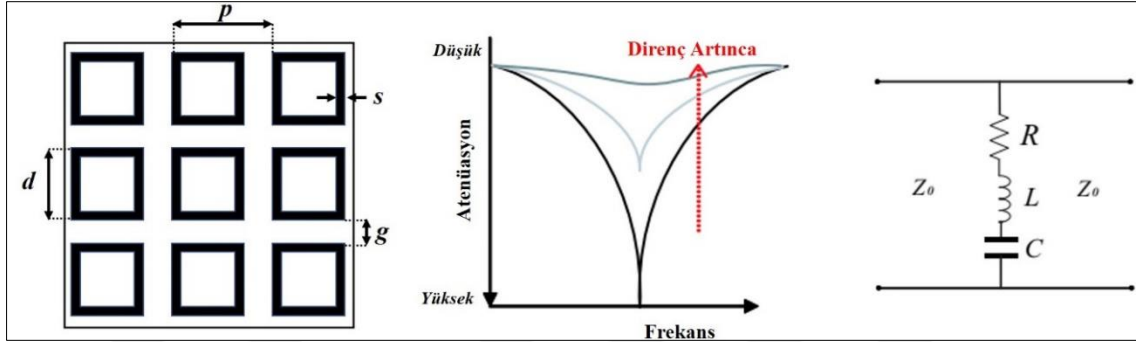
Şekil 2.6. Birim elemanı kare döngü olan FSY'nin (3x3) sırasıyla üstten ve yandan görünüşü

2.4.2. FSY elemanlarının iletkenliği

Frekans Seçici Yüzey gelen EM dalgayla (pasif olarak) veya dışarıdan verilen gerilim (aktif olarak) ile indüklenir. İndüklenen yüzey akımı FSY'nin iletken elemanlarından dış ortama yeniden yayılır. FSY'ler, içerdikleri periyodik elemanların geometrisine göre oluşturulan eşdeğer devre modellerinde enerji depolayan indüktif (L) ya da kapasitif (C) devre elemanları olarak modellenmektedir. Kayıplı bir iletken kullanılarak tasarlanan FSY'nin eşdeğer devre modeline ise bu kaybı eklemek için direnç (R) elemanı ilave edilmektedir.

Şekil 2.7'de Kayıplı bir iletken üretilen kare döngü FSY'nin rezonans frekansındaki değişim ve eşdeğer devre analizi gösterilmektedir. İletkendeki kayıp yukarıda da belirtildiği

üzere LC seri bağlantısına ilave seri R elemanları eklenmesi ile ifade edilmektedir. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere bant durdurucu filtre karakteristiği gösteren kare döngü FSY’nin iletken direnci arttıkça (iletkenlik azaldıkça) rezonans frekansındaki zayıflama (atenüasyon) azalmakta, FSY’nin çalışma frekans bandındaki bant durdurma özelliği kaybolmaktadır.



Şekil 2.7. Kayıplı bir iletkenle üretilen kare döngü FSY’nin iletkenliğe bağlı olarak frekansındaki değişim ve eşdeğer devre analizi

Eleman iletkenliğinin etkisi, farklı iletken malzemelerden yapılan FSY’ler ile [14]’de deneysel incelenmiş ve doğrulanmış, gümüş boyanın (%95 gümüş) karşılaştırılan diğer iletkenlere nazaran yüksek iletkenliği ve ucuz üretim maliyeti nedeniyle daha üstün FSY performansı sağladığı görülmüştür. Ancak genel olarak FSY tasarımlarında farklı malzemelerden faydalanılmakla beraber çoğunlukla düşük maliyetli ve yüksek performans sergileyen alüminyum ve bakır tercih edilmektedir.

2.4.3. FSY’de kullanılan dielektrik tabakalar

Frekans seçici yüzeylerin birim elemanları, uygulanabilirliği kolaylaştırmak ve sağlamlığı artırmak maksadıyla genellikle bir dielektrik yüzey üzerine yerleştirilmektedir. Burada kullanılan levhaların dielektrik sabiti (ϵ_r) ve kalınlığı (h) (Şekil 2.6) gibi önemli parametreleri FSY’nin iletim ve yansıma karakteristikleri üzerinde oldukça etkilidir [2],[15]. Dielektrik tabaka/altaş malzemeler FSY’lerle birlikte iki farklı durumda kullanılmaktadır. Birinci durum FSY’nin birim elemanlarının tek katmanlı altaş üzerine periyodik olarak sıralanması, ikinci durum ise birinci durumdaki iletken üzerine yine bir altaş yerleştirilerek sandviç benzeri bir yapı elde edilmesidir (Şekil 2.6).

Dielektrik levha, FSY'nin eşdeğer devre modeline epsilon değerine sahip bir yapıyı temsil eden kapasitif eleman olarak eklenecektir. Yani FSY'ye eklenen dielektrik yapı toplam kapasitans değerinde bir artışa neden olacak, bu artış FSY'nin rezonans frekansını azaltırken rezonansın derinliğini ve bant genişliğini de değiştirecektir. Çünkü toplam kapasitans değeri malzemenin geçirgenliğinden etkilenecek ancak toplam indüktans değeri etkilenmeyecektir.

Eşdeğer devre modeline eklenen epsilon değerine malzemenin efektif dielektrik sabiti dersek (ϵ_{eff}) FSY'nin rezonans frekansı (f_r), $\sqrt{\epsilon_{eff}}$ oranında azalacaktır. Dielektrik malzemenin kalınlığı (h) dalga boyunun yüzde beşinden daha büyükse dielektrik malzemenin kullanım durumuna göre rezonans frekansındaki değişim;

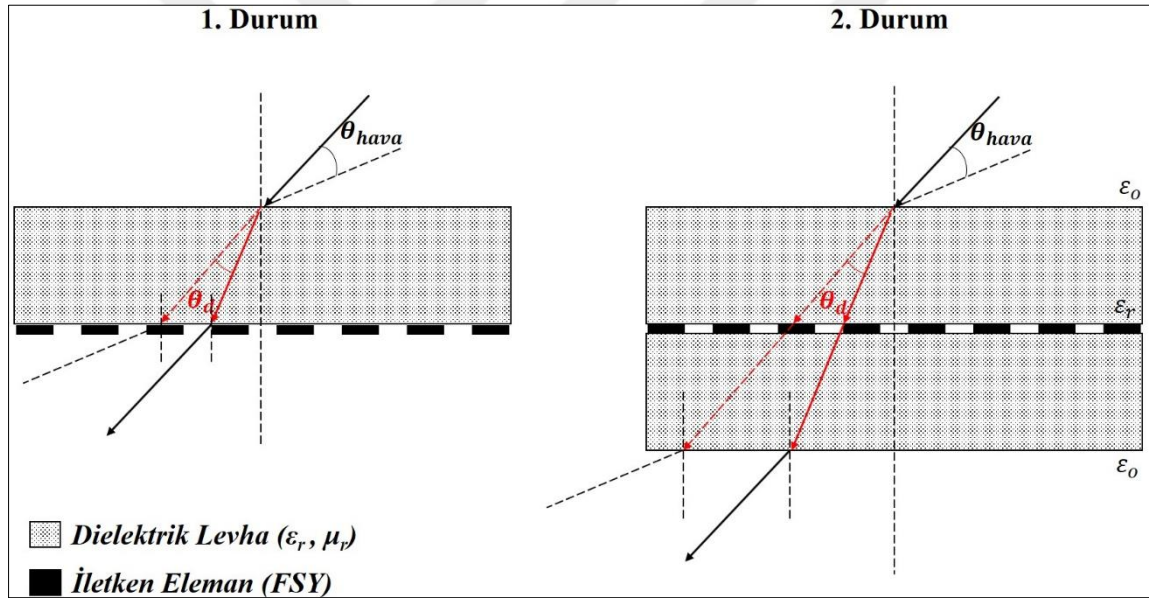
$$h > 0,05\lambda \text{ ise } \left\{ \begin{array}{l} 1. \text{ Durum için } \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \text{ olur ve } f_{r1} = \frac{f_r}{\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \\ 2. \text{ Durum için } \epsilon_{eff} = \epsilon_r \text{ olur ve } f_{r1} = \frac{f_r}{\sqrt{\epsilon_r}} \end{array} \right\} \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir [16]. Kısaca Eş. 2.17'den şunu çıkarabiliriz; tek başına iletken bir FSY'nin rezonans frekansı f_r ise, bu FSY'nin bir dielektrik yüzeyine dizildiğindeki rezonans frekansı $\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}$ oranında, iki dielektrik malzemenin arasına yerleştirildiğindeki rezonans frekansı $\sqrt{\epsilon_r}$ oranında azalacaktır.

Bununla birlikte $h < 0,05\lambda$ ise; ϵ_{eff} , dielektrik malzemenin kalınlığının (h) doğrusal olmayan bir fonksiyonu olarak kabul edilir. Başka bir deyişle ϵ_{eff} , dielektrik tabaka kalınlığına çok duyarlıdır. Buna göre de rezonans frekansı f_r , tabaka kalınlığına duyarlı olacaktır. Bunun nedeni yeterince ince bir dielektrik tabaka için, iletken elemanlar tarafından uyarılan yüksek mertebe genliği azalan/sönümlü modların (higher order evanescent modes), FSY elemanlarının yakınında depolanan enerjiyi ve dolayısıyla rezonans frekansını değiştirebilen hava ve dielektrik sınırında hala önemli olabilmesidir [16]. Bu durum, FSY elemanlarının üzerinde periyodik olarak yeterince ince bir dielektrik tabakanın etkisinin ihmal edilemeyeceğini göstermektedir.

Frekans seçici yüzey uygulamalarında kullanılan dielektrik malzemeler sadece FSY'nin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerinde etkili değildir. Aynı zamanda farklı açılardan

gelen düzlemsel EM dalgalara karşı FSY performansının kararlılığını da artırmaktadır. Bunun başlıca nedeni şu şekilde açıklayabiliriz; yukarıda da bahsedildiği üzere farklı geçirgenlik değerine sahip bir dielektrik yapı üzerine gelen EM dalga Snell'in kırılma yasasına göre değişime uğrayacaktır. Boşluktan/havadan (ϵ_0) gelen elektromanyetik dalga dielektrik malzeme üzerine geldiğinde az yoğun bir ortamdan, geçirgenliği ϵ_r olan ($\epsilon_r > \epsilon_0$), daha yoğun bir ortama (dielektrik malzeme içerisine) geçtiğinde yüzey normaline yaklaşarak ilerleyecektir. FSY'nin Şekil 2.8'deki gibi dielektrik malzemenin yüzeyinde (1.durum) ve arasında (2.durum) olduğu düşünüldüğünde; normale göre geliş açısı azalan bir EM dalganın, geliş açısı daha fazla olan bir dalgaya nazaran FSY'den daha az etkilenecek geçeceği aşikardır. Bu nedenle FSY yapısı dielektrik malzemeye kullanıldığında farklı açılardan gelen EM dalgalara karşı daha az duyarlı hale gelmektedir.



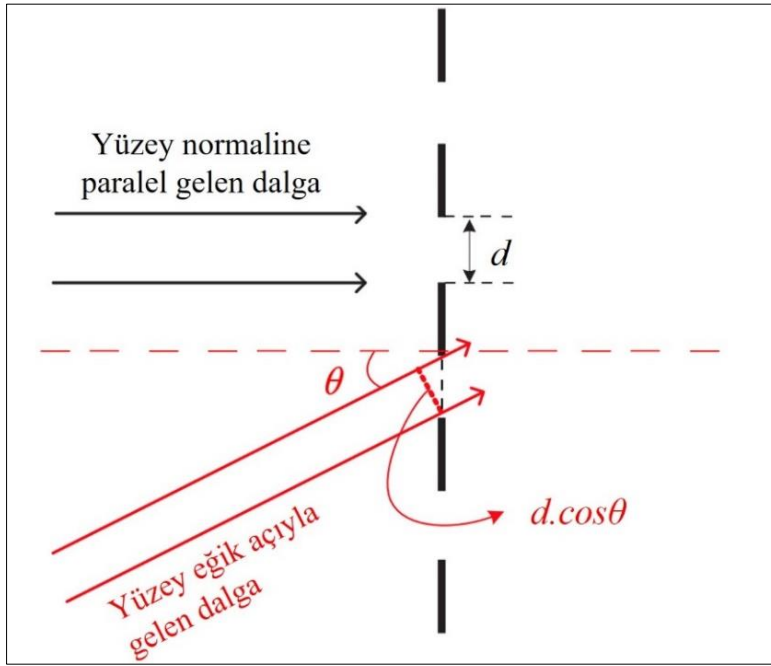
Şekil 2.8. Dielektrik malzemenin gelen EM dalgaya etkisi, 1. Durum dielektrik tabakanın bir yüzüne yerleştirilmiş FSY, $\epsilon_{eff} = (\epsilon_r + 1)/2$; 2. Durum dielektrik tabakanın arasına yerleştirilmiş FSY, $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$

2.4.4. Dalganın FSY'ye geliş açısı ve polarizasyonu

EM dalganın geliş açısı

Laboratuvar ortamından çıkıp çevre etkilerinin de yer aldığı dış ortamda uygulamalar yapıldığında EM dalgaların doğrudan, yansıma ve saçılmalarla birden fazla yoldan ilerleyebildiği, dolayısıyla FSY'ye eğik açılarla ulaşabildiği görülmektedir. Eğik açıyla

gelen bir EM dalga, periyodik olarak dizilmiş bir yapının yüzeyine temas ettiğinde yüzeydeki yapıyı indükleyerek bir akım dağılımına neden olacaktır. Yüzeyin eğik açıyla gelen dalgaya verdiği tepki ise, dik açıyla gelen dalgaya nazaran, dalganın yüzey normaliyle yaptığı açının büyümesiyle orantılı olarak önemli ölçüde değişecektir. FSY tepkisindeki bu değişim iki ana faktöre bağlıdır; elemanlarının kalınlığı ve elemanlar arasındaki mesafe. Dielektrik malzemenin kalınlığı (h) ile FSY tepkisindeki yani FSY'nin rezonans frekansındaki değişimin en aza indirilebileceği bölüm 2.3.3'te detaylı olarak anlatılmıştır.



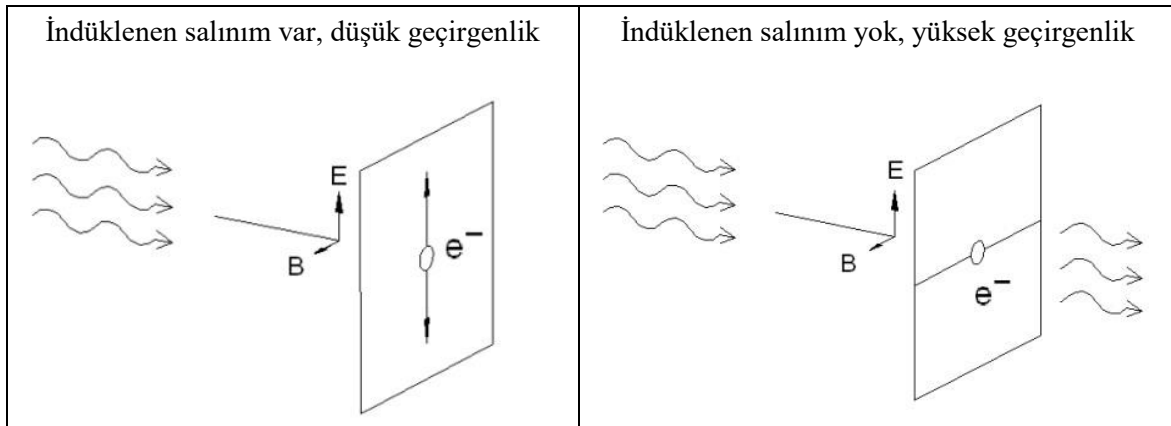
Şekil 2.9. Elektromanyetik dalganın geliş açısına göre periyodik elemanlar arasındaki mesafenin değişimi [14]

Şekil 2.9'da geometrik çizimlerde gösterildiği üzere; FSY'e eğik açılarla gelen bir dalganın yüzey normali ile yaptığı açığı θ ve elemanlar arasındaki mesafeyi de d ile ifade edersek, yüzeye eğimli gelen dalganın elemanlar arasında gördüğü mesafe $d.\cos\theta$ ile belirtilir. Yani θ değeri arttığında elemanlar arasındaki mesafe azalacağından rezonans frekansı (FSY tepkisi) değişecektir. Kısacası frekans seçici yüzeylerin işlevsel özellikleri, farklı açılarla gelen elektromanyetik dalgalar için değişmekte ve bozulmaktadır. Eğer elemanlar arasındaki mesafe yeteri kadar büyük seçilirse FSY'nin eğik açılarla gelen EM dalgaya olan duyarlılığı azalacak, daha kararlı bir yapıya sahip olacaktır. Ancak şunu da unutmamak gerekir, elemanlar arasındaki mesafe rezonans frekansının dalga boyundan daha büyük ($d \geq \lambda$) olursa istenmeyen ışınlamalar (grating lobes) meydana gelecektir [2]. Bu yüzden elemanlar

arası mesafe açısal kararlılığı sağlayacak kadar büyük, istenmeyen ışınlımların olmasını engelleyecek kadar küçük seçilmelidir.

EM dalganın polarizasyonu

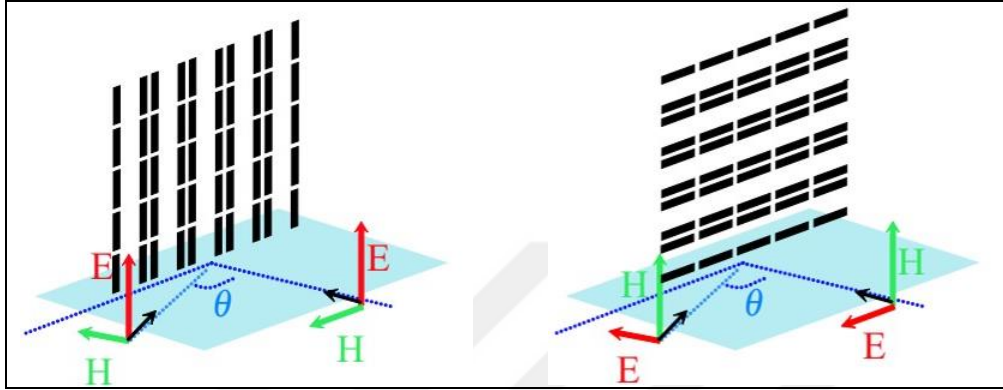
Elektromanyetik dalganın geliş açısının yanı sıra gelen dalganın polarizasyonu da frekans seçici yüzeyin karakteristik özelliklerini etkilemektedir. Bu durumu incelemek maksadıyla Şekil 2.10'da gösterildiği üzere örnek bir durum oluşturulmuştur [17]. Birinci durumda (şekilde solda), gelen düzlemsel dalganın elektrik alan vektörü ile yüzey üzerindeki dipol elemanın boyu aynı düzlemde ve aynı yöndedir. Gelen dalga ile indüklenen dipol eleman içerisindeki elektronlar dipol eleman boyunca yukarıdan aşağıya doğru bir salınım yapacaktır. Bu salınım neticesinde gelen EM dalganın enerjisi kinetik enerji olarak harcanacak ve yüzeyin diğer tarafına geçen enerji miktarı çok az olacaktır. İkinci durumda (şekilde sağda) ise, gelen düzlemsel dalganın elektrik alan vektörü ile yüzey üzerindeki dipol eleman birbirlerine dik konumdadır. Bu durumda gelen EM dalga ile indüklenen dipol eleman içerisindeki elektronlar yukarıdan aşağıya doğru salınım yapacaktır. Ancak salınım yapılan mesafe birinci duruma kıyasla çok çok daha az olduğu için EM enerjinin küçük bir kısmı yüzey üzerinde kinetik enerjiye dönüşecek, kalan enerji ise yüzeyin diğer tarafına geçecektir [17].



Şekil 2.10. Elektrik alan vektörü ile dipol eleman aynı düzlemde ve aynı yönde (solda), elektrik alan vektörü ile dipol eleman birbirine dik konumda (sağda) [17]

Yukarıda bahsedilen durumu FSY'ler için genelleleyebiliriz. Bu durumda Şekil 2.11'de örnek verildiği gibi periyodik dipol elemanlardan oluşan bir FSY var olduğu ve bu yüzeylerin iki dikey polarizasyon senaryosu (gelen TE ve TM dalgası) dikkate alınarak indüklendiği

varsayalım. Her iki senaryoda da elektrik alan ileten şeritler yönünde polarize edilmiş olsa da gelen EM dalga yüzey normaline eğik açıyla gelmeye başladığında şeritler üzerinde indüklenen akımlarda, tıpkı yukarıda tek bir dipol için verilen örnekte olduğu gibi, değişimler meydana gelecektir. Bunun nedeni elektrik alan vektörünün dipol uzunluğunu uyarması ve gelen açının değişimi ile uyardığı dipol uzunluğunun değişmesidir.



Şekil 2.11. TE (Transverse Electric) dalgalar ile indüklenen indüktif bileşenler (solda), TM (Transverse Magnetic) dalgalar ile indüklenen indüktif bileşenler (sağda) [17]

Bu bölümde bahsedilenlerin ışığında, elektromanyetik dalganın geliş açısının veya polarizasyonunun değişmesine bağlı olarak frekans seçici yüzeyin karakteristik özelliklerinde / performansında istenmeyen değişiklikler gözlemlenecektir. Bu istenmeyen durum uygun eleman boyutlarının seçimi, birden fazla FSY katman kullanımı ya da dielektrik substrat (alttaş) kullanımı ile azaltılabilmektedir [1, 2, 13, 16].

2.5. Analiz Yöntemleri

Periyodik yüzeylerin elektromanyetik dalga saçılmalarını analiz etmek amacıyla geçmişten günümüze birçok yöntem/teknik geliştirilmiştir. FSY'lerin karakteristik özellikleri ilk olarak eşdeğer devre yöntemini içeren yaklaşık analitik tekniklerle (yarı-statik yaklaşımla) incelenmiştir. Bununla birlikte son dönemde hem daha karmaşık yapıların çözümlemesinde analitik yöntemlerin yetersiz kalması hem de bilgisayar teknolojisinin gelişmesi periyodik sınır koşullarını kullanan son teknoloji sayısal analiz yöntemlerinin ortaya çıkmasını hızlandırmıştır. Bunlardan en sık tercih edilen yöntemleri şu şekilde sıralayabiliriz [3],

- Sonlu elemanlar metodu (finite element method, FEM),
- Moment metodu (method of moments, MoM),
- Zamanda sonlu farklar metodu (finite difference time domain method, FDTD),
- İntegral denklem metodu (the integral equation -boundary element method, IEM/BEM),
- Eşdeğer devre modeli (equivalent circuit models, ECM/EDM).

2.5.1. Sonlu elemanlar metodu

Sonlu elemanlar metodu (FEM), karmaşık mühendislik problemlerini basitleştirerek kontrol edilebilir daha küçük parçalarla çözümünü sağlayan yöntem olarak tanımlanabilir. FEM’de, öncelikle geniş bir sistem sonlu eleman adı verilen küçük, basit ve birbirine bağlı (düğüm noktaları içeren) çok sayıda bileşenlerine ayrılır. Her bir bileşen için fiziksel büyüklüklerin davranışları tanımlanır. Bileşenler düğüm noktalarından bağlanarak yapının tamamı için yaklaşık bir denklem sistemi oluşturulur. Sistem denklemleri düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerler için çözülür ve seçilen bileşenlerin değerleri hesaplanır. Bu yöntemin temeli ilk kez Courant tarafından 1943 yılında atılmış, 1950’li yıllarda uygulamanın uçak parçalarının tasarımında kullanılmasıyla uygulama alanları genişlemiştir [18]. Elektromanyetik problemlerin çözümü için sonlu eleman yöntemi yaklaşık altmış yıldır kullanılmaktadır. Başlangıçta elektrostatik ve manyetostatik problemlerin analizi için kullanılmış, son yıllarda, özellikle radyasyon ve saçılma alanlarında, özdeğer analizlerinde, iki ve üç boyutlu vektör problemlerinin analizinde kapsamlı bir şekilde uygulanmıştır [19]. Frekans seçici yüzeyler de ise periyodik yapılarıdaki saçılma problemlerinin incelenmesinde, periyodik yapıya gelen dalgaların yansıma ve iletim katsayıları ile elektriksel ve manyetik geçirgenlik analizlerinde kullanılmaktadır [19, 20].

2.5.2. Moment metodu

Moment metodu, tıpkı sonlu elemanlar metodu gibi büyük geometrileri küçük bölümlerine ayırarak problemleri çözmektedir. Parçalara ayrılan her bir eleman integral denklemlerine dönüştürülmektedir. MoM, bir integral denklem tekniğidir; FEM veya FDTD yöntemlerinde kullanılan diferansiyel formlarının aksine Maxwell denklemlerinin integral formunu çözmektedir. İntegral denklemlerinin çözümlemesinde matrisler kullanan moment metodu elektromanyetikte genellikle ışıma, saçılma ve dalga problemlerinde kullanılmaktadır. Problemin, yani integral denkleminin zorluğu moment yönteminde kullanılan matrisin büyüklüğünü de artırmaktadır. Bu yüzden büyük matris denklemlerinin çözümü yüksek

hesaplama zamanı ve güçlü bilgisayar işlemcilerine ihtiyaç duymaktadır [22]. Kullanılan matris denklemlerinin büyüklüğü nedeniyle moment metodu ancak homojen ve düzlemsel dielektrik tabakalar üzerindeki periyodik yapıların analizinde kullanılmaktadır. Karmaşık yapıları geometrilerin ve homojen olmayan yapıların çözümlemesinde sonlu elemanlar ve zamanda sonlu farklar metodu daha çok tercih edilmektedir.

FSY'lerin Floquet harmonikleriyle (integral denklemleriyle) ifade edilerek çözümlenebildiği bölüm 2.2.1'de bahsedilmiştir. Momentler methodu ile FSY üzerinde indüklenen akımın integral ifadesi bir dizi matris denklemine dönüştürülerek analiz edilmektedir. Literatür incelendiğinde MoM'un FSY'lerde karmaşık olmayan yapılarda FSY'nin temel karakteristik özelliklerini hızlı bir şekilde analiz etmek amacıyla kullanıldığı görülmektedir [22, 23].

2.5.3. Zamanda sonlu farklar metodu

Zamanda sonlu farklar (FDTD) yöntemi, elektromanyetikteki problemleri çözmek için kullanılan tam dalga tekniklerinin hem kavramsal hem de uygulama açısından en popüler sayısal yöntemlerden biridir. FDTD çok çeşitli sorunları doğru bir şekilde çözebilmektedir. Bununla birlikte, tüm sayısal yöntemlerde olduğu gibi yapaylık payına sahiptir ve doğruluk, uygulamaya bağlıdır. FDTD yöntemi karmaşık sorunları çözebilir, ancak çözümler genellikle büyük miktarda bellek ve hesaplama süresi gerektirebilir [25].

İlk olarak 1966'da Kane Yee tarafından önerilen FDTD algoritması, diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerini doğrudan zaman alanında ayrıklaştırarak çözümlemektedir. Bu yöntem, en genel haliyle üç elektrik alan ve üç manyetik alan bileşenlerinin uzayın seçilen ayrık noktalarında ayrık zaman aralıklarında hesaplanmasına dayanır. Bundan dolayı çözümle uzun zaman almaktadır. Homojen olmayan dielektrik tabakalarla üç boyutlu frekans seçici yüzey yapılarının modellenmesinde FDTD yaklaşımı oldukça uygun çözümler sunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, plazma ve grafen gibi homojen olmayan frekans seçici yüzeyler [26] ile terahertz teknolojisi uygulamalarında [27] kullanılan FSY'lerde geliştirilmiş FDTD yöntemi tercih edildiği görülmektedir.

2.5.4. İntegral denklem metodu

Sınır elemanı metodu olarak da bilinen IEM, integral denklemler (yani sınır integral formunda) olarak formüle edilmiş doğrusal kısmi diferansiyel denklemlerini çözmenin

sayısal bir hesaplama yöntemi olarak tanımlanabilir. Genellikle akışkanlar mekaniği, akustik, elektromanyetik (Momentler Yöntemi) ve kırılma mekaniği alanlarında diferansiyel denklemlerin çözümlemesi ve analizinde kullanılmaktadır. İntegral denklem metodu, kısmi diferansiyel denkleminin tam bir çözümü olarak kabul edilebilir [28]. IEM, kısmi diferansiyel denklemle tanımlanan alan boyunca değerler yerine, sınır değerlerini integral denkleme sıgdırmak için verilen sınır koşullarını kullanmaya çalışır. Bu yapıldıktan sonra, integral denklem çözüm alanının iç kısmındaki istenen herhangi bir noktada çözümü doğrudan sayısal olarak hesaplamak için tekrar kullanılabilir. Kavramsal olarak, modellenen yüzey üzerinde bir "ağ" oluşturarak çalışır. İntegral denklem metodu, küçük bir yüzey/hacim oranının olduğu problemler için sonlu elemanlar dahil olmak üzere diğer yöntemlerden genellikle daha etkilidir ancak bir çok problem çözümlemesinde FEM ve FDTD'ye oranla yetersiz kalmaktadır [28].

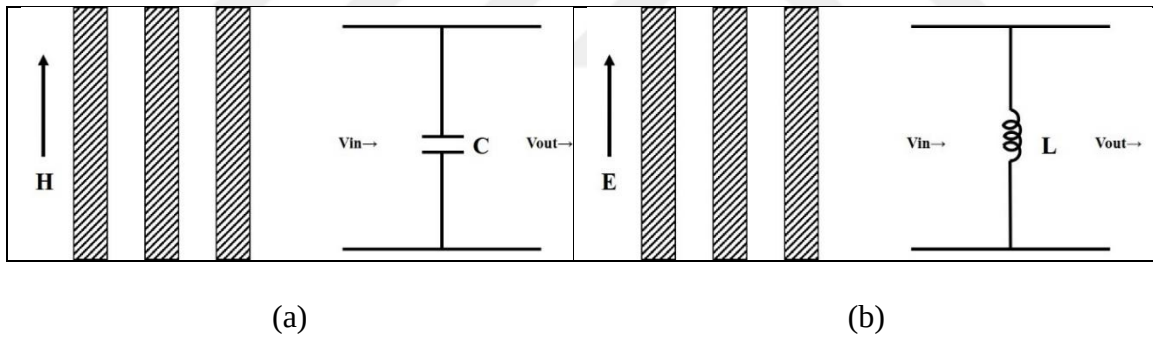
Sınır integral denklemleri ilk olarak 18. Yüzyılda kullanılsa da sayısal uygulamasının kökeni, elektronik bilgisayarların kullanıma sunulduğu 1960'lardan itibaren ortaya çıkmıştır. Sınır ögesi yöntemi olarak bilinen sayısal tekniğin tam olarak ortaya çıkışı 1970'lerin sonlarında meydana gelmiştir. 1990'lı yıllardan itibaren ise sıklıkla kullanılmaya başlamıştır [29]. Frekans seçici yüzeylerde ise genellikle küçük ama hacimsel büyüklüğü olan (üst üste yığılmış FSY [30] veya kavisli yüzeylere uygulanan FSY [31] gibi) elemanların çözümlemesinde kullanıldığı görülmektedir.

2.5.5. Eşdeğer devre modeli

Eşdeğer bir devre belirli bir yapının tüm elektriksel özelliklerini barındıran teorik bir devreyi ifade etmektedir. Bilgisayarlara veya uzun formüllere dayanan yukarıda açıklanmış analiz yöntemlerinin aksine, karmaşık yapılarının hesaplamasını basitleştiren bir yöntem olarak tercih edilmektir. Direnç (R), indüktör (L) ve kondansatör (C) gibi devre elemanları kullanılarak transistör tasarımından entegre sistemlere, güç elemanlarından motor tasarımına kadar elektrik ve elektronik mühendisliğin her alanında kullanılmaktadır.

Eşdeğer devre modeli (EDM) frekans seçici yüzeylerin yani periyodik yapıların elektromanyetikte kullanılmaya başlanmasıyla beraber analiz yöntemi olarak sunulan ilk metotlardan birisidir. 1950'li yıllarda Marcuvitz tarafından periyodik yapıların gelen düzlemsel dalgalara karşı göstermiş olduğu karakteristik özelliklerin eşdeğer devreler ile

ifade edilebileceği ve analiz edilebileceği belirtilmiştir [32]. Marcuvitz'e göre; manyetik alana paralel uzanan sonsuz uzunluktaki periyodik ızgaralara dik gelen düzlemsel dalgalar, bu ızgaralar arasındaki boşluklarda yüzey akımları oluşturur. Periyodik ızgaralar üzerinde yüzey akımlarının neden olduğu tepki, elemanlar arasındaki boşluklar nedeniyle olduğu için kondansatör ile ifade edilebilmektedir (Şekil 2.12.a). Tam tersi olarak, elektrik alana paralel sonsuz uzunlukta ve sıfır kalınlıktaki periyodik ızgaralara paralel gelen düzlemsel dalgalar, bu ızgaralar boyunca yüzey akımları oluşturur. Bu akımların sebep olduğu tepki ise indüktör ile Şekil 2.12.b'de gösterildiği gibi ifade edilebilmektedir [32]. Marcuvitz'in sunduğu bu iki genellemeyle iletken elemanlardan oluşan periyodik FSY'lerin farklı yapısal tasarımlarına karşı farklı devre elemanları eklenmek suretiyle eşdeğer devre modellemesi yapılabilmektedir. Ancak her bir farklı durumun geçerliliğini kanıtlamak için ayrı bir devre modeli oluşturulması zorunluluğu ve teknik olarak karmaşık geometrilili yapılara (çok katmanlı yapılar gibi) uygulanmasının zor olması, ayrıca yüzey normaline eğik açıyla gelen dalgalarda açı değeri arttıkça geçerliliğini kaybetmesi bu yöntemin dezavantajları olarak sıralanabilir [33].



Şekil 2.12. (a) Manyetik alana paralel sonsuz uzunluktaki periyodik ızgaralar ve eşdeğer devresi, (b) elektrik alana paralel sonsuz uzunluktaki periyodik ızgaralar ve eşdeğer devresi

Çizelge 2.2'de en çok kullanılan FSY geometrileri eşdeğer devre temelinde sınıflandırılmıştır (Çizelge 2.2'deki semboller, // şönt bağlantı; çarpma, seri bağlantı anlamına gelir). Bu çizelgeden de anlaşılacağı üzere yapıların karmaşıklığının artması eşdeğer devre eleman sayısının artmasına neden olmaktadır. Eleman yapısı geometrik ise eşdeğer devre modellemesi yapılabilmekte ancak geometrik olmayan veya optimizasyon yöntemi ile oluşturulan dağınık elemanlı yapıların eşdeğer devre modelini çıkarmak mümkün olmamaktadır. Bu gibi yapıların EDM'si oluşturulsa dahi analiz sonuçları benzetim sonuçları ile örtüşmediği görülmektedir [34].

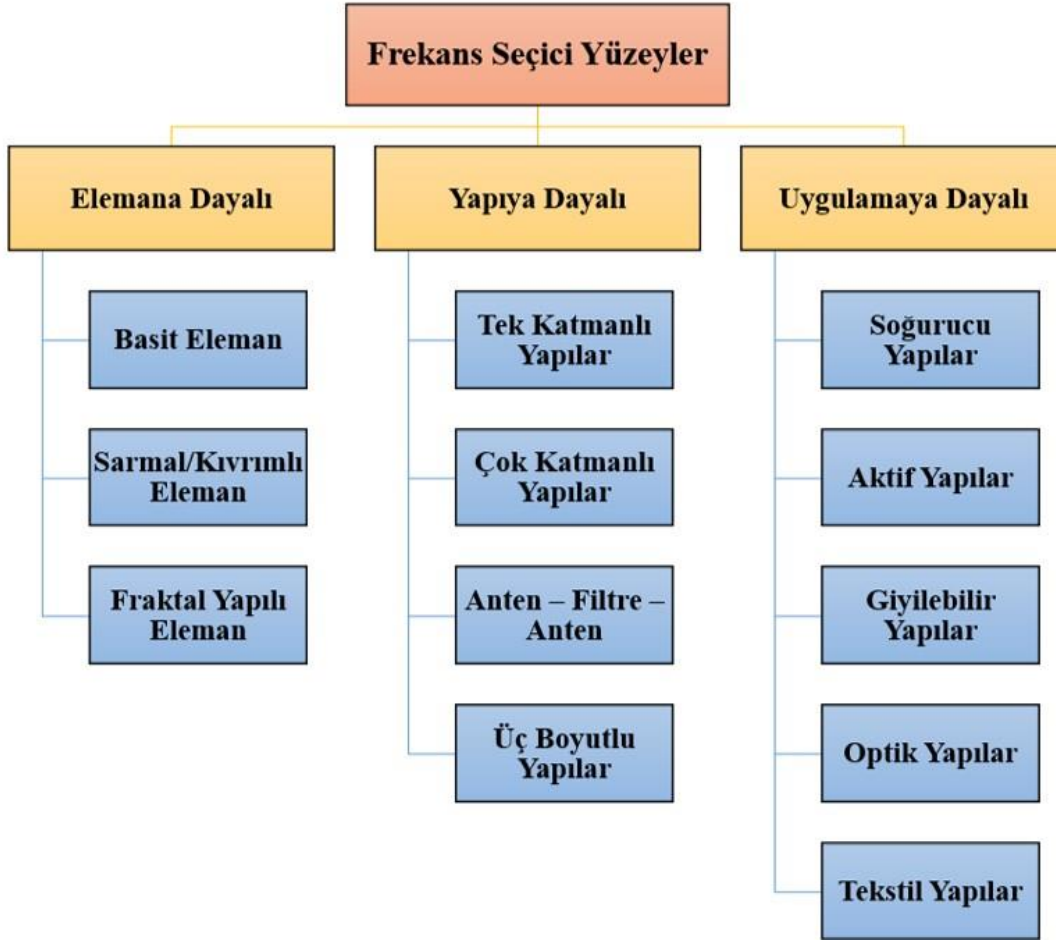
Özet olarak, MoM, IEM/BEM, FEM ve FDTD yöntemleri gibi yoğun hesaplamaya dayalı sayısal teknikler, karmaşık FSY yapılarını analiz etmek için kullanılmaktadır. Özellikle İntegral denklem metodu, küçük bir yüzey/hacim oranının olduğu problemler için sonlu elemanlar dahil olmak üzere diğer yöntemlerden daha etkilidir. Karmaşık yapıları geometrilerin ve homojen olmayan yapıların çözümlemesinde sonlu elemanlar ve zamanda sonlu farklar metodu daha çok tercih edilmektedir. Moment metodu ise homojen ve düzlemsel dielektrik tabakalar üzerindeki periyodik yapıların analizinde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, sonsuz bir periyodik diziyi modellemek için bu teknikler, günümüzün standart bilgisayar kapasitelerinin ötesinde önemli bilgisayar kaynakları gerektirmektedir. Ayrıca, bu teknikler yalnızca elektromanyetik alanın sayısal yaklaşımlarını sunmaktadır. Buna karşılık eşdeğer devre modeli yalnızca basit FSY eleman tipleri için önerilse de hızlı, kolay uygulanabilir olması ve bilgisayar gerektirmeyen (analog) bir hesaplama yöntemi sunması nedeniyle halen literatürdeki birçok çalışmada tercih edilmektedir.

Çizelge 2.2. Rezonans özelliklerine uygun olarak sıralanan FSY elemanlarının eşdeğer devre modellerine göre sınıflandırılması

Eleman Tipi	Eleman Şekli	Eşdeğer Devre
Rezonans Olmayan Elemanlar	Şerit, yama, tel ızgara vb.	C
Tek Bantlı Elemanlar	Döngü, dipol, çapraz dipoller, üç kutuplu yapı, köpek kemiği yapısı vb.	(LC)
Çift Bantlı Elemanlar	Çift çapraz dipoller, çift döngü, Kudüs haçı vb.	(LC)/(LC) veya (LC)(L//C)
Çok Bantlı Geometrik Tasarımlı Elemanlar	Eş merkezli (iç içe) döngüler, fraktal elemanlar	(LC)/(LC)/(LC)...
Çok Bantlı Geometrik Olmayan Tasarımlı Elemanlar	Dörtlü spiral yapılar, kıvrımlı dipol veya döngüler, optimizasyon yöntemi ile oluşturulmuş dağınık yapılar	Fiziksel olarak mümkün değil

2.6. Sınıflandırılması

Frekans seçici yüzeyler, bugüne kadar yapılan çalışmalara dayanarak eleman tipine, yapısına ve uygulama alanına dayalı olmak üzere 3 ana başlık altında kategorize edilmiştir (Şekil 2.13) [3].



Şekil 2.13. Frekans seçici yüzeylerin taksonomisi [3]

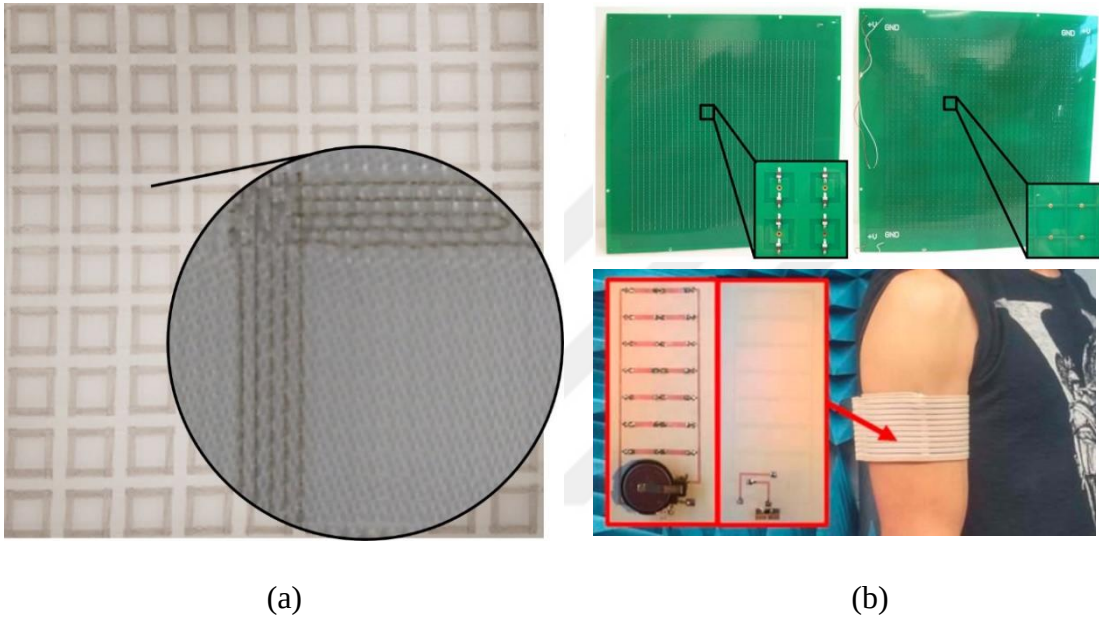
Elemana dayalı FSY'ler üç alt gruba ayrılmıştır. Birinci grup olan *basit yapıli elemanlar* bölüm 2.3.1'de detaylı olarak anlatılmıştır. Esnek yapıli basit FSY elemanlarının tasarımı ve üretimi bir hayli zordur. Bu zorluk tasarımcıları basit yapıli elemanlarla aynı karakteristik özellikleri gösteren daha minyatür elemanlar üretmeye zorlamıştır. İkinci grup *sarmal/kıvrımlı elemanlar*, nispeten küçük elektriksel boyutlara sahip FSY yapıları üretmek için tercih edilmektedir. Bu yapıların basit elemana kıyasla polarizasyonda daha iyi kararlılık gösterebileceği literatürdeki çalışmalarla kanıtlanmıştır [35]. *Fraktal yapılar*, düzenli veya düzensiz olarak kendisini belirli bir ölçek doğrultusunda tekrarlayan tasarımlardır.

FSY'lerde kompakt yapılar elde etmek, çok bantlı frekans tepkisi üretmek, operasyonel bant genişliğini iyileştirmek ve eleman boyutlarını küçültmek maksadıyla fraktal tasarımlar araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Frekans seçici yüzeylerde en çok kullanılan fraktal yapılar Koch, Minkowski, Hilbert ve Sierpinski fraktallarıdır [3].

FSY'ler ikinci grupta yapılarına göre kategorize edilerek dört alt başlıkta altında toplanmıştır. *Tek katmanlı* FSY'ler iki boyutlu periyodik iletken rezonant elemanların dielektrik malzeme üzerine uygulanmasıyla oluşturulmaktadır. Genellikle bant durduran veya bant geçiren filtre tasarımında kullanılmaktadır. Bu tip FSY'lerde, açısız kararlılığı sağlamak ve istenmeyen ışınlamaları engellemek için elemanlar arasındaki mesafe hesaplaması önem taşımaktadır. Tasarımı bu gruptaki diğer yapılara nazaran kolay olsa da performansı, değiştirilecek parametrelerin az olması nedeniyle daha düşüktür. FSY teorisinde, işletim bant genişliğinin (BG) sınırlandırılması veya BG performansının iyileştirilmesi tek katmanlı yapılar ile gerçekten güçtür. Tek katmanlı yapılar üzerinde fraktal veya kıvrımlı elemanların kullanılması BG'de iyileştirmeye neden olsa da kesirli bant genişliği (fractional bandwidth – BG_f) halen sınırlı olmaktadır. Bundan dolayı ardışık FSY frekans bantlarının ayrılması, daha geniş iletim ve yansıma bantlarının elde edilmesi ve çok bantlı karakteristik bir yapı oluşturulması maksadıyla *çok katmanlı (kaskad)* yapılar tercih edilmektedir. Bu yapıların en büyük dezavantajı üretiminin ve düşük frekans bantlarında yüksek BG elde etmenin zor olmasıdır. Yakın zamanda önerilen, *Anten-Filtre-Anten (AFA)* dizisine dayanan FSY'ler, düşük profilli yapısı ve yüksek frekans seçiciliği nedeniyle tercih edilmeye başlanmıştır. AFA tasarımı, belirli bir frekans bandında bir filtre elde edebilmek için FSY'nin alt ve üst yüzeyine almaç ve göndermeç özellikli mikroşerit anten yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır [36]. Bu yapının dezavantajı üretiminin zor ve açısız kararlılığın düşük seviyede olmasıdır [3].

Genellikle bir FSY'de istenen temel karakteristik özellik, uygulama alanları farklı dahi olsa (geniş bant/dar bant/soğurucu vs.), eğik açıyla gelen EM dalgaya ve dalganın polarizasyonuna karşı duyarsızlıktır. Ne yazık ki, iki boyutlu (2B) tek katmanlı veya çok katmanlı düzlemsel FSY'ler yukarıda bahsedilen özelliklerin tümünü aynı anda ve her alanda gerçekleştirmek için yetersiz kalmaktadır [37]. Bu tür yapıların üretimi kolay olmasına rağmen, tatmin edici performans sağlayamama birçok potansiyel uygulamada kullanımlarını kısıtlamaktadır. Son yıllarda geleneksel 2B FSY'lerin bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak için farklı ve benzersiz bir yapıya sahip olan üç boyutlu (3B) yapılar

sunulmuştur. 3B FSY tasarımında geleneksel çok katmanlı yapılar yerine 2B FSY'nin düzlemsel katmanları arasına ek yapılar veya boşluklar eklenmiştir. Yapılar arası bu eklemeler mikroşerit iletken levha veya şerit dizileri olabileceği gibi, sadece dielektrik malzeme içerisinde periyodik yollar (oyuklar) açmak suretiyle de olabilmektedir [37]. 3B FSY yapıların üretimi zor olsa da operasyonel frekans bandında kararlılığın yüksek olması, daha geniş BG elde edilebilmesi gibi avantajları sayesinde tasarımcılar tarafından son yıllarda sıkça tercih edildiği görülmektedir.



Şekil 2.14. (a) Esnek yapılı geniş frekans bandına sahip tekstil FSY [38], (b) varikap diyot ile ayarlanabilir aktif FSY (üstte), yedi periyodik dipol ile üretilmiş giyilebilir FSY (altta) tasarımları [39, 40]

Son grupta ise FSY'ler uygulamaya dayalı olarak farklı alt kategorilere ayrılmıştır. Genel olarak FSY'ler belirli bir frekans aralığında gelen EM dalgaya karşı iyi bir yansıma ve iletim karakteristiği göstermektedir. Ancak bazı uygulama alanlarında gelen dalga yansımasının azaltılması veya yok edilmesi istenmektedir. Yansıtılan sinyaller, genellikle FSY tasarımında bazı soğurucu (mikrodalga emiciler) dizi elemanlarının eklenmesiyle durdurma bandında absorbe edilebilmektedir. Bu yapılar *FSY soğurucular* olarak adlandırılır ve bölüm 2.1'de bahsedildiği üzere ilk olarak hayalet uçak teknolojisinde kullanılmıştır.

Uygulamaya dayalı bir diğer model ise aktif yapılı FSY'dir. Geleneksel yapıdaki pasif FSY'ler kalıcı fiziksel özellikleri nedeniyle performans açısından esnek değildir ve rezonans frekanslarında anlık değişim gerektiren uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Aktif FSY'de

karakteristik özelliklerin (rezonans frekansı, polarizasyon vb.) anlık değişimi, pasif yapıya aktif elemanların eklenmesi ile mümkündür. En yaygın kullanılan aktif elemanlar açma/kapama anahtarları, kapasitörler; PIN, varaktör, varikap ve Schottky diyotlardır [3]. Ayrıca alttaş olarak kullanılan yapıda ferrit/ferroelektrik [41], grafen [27] ve plazma [26] gibi dışarıdan verilen gerilim ile karakteristik yapısı değişen malzemeler kullanılarak da aktif FSY'ler üretilmiştir. Aktif yapıların farklı karakteristik özellikleri tek bir yapıda sunması avantaj gibi görünse de üretimlerinin zor ve dışarıya bağımlı (gerilim ihtiyacı) olması bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Son yıllarda RFID sistemlerinin ve giyilebilir teknolojinin sıkça kullanımı her alanda farklı çalışmalara yol açmıştır. Bunlardan bir tanesi de giyilebilir FSY'dir. Giyilebilir yapılarda FSY'ler almaç-göndermeç (transponder) [42], RFID alıcı veya sensör [40] olarak kullanılmaktadır. Uygulamaya dayalı diğer bir FSY türü de tekstil yapılardır. Tekstil FSY'lerde dokuma, örme, brode (nakış), serigrafi ve inkjet baskı vb. teknikleri kullanılmaktadır [43]. Farklı filtre özellikleri sergileyebilen bu tür yapıları konformal yüzeylere uygulamak kolaydır. Ancak eğik gelen EM dalgalara karşı verdiği tepkiler ve göstermiş olduğu karakteristik özellikler kararlı olmadığı için henüz günümüzde yaygın olarak tercih edilmemektedir [38]. FSY'ler, mikrodalga alanındaki uzamsal filtreleme uygulamaları için iyi bilinirken, son zamanlarda daha da yüksek frekanslar için özellikle kızılötesi frekans bandında kullanılmaya başlanmıştır. Optik yapıları filtreler olarak adlandırılan bu FSY tasarımları iki boyutlu ve tek katmanlı nano iletken parçacık dizilerinden oluşmakta ve istenen kızılötesi frekans bandında filtre özelliği sergilemektedir [43, 44].

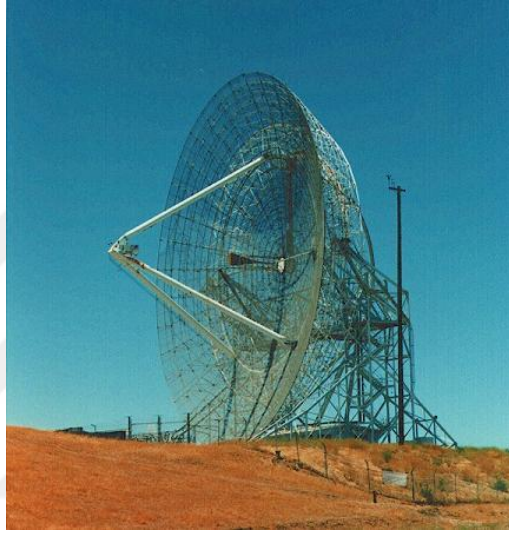
2.7. Uygulama Alanları

Radar kesitinin ayarlanması FSY teknolojisinin en heyecan verici işlevi olarak düşünülse de frekans seçici yüzeyler geçmişten günümüze, telekomünikasyon sistemlerinden optik sistemlere kadar çok geniş bir yelpazede birçok yararlı ve farklı uygulamada kullanılmaktadır. FSY'ler, elektromanyetik spektrumun mikrodalga ve optik frekans bölgelerinde, özellikle antenler, radomlar, mikrodalga fırınlar (Şekil 2.16.b), RFID sistemler, radyo frekans soğurucular, kablosuz haberleşme sistemlerine karşı elektromanyetik (EM) kalkanlama sistemleri ve meta malzemeler gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [46]. Bu yapıların antenlerle birlikte kullanımında ise FSY

kullanılmadığı duruma kıyasla anten kayıplarının azaldığı ve kazancının arttığı görülmüştür [47, 48]. Frekans seçici yüzeylerin yansıtıcı anten tasarımlarındaki kullanımına diğer bir örnek, birden fazla çalışma bandı olan reflektör antenlerin tasarımıdır (Cassini, Cassegrain vb.) [49, 50]. Ayrıca özellikle gemilerde kullanılan parabolik reflektör antenlerin yansıtıcı yüzeyi, rüzgâra karşı dayanıklılığı arttırmak ve anten ağırlığını azaltmak maksadıyla yüksek geçiren filtre karakteristiğine sahip basit bir frekans seçici yüzey modeli olan ızgara biçiminde boşluklardan yapılmaktadır [51] (Şekil 2.15.).



(a)

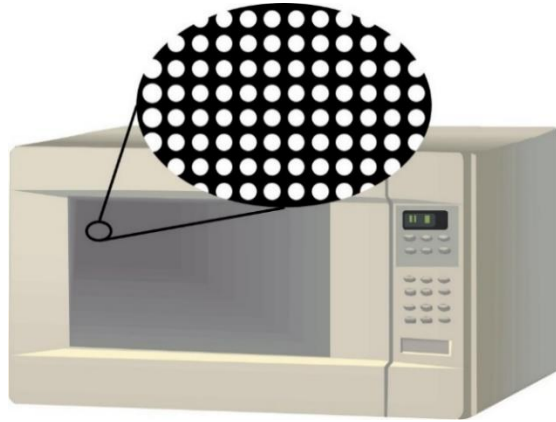


(b)

Şekil 2.15. (a) Subreflektörü FSY'den yapılan Cassegrain Reflektör Anten ve (b) Yansıtıcı yüzeyi ızgara biçiminde FSY'den olan bir Parabolik Reflektör Anten



(a)



(b)

Şekil 2.16. (a) Uçakların radar anten koruyucuları (radom) ve (b) mikrodalga fırınların cam kapak yapıları

Cisimlerin radar kesit alanının azaltılması ya da anten ölçüm odalarında sağlıklı ölçümlerin yapılabilmesi gibi birçok çalışmada çok katmanlı FSY yapılar ile oluşturulan soğurucu tasarımlar kullanılmaktadır [52, 53]. Frekans seçici yüzeylerin en çok bilinen uygulama alanlarından biri mikrodalga fırınlardır. FSY'ler mikrodalga fırınların camlarında yüksek geçiren filtre olarak 2450 MHz frekansındaki EM dalganın fırının dışına geçmesini önlemektedir. Frekans seçici yüzeyler çeşitli uygulama alanlarında gelen elektromanyetik dalganın, yüzeyi geçtikten sonra, yatay ve düşey bileşenleri arasında faz farkı yaratarak dalganın polarizasyonunu değiştiren bir kutuplayıcı olarak da kullanılmaktadır [54]. Günümüzde kablosuz haberleşme sistemlerinin kullanımının artması, bu sistemlerin üzerinde oluşan girişim etkisini de artırmıştır. Frekans seçici yüzeyler, bant geçiren ya da bant durduran filtre karakteristikleri göstererek, istenmeyen bu girişimlerin engellenmesini, istenilen frekanstaki sinyallerin ise iletilmesini sağlayarak elektromanyetik kalkanlama alanında da yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [55-57]. Anten ve radar sistemlerini dış ortamdan ve hava şartlarından fiziksel olarak koruyan radomların tasarımında da FSY'ler kullanılmaktadır. FSY'nin yapısı bant geçiren filtre özelliği sayesinde radomun içerisinde bulunan antenin çalışma frekansındaki EM dalgasının iletimine izin verirken anteni de dış etkilere karşı korumaktadır [58] (Şekil 2.16.a). Son yıllarda ise teknolojinin gelişmesiyle birlikte frekans seçici yüzeyler, radyo frekansı kullanarak nesneleri tekil ve kendiışler olarak tanıma yöntemi olan radyo frekansı ile tanımlama (RFID) teknolojisinde [59], "Giyilebilir Teknoloji" olarak da adlandırılan insanlar tarafından giyilebilen teknolojik aletler ve kıyafetlerde (Akıllı saatler, akıllı bileklikler, akıllı giysiler vb.) [42], tekstil ürünleri üzerinde [43] ve elektronik yonga uygulamalarında [60] farklı özellikleriyle kullanılmaktadır.

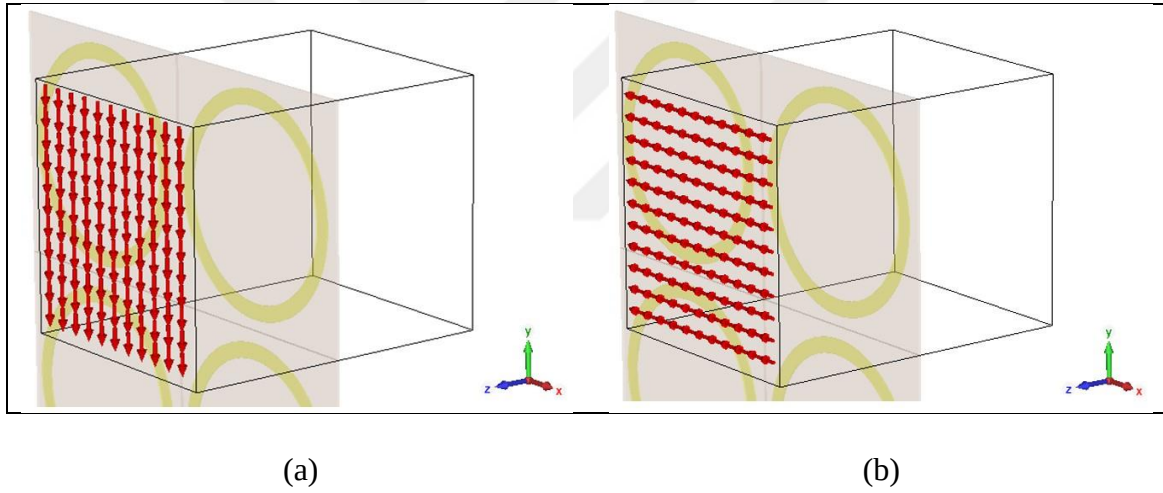
Mevcut gelişmeler ve yapılan çalışmalar ışığında FSY'ler hakkında birçok ilerici ve geleceğe dönük araştırma sürdürülmektedir. Bu kapsamda gelecekteki potansiyel uygulama alanlarının aşağıdaki başlıklar altında (bunlarla sınırlı kalmayacak şekilde) toplanabileceği söylenebilir.

- Dinamik olarak yeniden yapılandırılabilir FSY'ler,
- Ayarlanabilir ve yazılım tanımlı FSY'ler,
- Akıllı soğurucu FSY'ler,
- Frekans seçici rasorber (Frequency selective radome absorber - FSR),
- Grafen tabanlı FSY'ler,
- Tamamen dielektrik malzemeden ve 3B yazıcıyla üretilen FSY'ler,
- Plazma yapılarla dayalı değiştirilebilir FSY'ler.



3. FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Tez çalışmasının ilk aşamasında, literatür taramasında elde edilen bilgi birikimi kullanılarak tek bantlı basit yapıları FSY tasarımları ve analizleri yapılmıştır. Buradan çıkarılan kazanımlar incelenerek iki ve daha fazla frekans bandında iletim ve yansıma karakteristikleri gösteren FSY'ler tasarlanmıştır. Tasarlanan yapıların simülasyon sonuçları değerlendirilmiş ve eşdeğer devre analizleri yapılarak çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Akabinde yapıların gelen düzlemsel EM dalgalara verdiği tepkiler parametresel olarak incelenmiş, rezonans frekansındaki ve bant genişliğindeki değişimler gözlemlenmiştir. Ayrıca FSY yapılarının konformal yüzeylerdeki davranışları benzetim ortamında sorgulanmıştır. Çalışmanın sonunda ise çok bantlı karakteristiğe sahip antipodal F-tipi FSY tasarımı, analizi ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

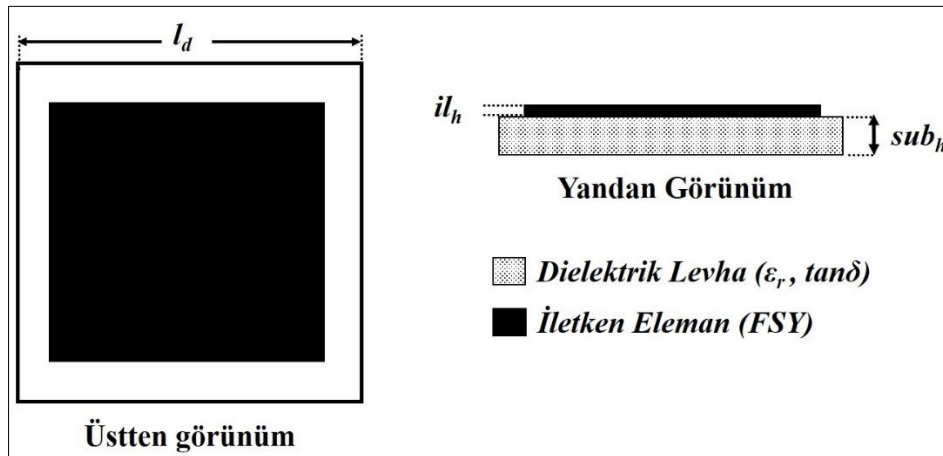


Şekil 3.1. CST MWS tarafından periyodik yapıların analizinde kullanılan Floquet modları (a) TE(0,0) modu, (b) TM(0,0) modu [61]

Bir FSY yapısının sonsuza yakın bir eleman dizisinden oluşabileceği düşünüldüğünde tasarım zamanını kısıtlamanın ve üretim maliyetinden kurtulmanın en iyi yolu bilgisayara dayalı benzetim programı kullanmaktır. Tez çalışması boyunca FSY tasarımını yapmak, bileşenlerinin EM karakteristiklerini analiz etmek ve parametrelerini optimize etmek amacıyla Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio Suite (MWS) programı kullanılmıştır. CST MWS'nin birim hücre sınır koşullarının periyodiklik yönlerinde kullanılması, FSY'deki büyük yüzeylerin hızlı ve hassas bir şekilde simüle edilmesini sağlamaktadır.

Benzetim ortamının kurulumunda FSY'nin birim hücresinin üzerinde (yan duvarlarında) x ve y yönlerinde sınır koşulları, $\pm z$ yönünde ise birim hücrenin uyarılması maksadıyla Floquet bağlantı noktaları (Floquet port) oluşturulur. Floquet bağlantı noktası, tıpkı dalga bağlantı noktası (wave port) gibi bir dizi modun (TE [0,0] ve TM [0,0] olarak adlandırılan Floquet modları") bağlantı noktası sınırındaki alanlarını temsil etmektedir. Temel olarak Floquet modları periyodik yapının frekansı, faz uyumu ve geometrisi tarafından belirlenen yayılma yönüne sahip düzlem dalgalarıdır. Dalga modları gibi, Floquet modları da yayılma sabitlerine ve düşük kesim frekansına sahiptir. Benzetimde ayrıca z yönünde üst ve alt (master ve slave) sınır koşullarının tanımlanmasına gerek yoktur; karşıt sınırların faz ilişkisi, içe doğru hareket eden düzlem dalgasının (Floquet port uyarıcıları) geliş açısı belirlenerek otomatik olarak ayarlanır. Floquet bağlantı noktası, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi (TE [0,0] ve TM [0,0] modları) iki düzlem dalgasını ortogonal elektrik alanlarıyla uyarmaktadır.

CST MWS programı FSY analizinde geniş frekans bölgesinde hızlı tarama yapabilmesi nedeniyle sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanmaktadır. Bölüm 2.5.1'de detaylı olarak açıklandığı üzere FEM ile periyodik yapılardaki saçılma problemleri, periyodik yapıya gelen dalgaların yansıma ve iletim katsayıları ile elektriksel ve manyetik geçirgenlik analizleri hızlı ve kolay bir şekilde yapılabilmektedir.



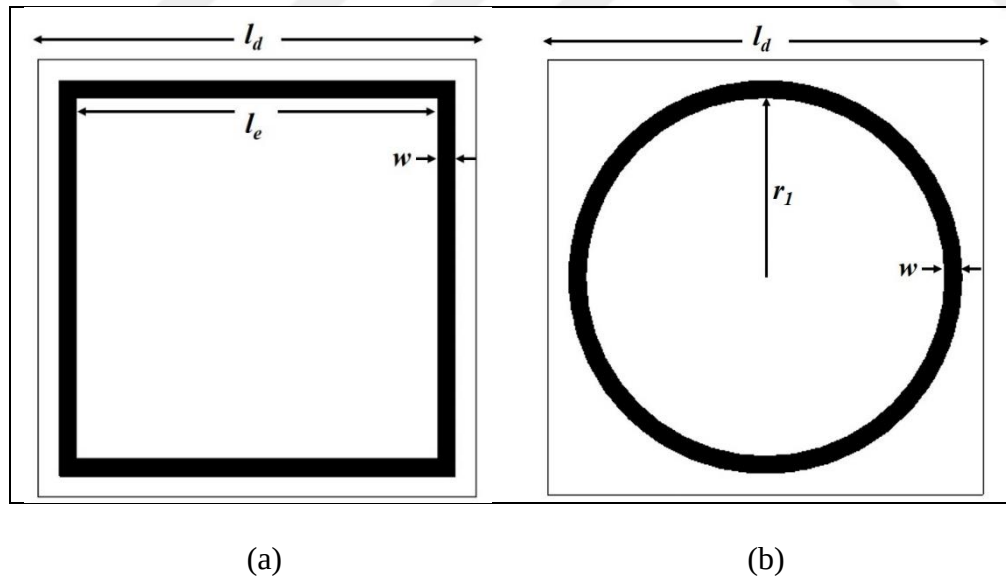
Şekil 3.2. Dielektrik alttaş ve iletken elemandan oluşan tek katmalı bir FSY görünüşü

Tasarımları gerçekleştirilen yapıların performans analizi genellikle S-parametre (S-Scattering) sonuçları üzerinden yapılmıştır. Bu parametre değerleri düzlemsel bir EM dalga ile indüklenen FSY'nin iletim ve yansıma karakteristikleri hakkında desibel (dB) cinsinden bilgi vermektedir. İletim karakteristikleri için S_{21} (birinci Floquet portundan beslenip ikinci

Floquet portuna iletilen dalganın saçılımı) veya S_{12} , yansıma karakteristikleri için ise S_{11} (birinci Floquet portundan beslenip aynı porttan yansıyan dalganın saçılımı) veya S_{22} parametreleri kullanılmıştır. Tasarımların sonunda S-parametre sonuçları eşdeğer devre analizi ve/veya laboratuvar sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

3.1. Tek Bantlı FSY Tasarımları ve Analizleri

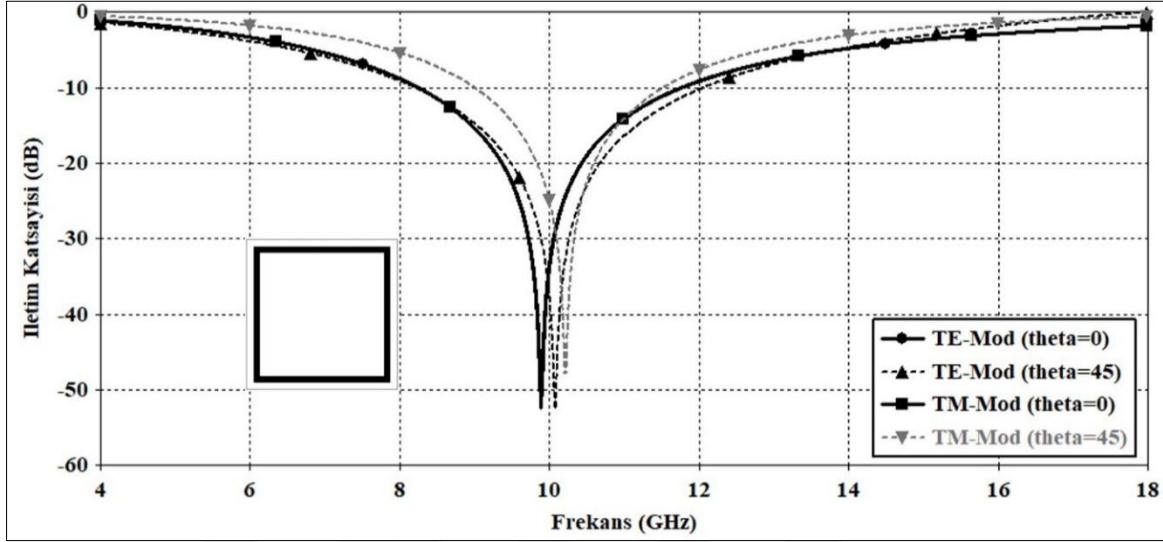
Tek bantlı FSY tasarımlarında 8-24 GHz frekans bandı aralığında tek bir rezonans frekansında *bant durduran* filtre özelliği gösteren tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Tasarımları birbiriyle karşılaştırmak için kullanılan dielektrik alttaş (substrat) malzeme ve malzemenin boyutu aynı seçilmiştir. Dielektrik substrat olarak bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 3, kayıp tanjant değeri ($\tan \delta$) 0,003 ve kalınlığı (sub_h) 0,3 mm olan Arlon AD 300 kullanılmıştır. Malzeme kare şeklinde olup bir kenar uzunluğu l_d ile ifade edilmiştir (Şekil 3.2). Bu bölümdeki tasarımı sunulan FSY'lerin toplam birim hücre alanı ($l_d \times l_d$) 7,75 x 7,75 mm²'dir. İletken malzeme olarak kalınlığı (il_h) 0,05 mm ve elektriksel iletkenliği (σ) $5,8 \times 10^7$ S/m olan tavllanmış bakır kullanılmıştır.



Şekil 3.3. (a) Kare döngü ve (b) Halka döngü FSY'nin birim eleman yapısı

Tasarımları gerçekleştirilen karmaşık yapıların temel karakteristik özelliklerini ve performans analizlerini kıyaslayabilmek amacıyla öncelikle literatürdeki en sık kullanılan kare ve halka döngü FSY yapıları incelenmiştir. Şekil 3.3'te gösterildiği ve yukarıda ayrıntılı

olarak belirtildiği üzere iletken kare ve halka yapı, l_d uzunluğundaki dielektrik alttaşın ön yüzüne yerleştirilmiştir. FSY'lerin parametre değerleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.4. Farklı θ açıları için kare döngü FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği

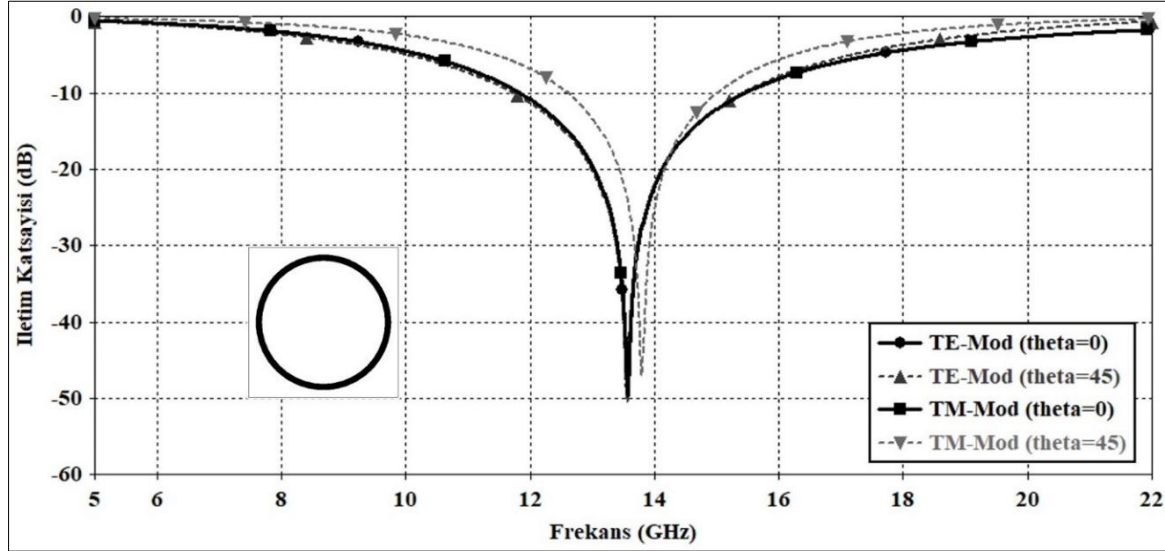
Benzetim sonucunda elde edilen S-parametre grafiğine göre TE ve TM modda yüzey normaline paralel olarak ($\theta = 0^\circ$) gelen dalgayla indüklenen kare döngü yapının rezonans frekansı 9,9 GHz, atenüasyon değeri (iletim katsayısı) -52,1 dB ve bant genişliği 3,2 GHz'dir. Gelen dalga yüzey normaline 45° açıyla geldiğinde TE modda rezonans frekansının 0,2 GHz, TM modda 0,3 GHz kaydığı ve BG'nin TE moda göre TM modda yaklaşık 1 GHz azaldığı tespit edilmiştir. Ancak $\theta = 45^\circ$ 'de rezonans frekansı (9,9 GHz) BG (9-11,51 GHz) içerisinde kaldığı için kare FSY karakteristik özelliğini korumaktadır.

Çizelge 3.1. Kare ve halka döngü FSY'nin parametre değerleri

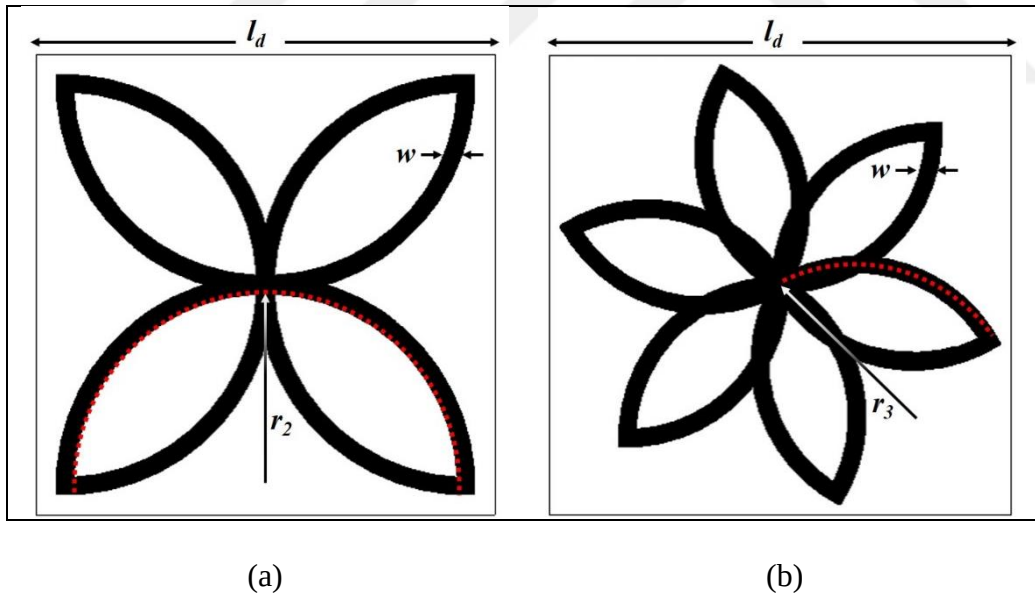
Parametre	l_d	l_e	r_1	w
	mm			
Değer	7,75	7	3,2	0,3

Halka döngü FSY'nin karakteristik özelliklerini gösteren S-parametre grafiği Şekil 3.5'te sunulmuştur. Halka döngü yapı $\theta = 0^\circ$ 'de 13,57 GHz'de rezonans etmektedir. İletim katsayısı -10 dB baz alındığında FSY'nin BG değeri 3,65 GHz'dir. Yapının eğik açılardaki

performansı incelendiğinde TE modda değişim olmadığı, TM modda rezonans frekansının 13,8 GHz'e kaydığı ve bant genişliğinin 1,2 GHz daraldığı görülmektedir.



Şekil 3.5. Farklı θ açıları için halka döngü FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği



Şekil 3.6. (a) 4'lü ve (b) 6'lı yaprak FSY'nin birim eleman yapısı

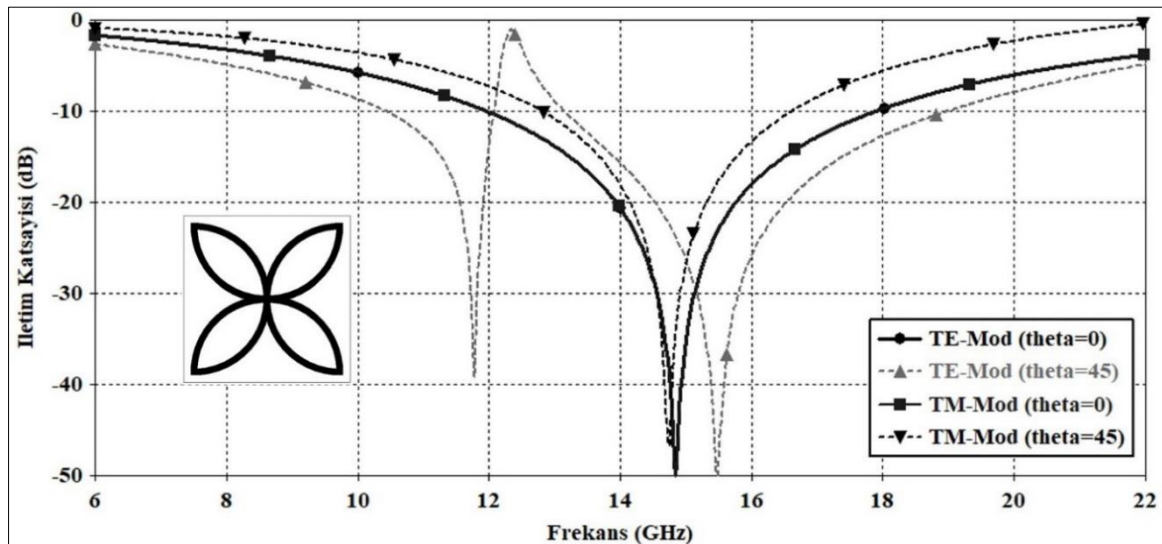
Halka döngü FSY yapısına benzer olarak Şekil 3.6'da detayları verilen 4'lü ve 6'lı yaprak FSY elemanları benzetim ortamında tasarlanmıştır. 4'lü yaprak r_2 yarıçaplı ve w genişliğindeki yarım halka döngünün, yapının merkezinde halkaların açık kısmı dışa bakacak şekilde (90° 'de bir dört yönde) yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. 6'lı yaprak FSY ise r_3 yarıçaplı çeyrek halka yapısının 60° 'de bir altı yöne bakacak ve merkezi, yapının orta

noktası olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarımlara ait parametre değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. 4’lü ve 6’lı yaprak FSY’nin parametre değerleri

Parametre	l_d	r_2	r_3	w
	<i>mm</i>			
Değer	7,75	3,3	3,5	0,3

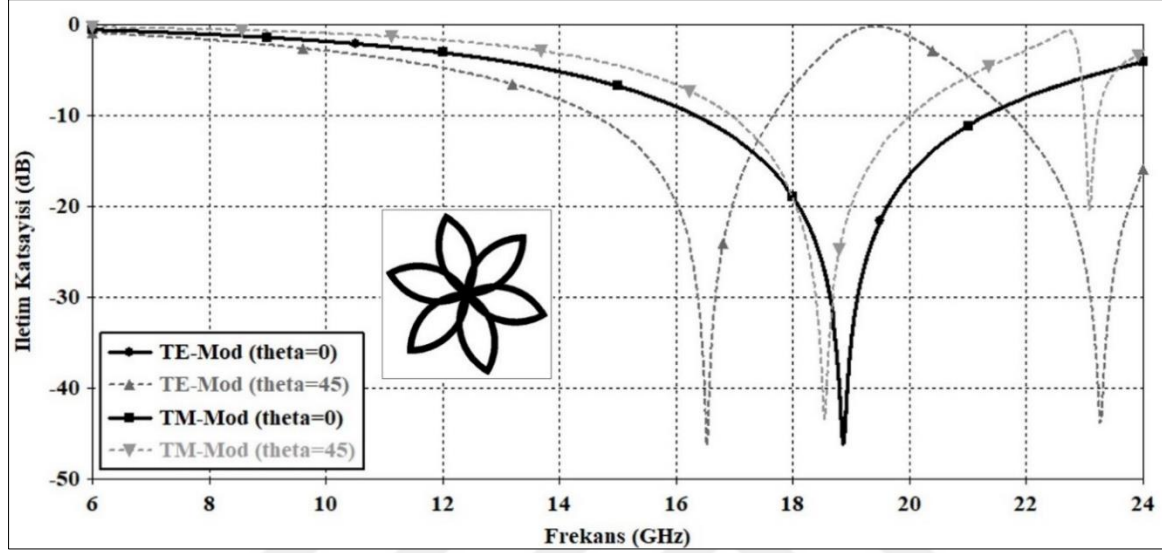
4’lü yaprak yapının yüzeyine dik gelen EM dalgaya karşı gösterdiği performans incelendiğinde rezonans frekansının TE/TM modda 14,85 GHz ve BG’sinin 5,91 GHz olduğu Şekil 3.7’den anlaşılmaktadır. EM dalga yüzey normaline 45° açıyla geldiğinde ise TE Modda rezonans frekansının 15,48 GHz olduğu ve 0,63 GHz kaydığı, TM modda ise 14,75 GHz olduğu ve 0.1 GHz saptığı görülmektedir. Bant genişlikleri ise TE ve TM modda sırasıyla 5,8 GHz ve 3,8 GHz’dir. Buradan TM modda rezonans frekansındaki bozulmanın ihmal edilebilecek kadar az olduğu ancak BG’nin 2,1 GHz kadar daraldığı; TE modda ise 0.65 GHz’lik bir bozulma meydana geldiği fakat BG’de anlamlı bir değişim olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.7. Farklı θ açıları için 4’lü yaprak FSY’nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği

Farklı θ açıları için 6’lı yaprak FSY’nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği Şekil 3.8’de verilmiştir. Grafik değerlendirildiğinde her iki modda da rezonans frekansının 18,88 GHz

ve BG'nin 5 GHz olduğu, fakat yapının θ açısı 45° iken özellikle TE modda karakteristik özellikleri tamamen bozularak 16,53 ve 23,3 GHz'de rezonance ettiği görülmektedir. Buradan 6'lı yapının eğik açılı EM dalgalara ($\theta > 0^\circ$) karşı kararlı bir yapıya sahip olmadığını söyleyebiliriz.



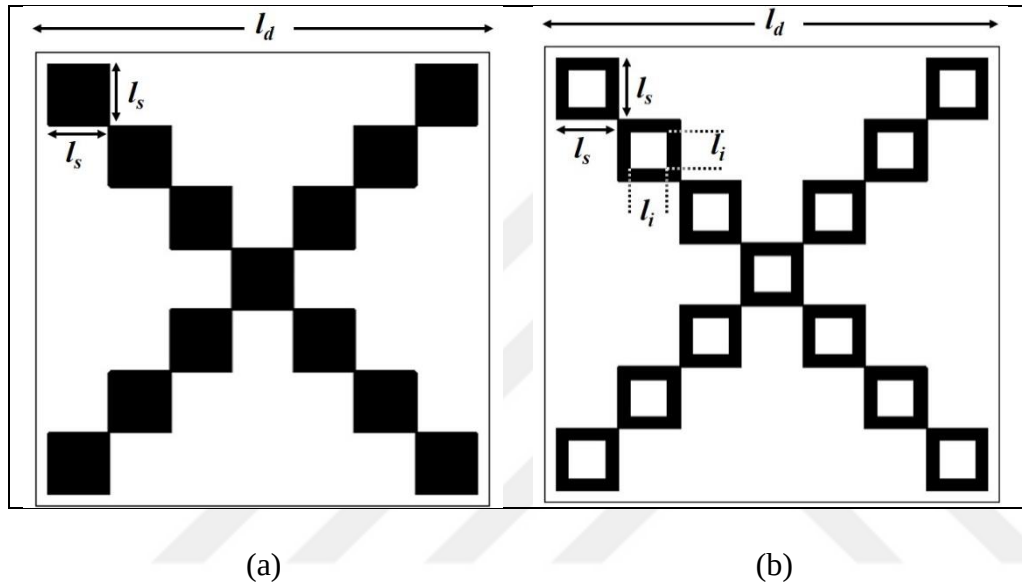
Şekil 3.8. Farklı θ açıları için 6'lı yaprak FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği

Bölüm 2.3'de FSY'lerin eşdeğer devre modelinde R ve L'nin frekans seçici iletken yamaları, C'nin ise elemanlar arasındaki boşlukları ifade ettiği belirtilmiştir. Yüksek değerli direncin rezonans frekansına olan etkisinin ihmal edilmesi ile FSY yapısının rezonans frekansı, Eş. 3.1 kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu eşitliğe göre FSY'nin birim hücre uzunluğu artırıldığında rezonans frekans (f_r) değerinin de azalması beklenmektedir. Ancak halka döngü ile kıyaslandığında 4'lü ve 6'lı yaprak yapının iletken uzunluklarının artmasına rağmen rezonans frekanslarında bir artış gözlemlenmektedir. Bu artışı şu şekilde açıklayabiliriz; birim hücrelerdeki her bir yaprak arasındaki boşluk bir kapasitif değer (C) oluşturacak ve bu kapasitanslar birbirleri ile seri bağlı olacaktır. Bu nedenle de C değeri azalacak ve rezonans frekans değeri artacaktır.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Kare yama ve kare döngü FSY yapısından yola çıkarak Şekil 3.9'da detayları verilen kare fraktal ve kare döngü fraktal FSY elemanları benzetim ortamında tasarlanmıştır. Tasarımda

dielektrik alttaş malzemenin merkezine l_s boyutlarında bir kare iletken konulmuştur. Yapının simetrikliğini sağlamak için kare iletkenin köşegenleri boyunca dört yöne eşit mesafede, her bir kare kendine komşu kare iletkene kenar ucundan temas edecek şekilde kare yamalar yerleştirilmiştir (Şekil 3.9.a). Daha sonra bu yamaların içine l_i boyutlarında kare oyuklar açılarak kare döngü fraktal yapı elde edilmiştir. Bu tasarımlara ait parametre değerleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

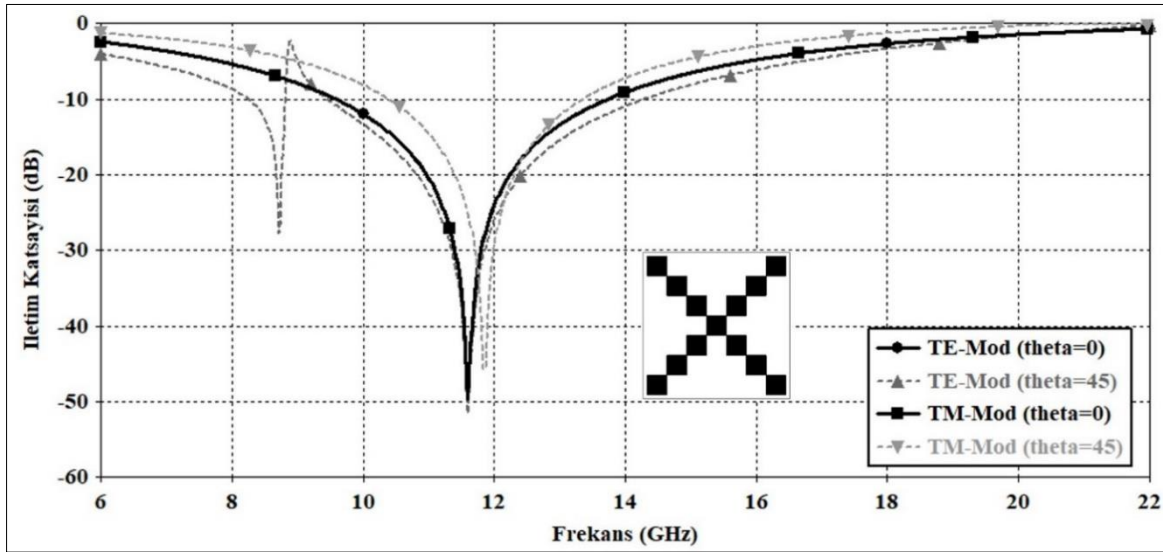


Şekil 3.9. (a) Kare fraktal ve (b) kare döngü fraktal FSY’nin birim eleman yapısı

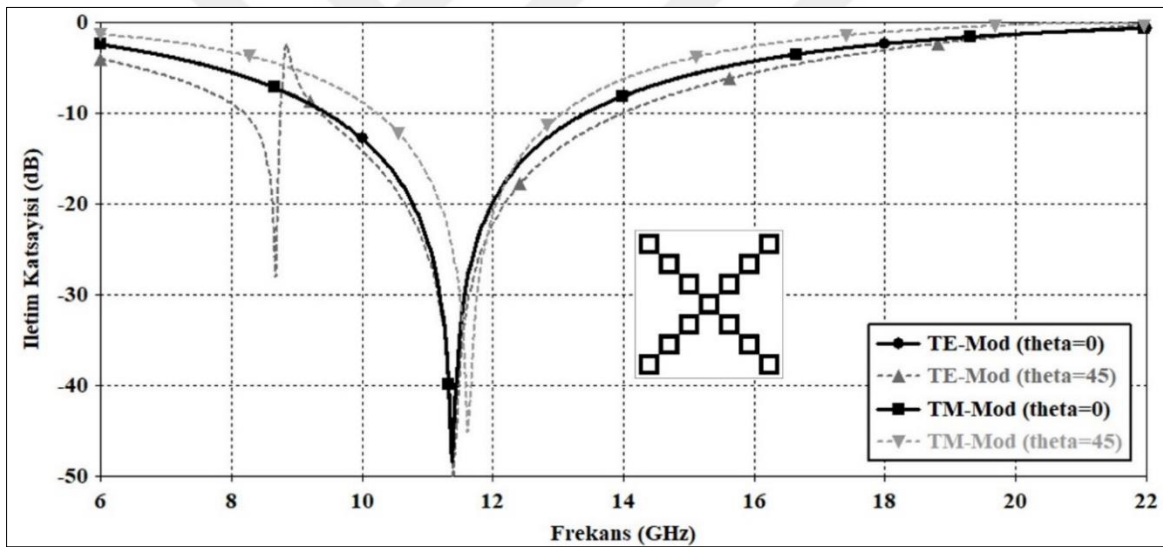
Kare fraktal FSY eleman yüzeye dik açıyla gelen EM dalgada TE ve TM modlarında 11,6 GHz’de rezonansa girmektedir. Yapının bant genişliği 4,18 GHz ve rezonans derinliği -51 dB’dir. EM dalga yüzeye 45° ’lik açıyla geldiğinde TE modda yansıma karakteristiği değişmezken 8,75 GHz’de istenmeyen bir dalgalanma meydana gelmektedir. TM modda ise rezonans frekansı 0,25 GHz kaymakta ve BG 2,97 GHz olmaktadır. Ancak kare fraktal yapının rezonans frekansı bu BG’nin içerisinde kaldığı ve -24 dB’de sönümlendiği yani gelen dalganın gücünün yaklaşık %99,7 oranında azaldığı Şekil 3.10’dan çıkarılmaktadır.

Çizelge 3.3. Kare fraktal ve kare döngü fraktal FSY’nin parametre değerleri

Parametre	l_d	l_s	l_i
	<i>mm</i>		
Değer	7,75	1,05	0,45



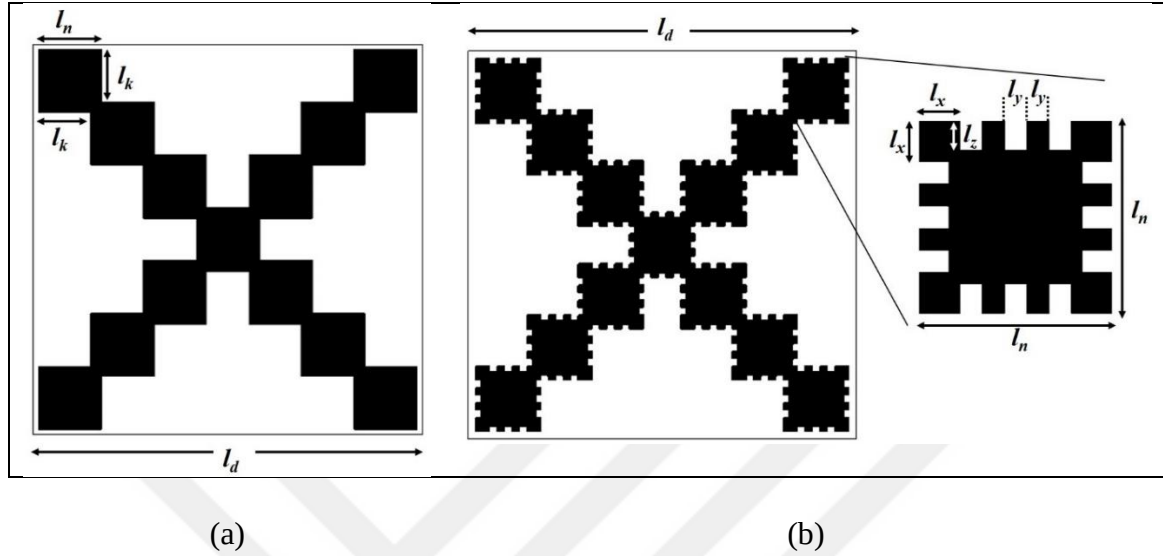
Şekil 3.10. Farklı θ açıları için kare fraktal FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği



Şekil 3.11. Farklı θ açıları için kare döngü fraktal FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği

Kare döngü fraktal FSY'nin farklı θ açılarında gelen EM dalgaya karşı TE ve TM moddaki performansı S-parametre grafiği olarak Şekil 3.11'de verilmiştir. Kare yamanın içinin boşaltılması ile $\theta=0^\circ$ 'deki rezonans frekansı 0,25 GHz azalarak 11,35 GHz'e gerilemiştir. Bant genişliği ise 0,17 GHz azalarak 4,01 GHz olmuştur. EM dalga yüzeye 45° 'lik açıyla geldiğinde ise TE modda yansıma karakteristiği değişmezken 8,70 GHz'de 0,56 GHz bant genişliğinde ve -27,7 GHz derinliğinde istenmeyen bir dalgalanma meydana gelmektedir. TM modda ise yine 0,25 GHz kayarak çok az bir bozulma meydana gelmektedir. Buradan şu sonucu çıkarabiliriz; kare fraktal yapının içinin boşaltılarak kare döngü fraktala

çevrilmesi FSY'nin birim eleman büyüklüğü değişmeden az da olsa rezonans frekansının azalmasını sağlamaktadır.



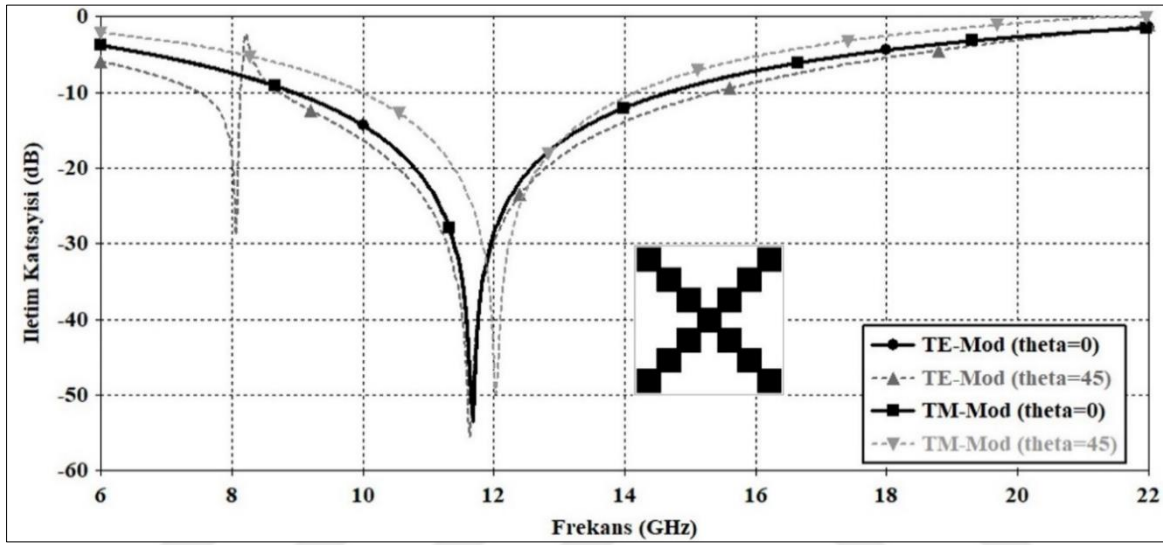
Şekil 3.12. (a) Birleşik kare fraktal ve (b) girintili birleşik kare fraktal FSY'nin birim eleman yapısı

Fraktal yapıda bir diğer tasarım ise kare yamaların kenarlarından birbirlerine l_x büyüklüğündeki küçük kare kısımlar üst üste gelecek şekilde birleştirilmesiyle oluşturulan birleşik kare fraktal FSY'dir (Şekil 3.12.a). Bu yapının karakteristik özellikleri incelendiğinde yüzeye dik gelen EM dalgaya karşı TE ve TM modda rezonans frekansı 11,67 GHz, bant genişliği ise 5,77 GHz olduğu görülmektedir. BG değeri θ açısı 45° iken TE modda 6,6 GHz'e kadar yükselmekte ve rezonans frekansı neredeyse aynı kalmaktadır; TM modda ise BG değeri 4,17 GHz olurken FSY yapısı 12,04 GHz'de tam titreşime girmektedir. Birleşik kare fraktal ile kare yama fraktal FSY yapıları karşılaştırıldığında rezonans frekanslarının neredeyse aynı olduğu, ancak yapısı sayesinde birleşik kare fraktalın BG değerinde 1,42 GHz'lik önemli bir artış meydana geldiği açıkça görülmektedir.

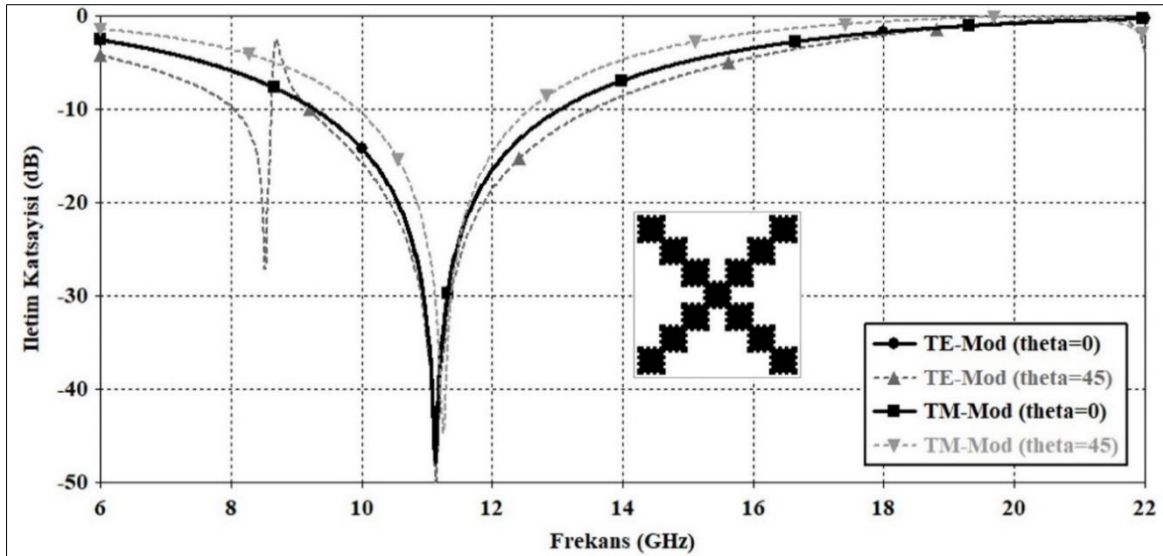
Çizelge 3.4. Birleşik kare fraktal ve girintili birleşik kare fraktal FSY'nin parametre değerleri

Parametre	l_d	l_n	l_k	l_x	l_y	l_z
	<i>mm</i>					
Değer	7,75	1,3	1,025	0,275	0,15	0,2

Birleşik kare fraktal yapıdaki karenin bir kenar uzunluğu (l_n değeri) artırıldığında rezonans frekansında azalma olması beklenmektedir. Bu uzunluğun FSY'nin birim hücre büyüklüğü değişmeden artırılması maksadıyla Şekil 3.12.b'de görüldüğü üzere kare yapının kenarlarına girintiler açılmıştır. Birleşik kare fraktal ve girintili birleşik kare fraktal FSY'nin parametre değerleri Çizelge 3.4'te, farklı θ açıları için TE ve TM moddaki S-parametre grafiği sırasıyla Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te verilmiştir.



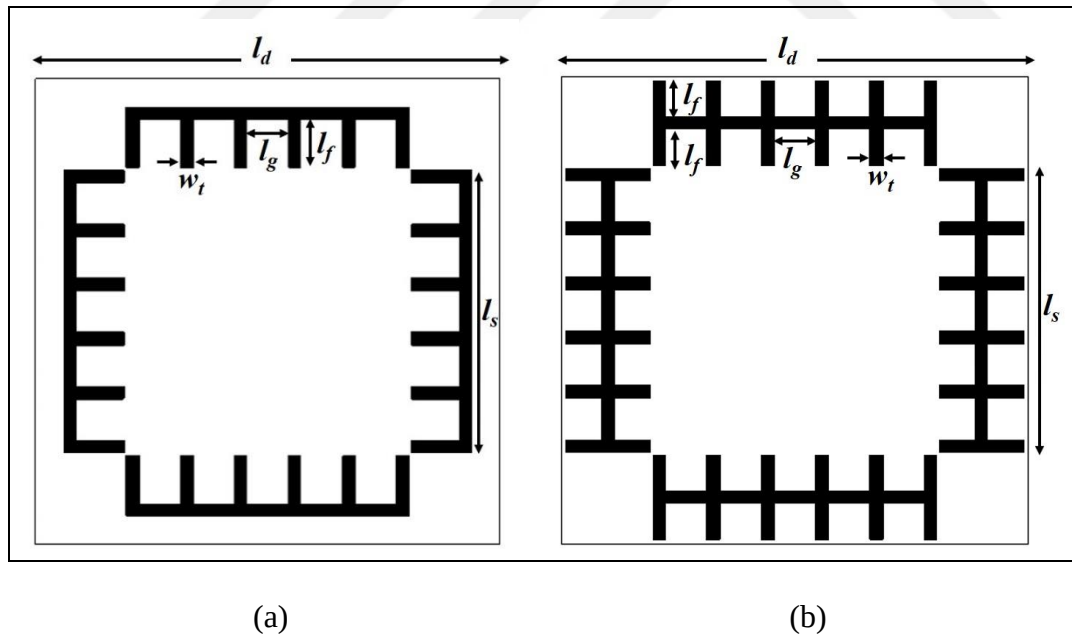
Şekil 3.13. Farklı θ açıları için birleşik kare fraktal FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği



Şekil 3.14. Farklı θ açıları için girintili birleşik kare fraktal FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği

Girintili birleşik kare fraktal FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'deki rezonans frekansının birleşik kare fraktal yapıya kıyasla 0,5 GHz azalarak 11,1 GHz olduğu ancak BG'nin 1,96 GHz daralarak 3,81 GHz'e gerilediği tespit edilmiştir. Gelen dalganın yüzey normaliyle yaptığı açı $\theta=45^\circ$ olduğunda ise TE modda rezonans frekansı değişmezken BG'si 0,54 GHz artmaktadır. TM modda ise rezonans frekansı 0,1 GHz kayarak 11,2 GHz olmuş ancak BG değeri $\theta=0^\circ$ 'deki BG değerinin içinde kalmıştır. Girintili yapıyla rezonans frekans değeri düşürülürken, aynı zamanda eğik açılarla gelen EM dalgalara karşı daha kararlı bir karakteristik özellik elde edildiği, fakat bant genişliğinin önemli miktarda daraldığı açıkça görülmektedir.

Kare döngü FSY'nin iletken yapısı dielektrik malzeme kenarına paralel olarak ilerlemektedir. Bu kare iletken levhayı dik kesen iletkenler eklediğimizde FSY'nin nasıl tepki vereceğini anlamak için benzetim ortamında tırmık şeklide bir yapı tasarlanmıştır. Şekil 3.15.a'da detayları sunulan yapıda dielektrik alttaşın kenarlarına paralel olacak şekilde, birbirinden bağımsız l_s uzunluğunda dört iletken levha ve bu iletken levhaları dik kesen eşit aralıklarla (l_g) sıralanmış l_f uzunluğunda altı kısa iletken çubuk konulmuştur.



Şekil 3.15. (a) Tek yönlü tırmık ve (b) çift yönlü tırmık FSY'nin birim eleman yapısı

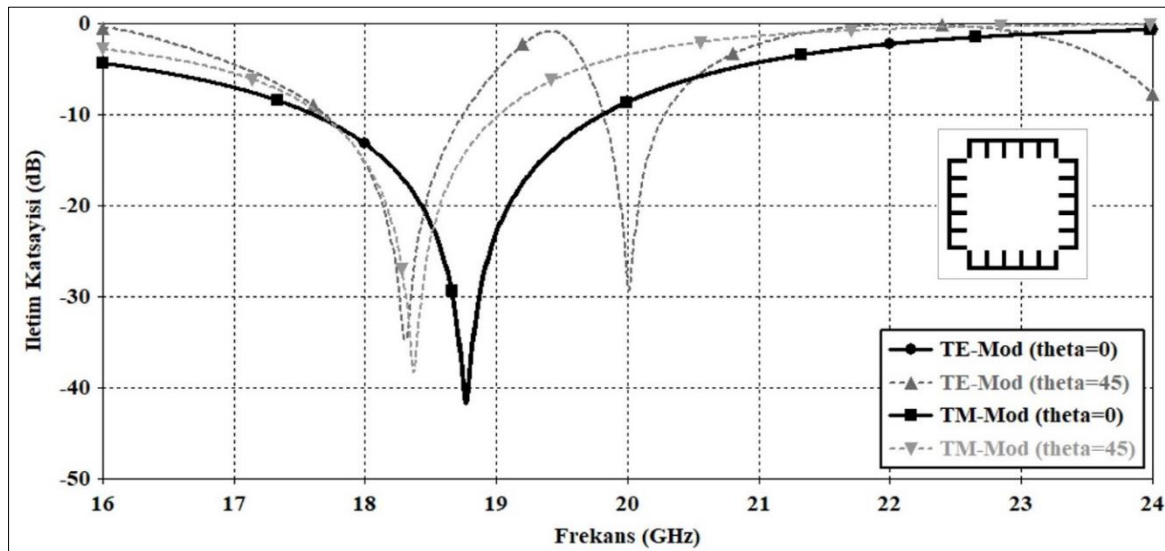
Tek yönlü tırmık FSY yapısının farklı θ açılarında sergilediği karakteristik özelliklerin eğrisi şekli 3.16'da sunulmuştur. Yapının yüzeyine dik gelen EM dalgaya karşı gösterdiği performans incelendiğinde rezonans frekansının TE/TM modda 18,77 GHz ve BG'sinin 2,24 GHz olduğu görülmektedir. Ancak EM dalga yüzeye 45° 'lik bir açıyla geldiğinde her iki

modda da rezonans frekansı yaklaşık 0,45 GHz kayarak bozulmakta, TE modda 20 GHz’de -30 dB derinliğinde istenmeyen bir dalga oluşmaktadır. Bu durumdan tek yönlü tırmık FSY yapısının θ değeri arttıkça karakteristik özelliklerinin bozulacağı, kararsız bir yapıya sahip olacağı anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.5. Tek yönlü ve çift yönlü tırmık FSY’nin parametre değerleri

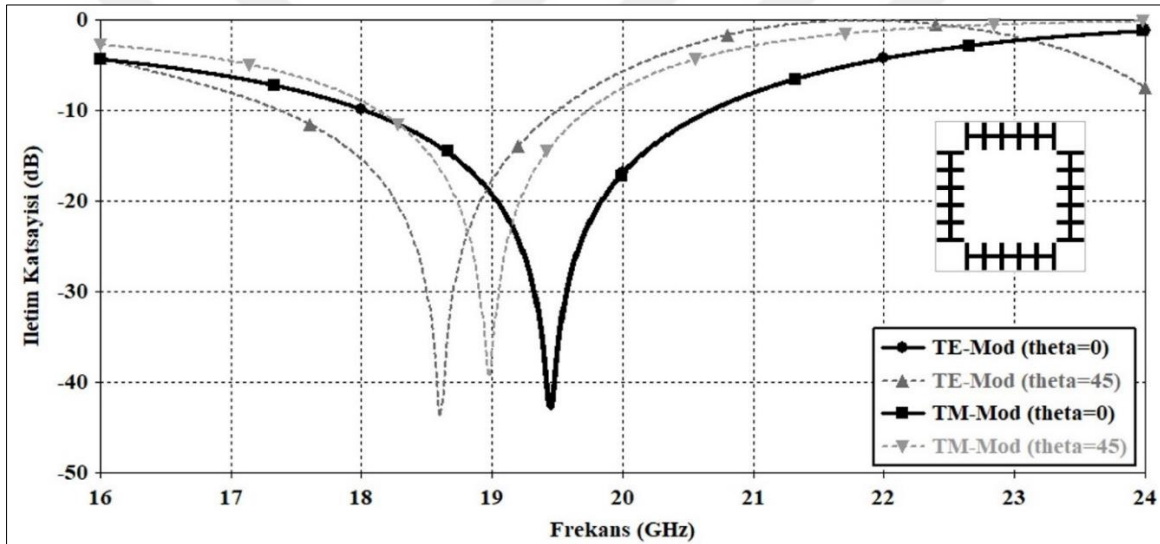
Parametre	l_d	l_g	l_f	l_s	w_t
	mm				
Değer	7,75	0,7	0,8	4,7	0,2

Bilindiği üzere FSY’ler periyodik ve kendi içerisinde simetrik elemanlardan oluştuğunda eğik açılarda gelen EM dalgalara karşı gösterdiği performans artmaktadır. Bundan dolayı tek taraflı tırmık FSY’nin dört yöne olan simetrikliğini tam olarak sağlamak maksadıyla merkeze doğru bakan kısa iletkenler dizisi uzun iletken çubukların dışa bakan taraflarına da yerleştirilmiştir. Elde edilen çift yönlü tırmık FSY’nin 0° ve 45° ’de TE ve TM moddaki S-parametre grafiği Şekil 3.17’de sunulmuştur. Tek yönlü ve çift yönlü tırmık FSY’nin parametre değerleri Çizelge 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.16. Farklı θ açıları için tek yönlü tırmık FSY’nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği

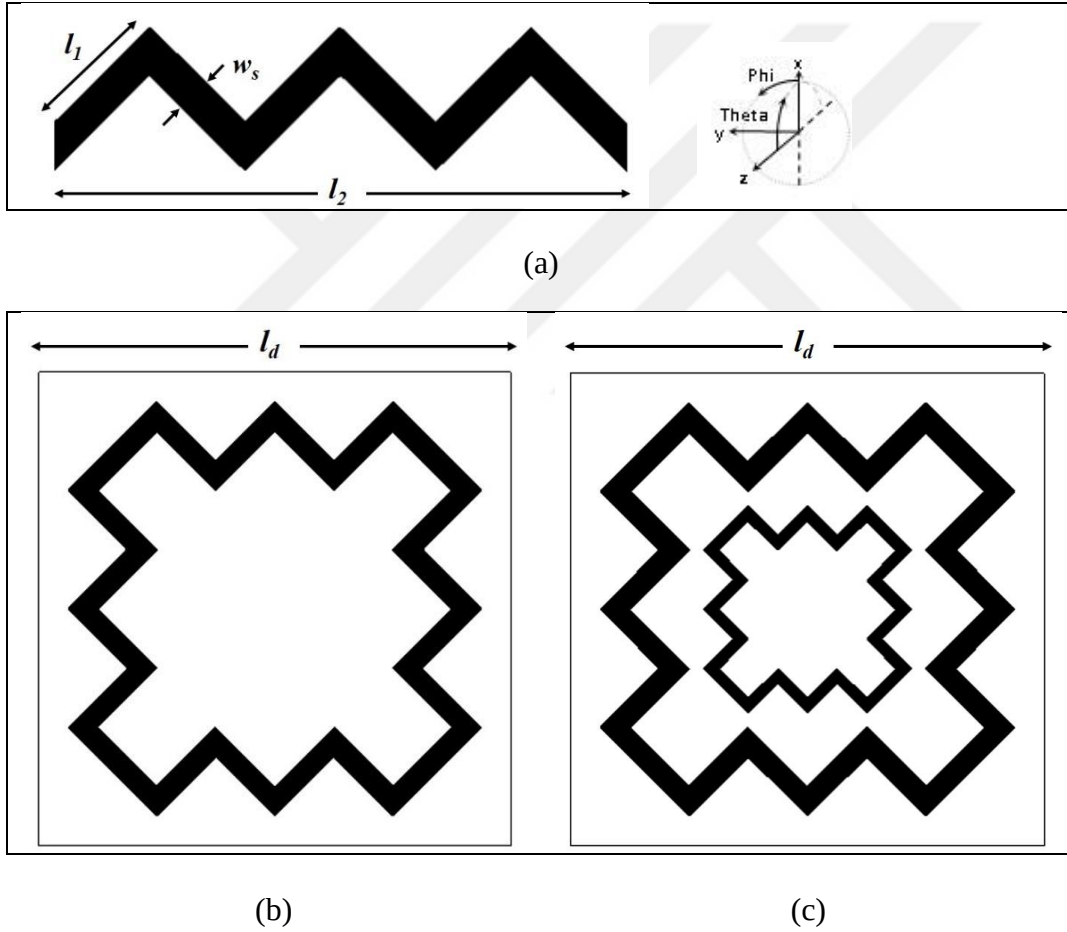
Çift yönlü tırmık FSY’de, gelen dalganın yüzey normali ile yaptığı açı 0° iken rezonans frekansı 19,45 GHz’dir. Tek yönlü yapı ile karşılaştırıldığında frekans değerinin 0,68 GHz yükseldiği görülmektedir. Bu yükselmenin kısa iletken çubuklar arasında meydana gelen seri kapasitif etkiden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Tıpkı beklenildiği gibi simetrikliğin artmasıyla birlikte eğik açılarda TE ve TM modda, rezonans frekansı bir miktar kaysa da, tek yönlü yapıya kıyasla kararlılık miktarı artmaktadır. FSY, TE ve TM modda sırasıyla 18,62 ve 18,97 GHz’de rezonans olmakta, asıl rezonans frekansı 45° ’de -10 dB’deki BG değerinin içerisinde kalmaktadır. Ancak bu durum yapının tam kararlı olduğu anlamına gelmemektedir. Burada gösterilmek istenen yapının simetrikliğinin artırılması ile kararlılık düzeyinin iyileştirilebileceğidir.



Şekil 3.17. Farklı θ açıları için çift yönlü tırmık FSY’nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği

Benzetim ortamında tasarımı gerçekleştirilen tek bantlı bir diğer yapı testere dişi FSY’dır. Şekil 3.18.a’da görüldüğü üzere yapının en küçük kesiti üç dişli bir testereyi andırmaktadır. Tasarımın ilk adımında bu kesit dielektrik tabaka üzerine merkezden belirli bir uzaklıkta yerleştirilmiştir. İkinci adımda testere dişi kesiti merkeze göre eşit mesafede ve simetrik olarak 90° döndürülerek yeni bir kesit daha oluşturulmuş ve bu adım iki kez daha tekrarlanmıştır. Son adımda ise elde edilen dört yöne simetrik testere dişi kesitler birleştirilerek Şekil 3.18.b’deki döngü bir FSY yapısı elde edilmiştir.

Testere dişi FSY'nin parametre değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Tıpkı yukarıda anlatılan diğer tek bantlı FSY'ler gibi testere dişi yapısının da farklı açılarda gelen düzlemsel dalgaya karşı sergilediği performans analiz edilmiştir. Buna göre yüzeye dik açıyla gelen EM dalga testere dişi iletken yapıyı en yoğun 11,9 GHz'de titreşime sokmaktadır. Testere dişi yapı bant durduran filtre karakteristiğini 3,12 GHz'lik bir bant genişliğinde göstermektedir. Şekil 3.19'da görüldüğü üzere θ değeri 45° olduğunda TE modda rezonans frekansı 0,3 GHz kaymakta, BG 3,21 GHz olmaktadır. TM modda ise f_r değişmezken BG 1,1 GHz daralarak 2,11 GHz olmaktadır. Genel itibariyle bakıldığında yapının eğik açılarda rezonans frekansının BG aralığında olduğu ve açısal kararlılığın yüksek olduğu söylenebilir.

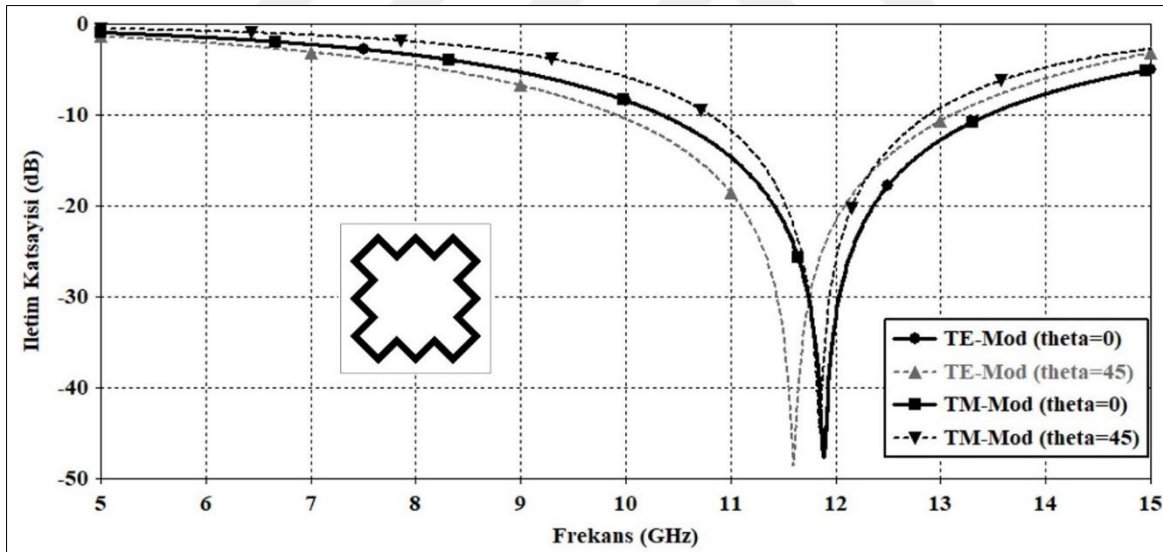


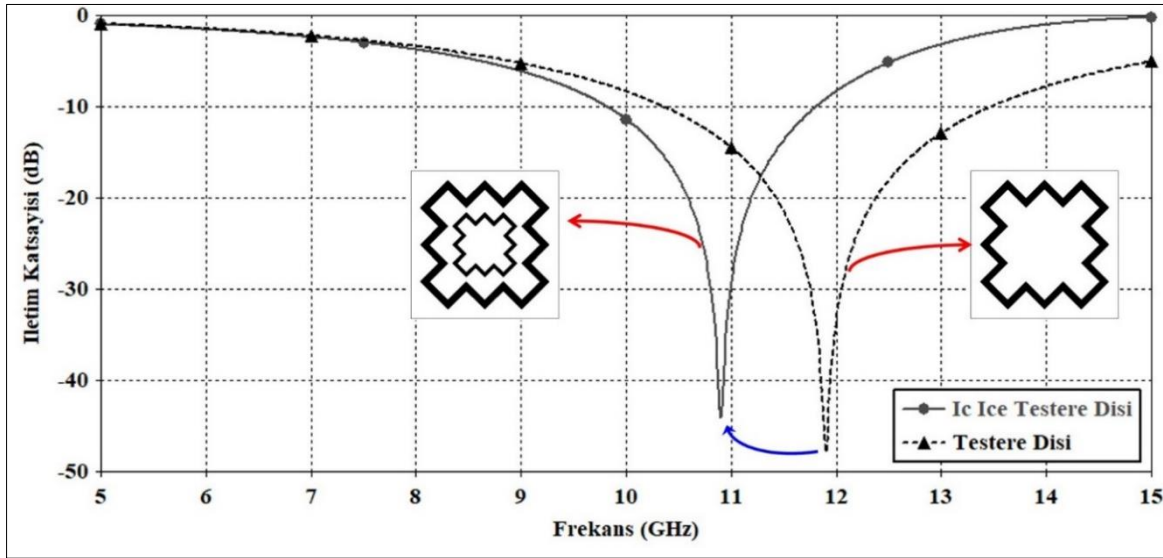
Şekil 3.18. (a) Testere dişi modelinin en küçük kesiti (b) testere dişi ve (c) iç içe testere dişi FSY'nin birim eleman yapısı

Çizelge 3.6. Testere dişi ve iç içe testere dişi FSY'nin parametre değerleri

Parametre	l_d	l_1	l_2	w_t	Ölçek çarpanı (sf)
	mm				
Değer	7,75	1,41	7	0,3	0,5

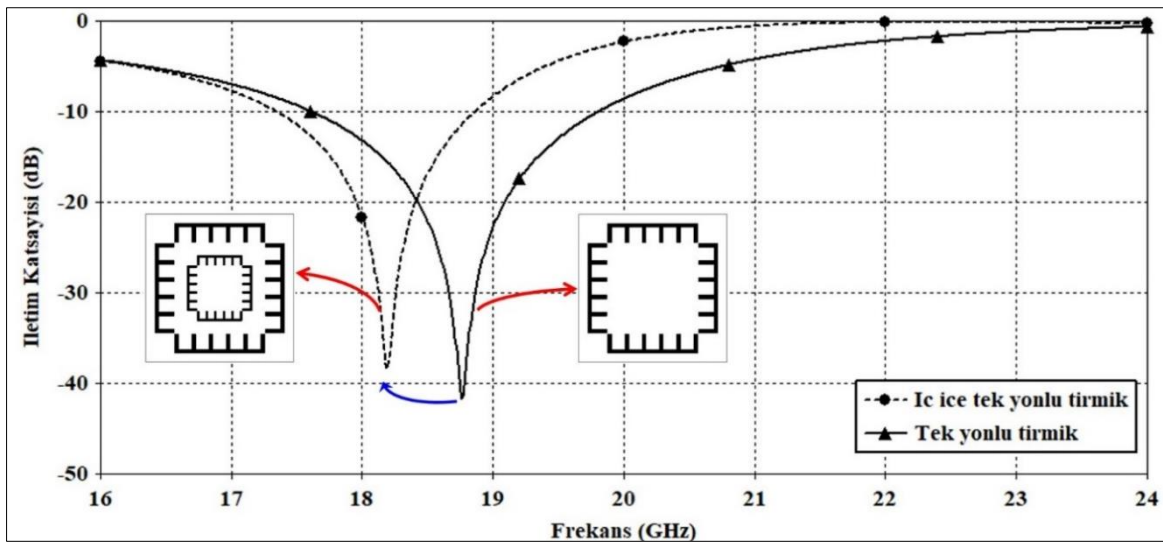
Bant genişliği ve açısal kararlılığı iyi seviyede olan testere dişi FSY'nin yapısal büyüklüğünü değiştirmeden rezonans frekansını azaltmak için indüktif ve/veya kapasitif değerinin artırılması gerekmektedir. Bu maksatla testere dişi iletkenin belirli bir oranda küçültülmüş (ölçeklendirilmiş) hali, yapının iç kısmına yerleştirilmiştir. Buradaki küçültme miktarı ölçek çarpanı (scale factor – sf) olarak adlandırılmaktadır. Oluşturulan yeni durumda içteki ve dıştaki iki yapı arasındaki boşluk miktarı, ilave bir kapasitif etki yaratacağından f_r değerinin düşmesi beklenmektedir. İç içe (nested) testere dişi olarak adlandırılan bu yeni FSY'nin birim eleman yapısı Şekil 3.18.c'de sunulmuştur.

Şekil 3.19. Farklı θ açıları için testere dişi FSY'nin TE ve TM moddaki S-parametre grafiği



Şekil 3.20. Testere dişi ve iç içe testere dişi FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE moddaki S-parametre grafiği

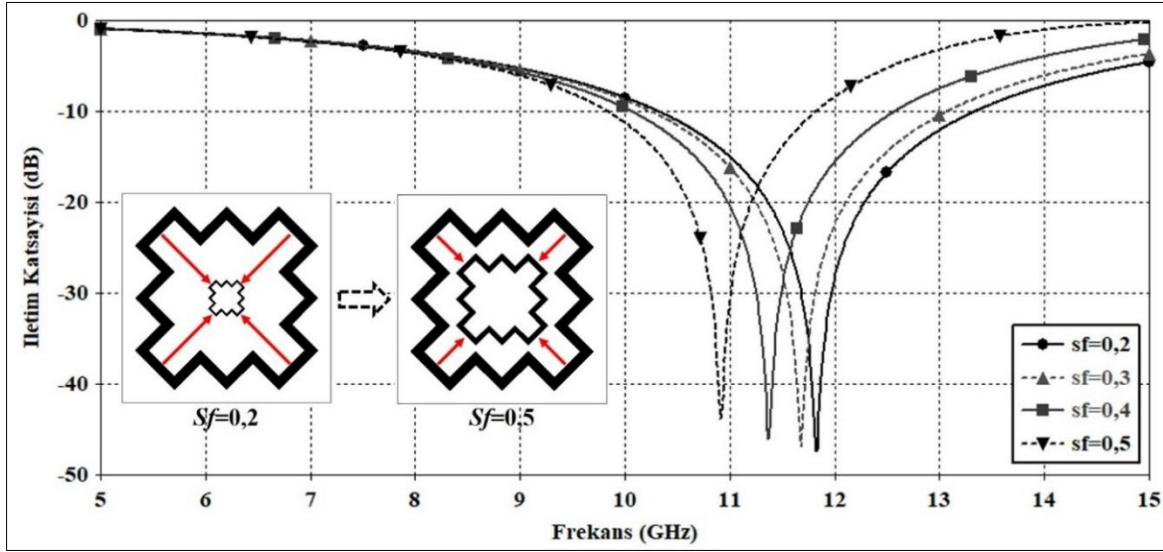
Şekil 3.20'den anlaşılacağı üzere testere dişi yapısının rezonans frekansı, yapının iç kısmına sf değeriyle ölçeklendirilmiş ilave bir iletken yapı eklenmesiyle, 1 GHz azalarak 11,9 GHz'den 10,9 GHz'e düşmüştür. Normal şartlar altında rezonans frekansının azalması için FSY'nin birim hücre boyutunun büyütülmesi ve iletken boyunun uzatılması gerekmektedir. İç içe yapı sayesinde testere dişi FSY'nin yapısal büyüklüğü değiştirilmeden rezonans frekansında %8,4'lük bir iyileşme/azalma elde edilmiştir.



Şekil 3.21. Tek yönlü tırmık ve iç içe tek yönlü tırmık FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE moddaki S-parametre grafiği

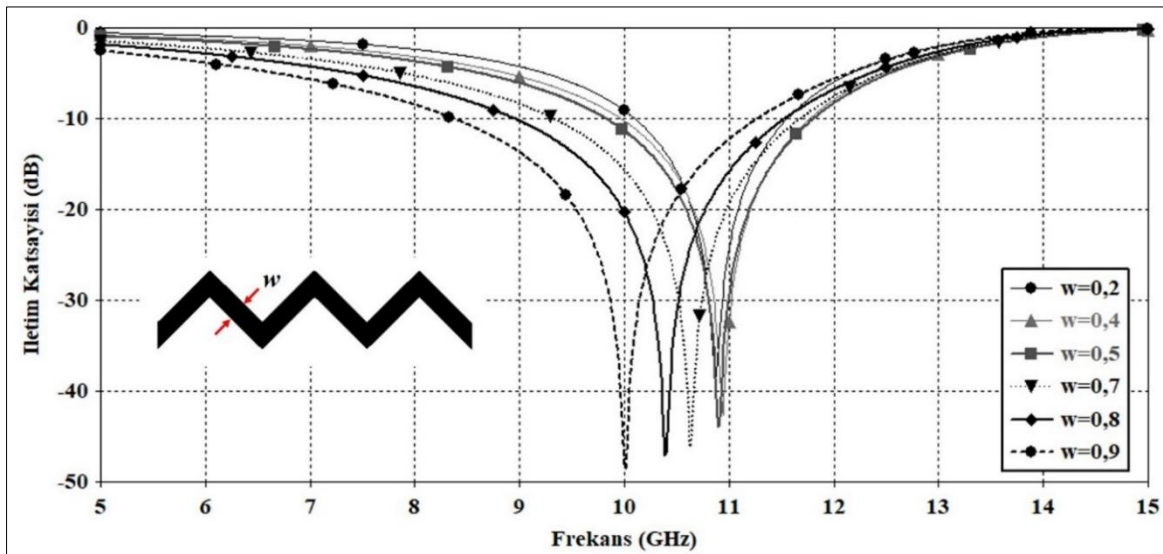
İletken elemanların ölçeklendirilmek suretiyle iç içe dizilmesinin rezonans frekansında azalmaya neden olduğu Şekil 3.20'deki iç içe testere dişi FSY'den anlaşılmaktadır. İç içe yerleştirme durumu sadece tek bir yapı üzerinde mi değişikliğe sebep olmakta, yoksa benzer yapıların rezonans frekansında da değişikliğe neden olur mu sorusunun yanıtı aramak için tek yönlü tırmık yapısında ölçeklendirme işlemi uygulanmıştır. Tıpkı testere dişi FSY'de olduğu gibi, tek yönlü tırmık yapısının iç kısmına sf değeriyle ölçeklendirilmiş iletken yapı eklenmiştir. Şekil 3.21'de s-parametre grafikleri karşılaştırılan tek yönlü ve iç içe tek yönlü tırmık yapıların rezonans frekansının sırasıyla 18,77 GHz'den 18,19 GHz'e gerilediği, atenüasyon değerinin ise -42 dB'den -38,4 dB'ye çıktığı görülmektedir. Bu sonuçlara bakarak iç içe yapıların rezonans frekansının tekli çerçeve yapılara nazaran daha az ve iletim katsayılarının ise daha fazla olduğu söylenebilir.

Dış iletken yapı boyutunun belirli bir oranda ölçeklendirerek küçültülmesi sadece xy düzlemi boyunca yapılmakta, z eksenindeki boyutta herhangi bir değişim yapılmamaktadır. Burada uygulanan ölçeklendirme, boyutun ölçek çarpanı değeri ile çarpılması sonucunda bulunmaktadır. Örneğin tek yönlü tırmık iletkenin uzunluğu (l_s) 4,7 mm iken 0,5 ölçek çarpanı ile ölçeklendirildiğinde içteki yapının uzunluğu %50 oranında küçültülerek 2,35 mm, sf değeri 0,2 iken %80 oranında küçültülerek 0,94 mm olmaktadır. Ölçek çarpanı (sf) parametresinin iç içe testere dişi FSY üzerindeki etkisini gösteren S-parametre grafiği Şekil 3.22'de verilmiştir. Buna göre sf değeri arttığında FSY'nin rezonans frekansı ters orantılı olarak azalmaktadır. Değer 0,2'den 0,5'e 0,1 aralıklarla artırıldığında iç içe testere dişi yapısının rezonans frekansı sırasıyla 11,82 GHz, 11,68 GHz, 11,37 GHz ve 10,90 GHz, atenüasyon değeri -47,45 dB, -46,9 dB, -46,1 dB, -44,4 dB olmaktadır. Bu durumdan, daha önce elde edilen "iç içe yapıların rezonans frekansının tekli çerçeve yapılara nazaran daha düşük ve iletim katsayısının ise daha yüksek olduğu" sonucu doğrulanmaktadır. sf değeri 0,6 olduğunda dış iletken yapı ile iç iletken yapı birbirine çok yakınlaşmakta, en yakın mesafe 0,07 mm'ye kadar düşmektedir. Elemanlar arasındaki mesafe rezonans frekansının dalga boyuna göre çok çok küçük olduğundan ($0,07 < \lambda_{fr}$) iç içe testere dişi FSY'nin karakteristik özellikleri tamamen bozulmaktadır.

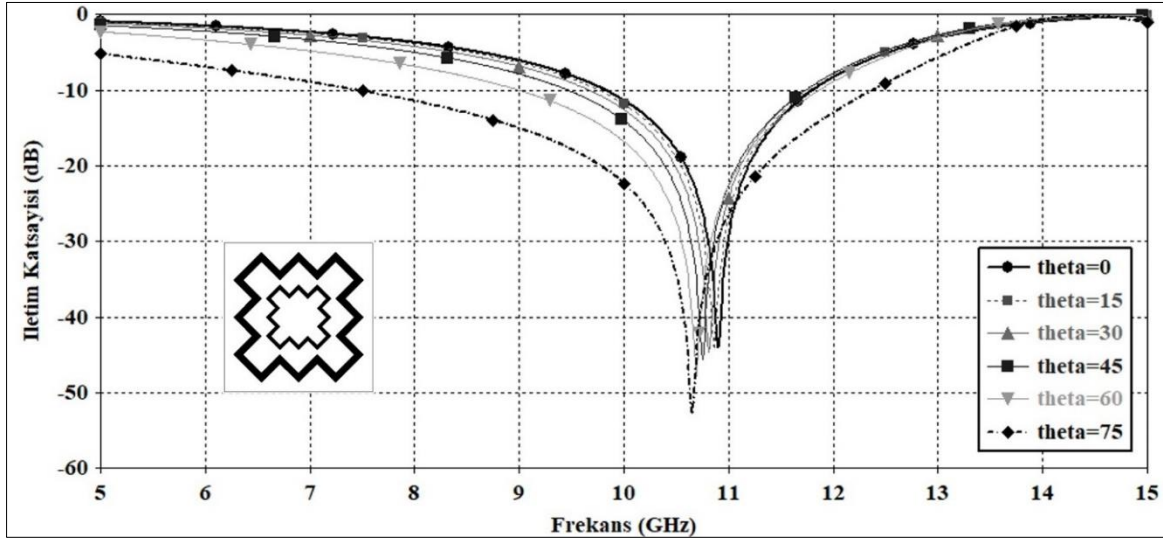


Şekil 3.22. Ölçek çarpanı (sf) parametresinin iç içe testere dişi FSY üzerindeki etkisini gösteren TE moddaki S-parametre grafiği

Bölüm 2’de bahsedildiği üzere FSY’in performansını etkileyen temel faktörlerden birisi iletken elemanlardır. Bundan dolayı iç içe testere dişi yapısında analiz edilen bir diğer parametre iletken genişliğidir (w). Şekil 3.23’te verilen TE moddaki frekans eğrisi incelendiğinde, rezonans frekansının w parametresiyle ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Parametre değeri 0,2 mm’den 0,9 mm’ye arttığında sırasıyla f_r değeri 10,95 GHz’den 10 GHz’e ve atenuasyon değeri -42,7 dB’den -48,5 dB’ye düşmekte, bant genişliği ise 1,8 GHz’den 2,9 GHz’e artmaktadır.

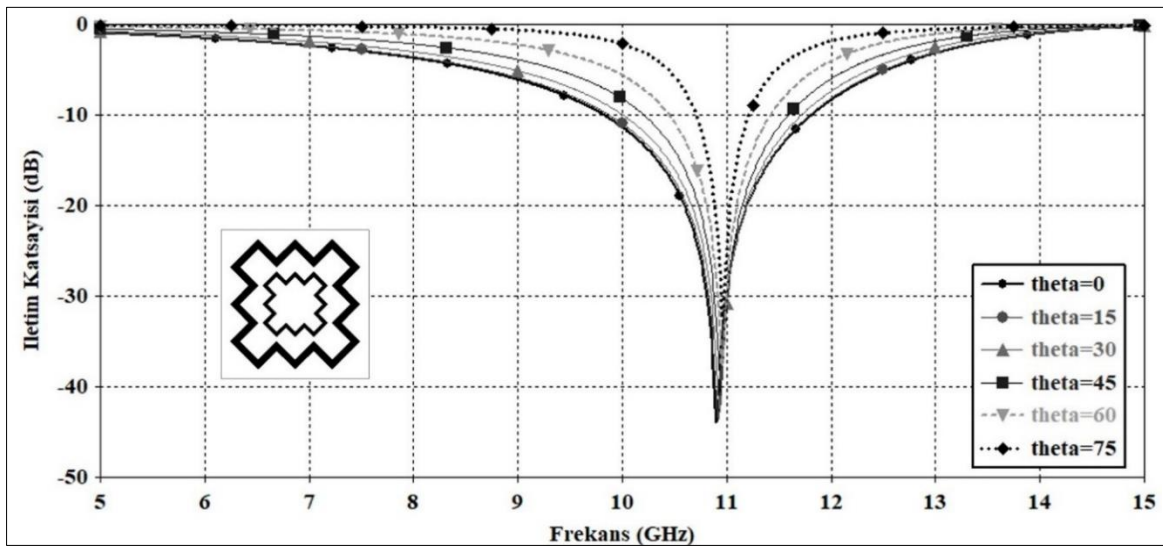


Şekil 3.23. İletken genişliği (w) parametresinin iç içe testere dişi FSY üzerindeki etkisinin gösteren TE moddaki S-parametre grafiği

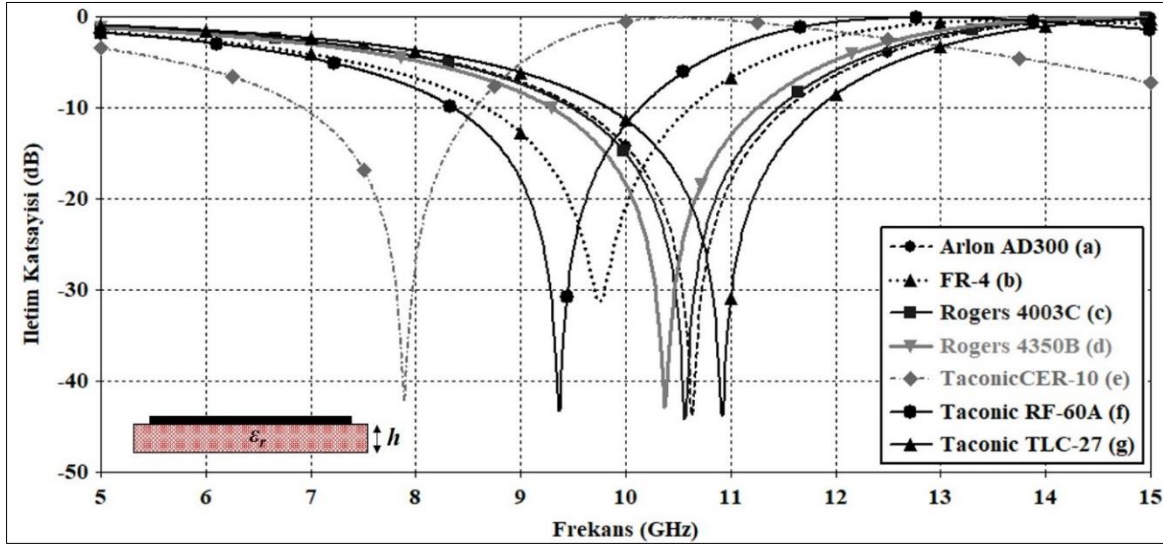


Şekil 3.24. Farklı θ açıları için iç içe testere dişi FSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği

İç içe testere dişi FSY yapısının farklı θ açılarında sergilediği karakteristik özelliklerin eğrisi şekli 3.24'te sunulmuştur. Yapının; yüzeyine gelen EM dalgaya karşı gösterdiği performans incelendiğinde θ değeri arttıkça rezonans frekansının azaldığı, ancak BG değerinin arttığı görülmektedir. θ değeri 0° , 30° , 45° , 60° ve 75° iken rezonans frekansı sırasıyla 10,9 GHz, 10,8 GHz, 10,75 GHz, 10,7 GHz ve 10,65 GHz'dir; bant genişliği ise sırasıyla 2 GHz, 2,1 GHz, 2,3 GHz, 2,9 GHz ve 4,9 GHz'dir. Rezonans frekansının $\theta = 75^\circ$ 'de %2,2 oranında (0,25 GHz) bozulduğu, ancak bozulan rezonans frekansının iletim katsayısı -10 dB baz alındığında 7,55-12,45 GHz aralığındaki çalışma frekansı içerisinde kaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.25. Farklı θ açıları için iç içe testere dişi FSY'nin TM moddaki S-parametre grafiği



Şekil 3.26. Dielektrik alttaş malzemenin iç içe testere dişi FSY üzerindeki etkisinin gösteren TE moddaki S-parametre grafiği

İç içe testere dişi FSY yapısının farklı θ açıları için TM moddaki bant durduran filtre karakteristiği incelendiğinde (Şekil 3.25), TE moddakinin aksine, rezonans frekansının değişmediği ancak BG'sinin θ değeri arttıkça daraldığı görülmektedir. FSY θ değeri 0° iken 10,9 GHz'de rezonans olurken, 75° 'de 10,94 GHz'de rezonansa girmektedir. Yapının bant genişliği ise θ değeri 0° , 30° , 45° , 60° ve 75° iken sırasıyla 2 GHz, 1,72 GHz, 1,38 GHz, 1 GHz ve 0,7 GHz olmaktadır. Rezonans frekansındaki bozulmanın (RFB) %0,3 gibi önemsenmeyecek kadar küçük oranda olması nedeniyle BG'deki bu daralma yapının karakteristik özelliklerini değiştirmemekte, rezonans frekansı 10,6-11,3 GHz aralığındaki çalışma frekansı içerisinde kalmaktadır. Sonuç olarak farklı θ açılarında gelen EM dalgaya karşı iç içe testere dişi FSY'nin göstermiş olduğu performans önemli ölçüde değişmezken açısal kararlılığın yüksek olduğu söylenebilir.

FSY'lerin birim elemanları, uygulanabilirliği kolaylaştırmak ve sağlamlığı artırmak amacıyla genellikle bir dielektrik yüzey üzerine yerleştirilmektedir. Kullanılan alttaş malzemenin dielektrik sabiti (ϵ) ve kalınlığı (h) gibi parametreleri FSY'nin iletim ve yansımada karakteristikleri üzerinde oldukça etkilidir. Bu durumun etkisini incelemek amacıyla iç içe testere dişi FSY'nin iletken yapısı, sık kullanılan dielektrik alttaş malzemelerin üzerine yerleştirilerek benzetim ortamında test edilmiştir. Kullanılan dielektrik malzemelerin kalınlığı (h) ve dielektrik sabiti (ϵ) sırasıyla (h , ϵ), a-(0.381, 3); b-(0.36, 4.3); c-(0.305, 3.38); d (0.338, 3.48); e (0.28, 10.1); f (0.25, 6.15); g (0.37, 2.75)'dir. Şekil 3.26'da verilen s-

parametre sonuçları değerlendirildiğinde, kalınlıkları birbirine yakın olan malzemelerin dielektrik sabiti arttıkça FSY'nin rezonans frekansının azaldığı görülmektedir. Örneğin ϵ değeri en düşük olan Taconic TLC-27 kullanıldığında FSY 10,95 GHz'de rezonansa girerken, FR-4'te FSY'nin rezonans frekansı 9,75 GHz'de, Taconic CER-10'da 7,90 GHz'de meydana gelmektedir. Bant genişliği ise neredeyse tüm kullanılan alttaşlarda 2 GHz büyüklüğünde olmakta, kayda değer bir değişim gözlemlenmemektedir.

Çizelge 3.7. Tek bantlı FSY tasarımlarına ait analiz sonuçları

Tek bantlı FSY	TE/TM			TE				TM			
	0°			45°							
	f _r	BG	AD	f _r	BG	AD	RFB	f _r	BG	AD	RFB
	GHz		-dB	GHz		-dB	%	GHz		-dB	%
Kare	9,9	3,56	-52,6	10,1	3,83	-52,6	2,02	10,2	2,51	47,9	3,01
Halka	13,57	3,65	-50	13,56	3,65	-50,8	0,007	13,8	2,41	-47,2	1,69
4’lü yaprak	14,85	5,91	-50,8	15,48	5,80	-50,2	4,24	14,75	3,80	-47,3	0,67
6’lı yaprak	18,88	5	-46,6	16,53	3,12	-46,9	12,44	18,53	3	-43,9	1,85
Kare fraktal	11,6	4,18	-51,6	11,6	4,82	-51,6	0	11,85	2,98	-50	2,1
Kare döngü fraktal	11,35	4,01	-48,9	11,35	4,69	-50,8	0	11,64	2,97	-46	2,55
Birleşik KF	11,67	5,77	-53	11,65	6,6	-55,5	0,1	12,04	4,17	-45,8	3,17
Girintili birleşik KF	11,1	3,81	-47,9	11,1	4,35	-50	0	11,25	2,73	-44,9	1,35
Tek yönlü Tırmık	18,77	2,24	-42	18,3	1,05	-35,1	2,5	18,38	1,33	-38,5	1,86
Çift yönlü tırmık	19,45	2,68	-43,4	18,62	2,13	-44	4,26	18,97	1,64	-39,4	2,46
Testere dişi	11,90	3,12	-47,8	11,60	3,21	-48,5	2,52	11,90	2,10	-44,7	0
İç içe testere dişi	10,90	2	-44,4	10,90	1,4	-41	0	10,75	2,35	-45,5	1,37

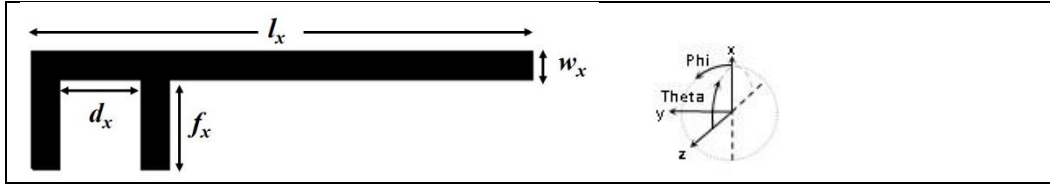
Bu bölümde tek bir rezonans frekansında bant durduran filtre özelliği gösteren 10 farklı tasarım benzetim ortamında analiz edilmiştir. Her tasarımın birbirinden farklı üstünlükleri ve zayıf noktaları bulunmaktadır. Tek bantlı FSY tasarımlarına ait elde edilen analiz sonuçları Çizelge 3.7’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Çizelgede f_r , rezonans frekansını; BG, bant genişliğini; AD, rezonans frekansının atenuasyon değerini (iletim katsayısını); RFB, eğik açılarda gelen EM dalgaya karşı rezonans frekansındaki bozulma miktarının yüzdesini ifade etmektedir. Tasarımlar arasında f_r değeri en düşük yapı iç içe testere dişi FSY’dır. Bant genişliği bakımından değerlendirildiğinde en yüksek BG değeri $\theta=0^\circ$ ’de 4’lü yaprak yapıdadır. Ancak θ açısındaki artış dikkate alındığında 4’lü yaprak FSY’ye ait açısallık kararlılığın birleşik kare fraktal (KF) FSY’ye kıyasla daha düşük olması nedeniyle BG açısından en iyi yapı birleşik kare fraktal yapı olarak görülmektedir. EM dalga yüzeye 45° ’lik açıyla geldiğinde TE modda açısallık kararlılığı en iyi (RFB’si en düşük) tek bantlı FSY kare fraktal yapılar, TM modda ise testere dişi yapı olarak görülmektedir. Rezonans frekansında bant durdurma performansı en iyi olan, gelen dalgayı en az geçiren FSY birleşik kare fraktaldır.

Tek bantlı FSY tasarımlarından birisi olan iç içe testere dişi yapısı incelendiğinde 10-12 GHz frekans bandını filtreleyen, TE ve TM dalga modlarında 0° ila 75° derece arasında gelen eğik EM dalgalarına karşı gösterdiği tepki kararlı olan bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu kapsamda X-Bant uydu haberleşme sistemlerindeki girişim etkisini azaltmak amacıyla kullanılabileceği değerlendirilmiştir [55].

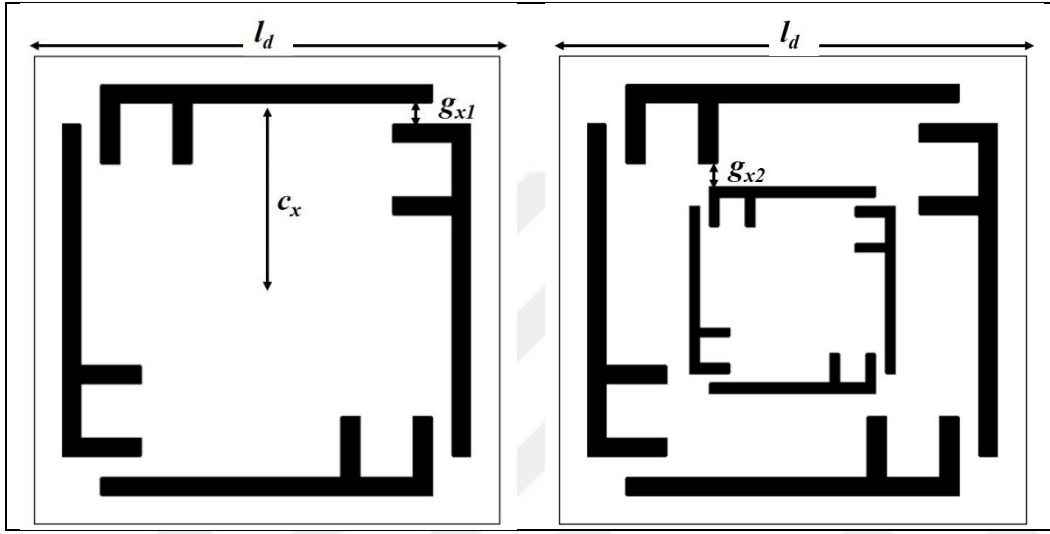
3.2. Antipodal F-Tipi FSY (AFTFSY) Tasarımı ve Analizleri

Bölüm 3.1’de tasarlanan tek bantlı yapılar ile FSY’lerin; modellemesinin nasıl yapıldığı, analizlerinde hangi grafiklerin kullanıldığı, analizleri sonucunda hangi karakteristik özellikleri sergiledikleri ve bu özelliklerin grafikler üzerinden nasıl okunduğu, rezonans elemanlarına ait parametrelerin ve kullanılan dielektrik malzemelerin FSY’nin performansı üzerindeki etkilerinin neler olduğu konusunda etkili ve verimli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen bilgi birikimi ışığında bu tez çalışmasının temel birim elemanı olan, özgün bir yapıya sahip FSY tasarımına başlanmıştır.

3.2.1. Tek ve çift bant F-tipi FSY'nin tasarım aşamaları



(a)



(b)

(c)

Şekil 3.27. İç içe F-tipi FSY'nin tasarım aşamaları; (a) F-tipi FSY modelinin temel rezonans elemanı (FTR), (b) F-tipi ve (c) iç içe F-tipi FSY'nin birim eleman yapısı

Tez çalışmasının geri kalan bölümünde özgün bir FSY tasarımı gerçekleştirmek maksadıyla bölüm 3.1'de sunulan yapıların dört yöne simetriklik ve ölçeklendirilmiş iç içe tasarım özelliği kullanılmıştır. Temel eleman olarak tek yönlü tırmık FSY yapısından ve büyük F harfinden esinlenerek Şekil 3.27.a'da sunulan iletken F-tipi rezonatör (FTR) yapısı tasarlanmıştır. Bu bölümde kullanılan yalıtkan alttaş malzeme, karşılaştırma yapabilmek için, tek bantlı FSY tasarımında seçilen malzemeyle aynı tür ve boyutlardadır.

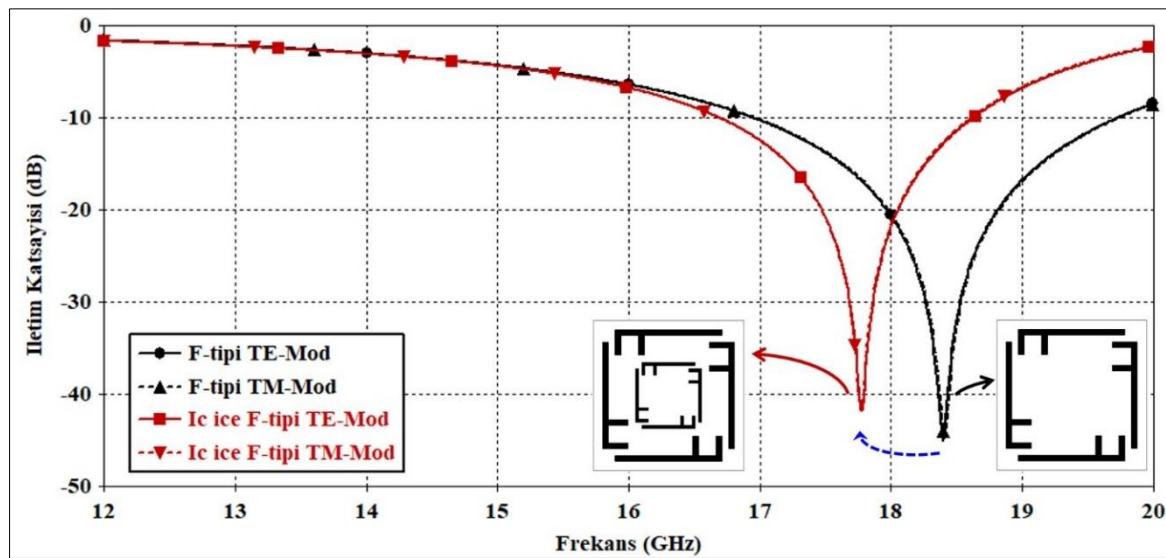
Tasarımın ilk adımında temel birim eleman FTR; y eksenini boyunca l_x uzunluğunda w_x genişliğinde iletken bir çubuk (F'in uzun kolu) ile bu çubuğun uç kısmına x eksenini boyunca uzanan aynı genişlikte, f_x boyunda ve aralarında d_x uzaklığı kadar mesafe olan iki iletken çubuk (F'in kısa kolu) eklenmesiyle elde edilmiştir. F-tipi iletken, dielektrik malzemenin merkezinden c_x uzaklığında ve alttaş malzeme yüzeyine temas edecek şekilde ön yüzüne

yerleştirilmiştir. İkinci adımda Şekil 3.27.b’de gösterildiği gibi temel FTR yapısı dört yöne simetrik ve merkezden eşit uzaklıkta aralarındaki açı 90° olacak şekilde konumlandırılarak F-tipi FSY modeli elde edilmiştir. Yüzey normaline paralel olarak ($\theta=0^\circ$) gelen dalgayla indüklenen F-tipi yapının benzetim sonucunda elde edilen S-parametre grafiğine göre TE ve TM modda rezonans frekansı 18,4 GHz, atenuasyon değeri -44,9 dB ve bant genişliği 2,78 GHz’dir.

Çizelge 3.8. F-tipi ve iç içe F-tipi FSY’nin parametre değerleri

Parametre	l_d	l_x	d_x	f_x	c_x	w_x	g_{x1}	g_{x2}	ölçek çarpanı (sf)
	mm								
Değer	7,75	5,5	1,2	1	3,4	0,3	0,74	0,42	0,5

Üçüncü adımda FSY’nin simetrik yapısını bozmadan ve boyutlarını değiştirmeden rezonans frekansını azaltmak için ölçeklendirilmiş iç içe tasarım yöntemi uygulanmıştır. FSY’nin dört FTR elemanı; z ekseninde iletken kalınlığı aynı kalacak şekilde xy düzleminde boyutu %50 oranında ($sf=0,5$) küçültülmüştür. Boyutları normal FTR’nin yarısı uzunluğunda olan ölçeklendirilmiş FTR’ler dış çerçeveyi oluşturan iletken yapının iç kısmına, dielektrik alttaşı merkezinden $c_x/2$ uzaklığında olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.27.c). F-tipi ve iç içe F-tipi FSY’nin temel parametre değerleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

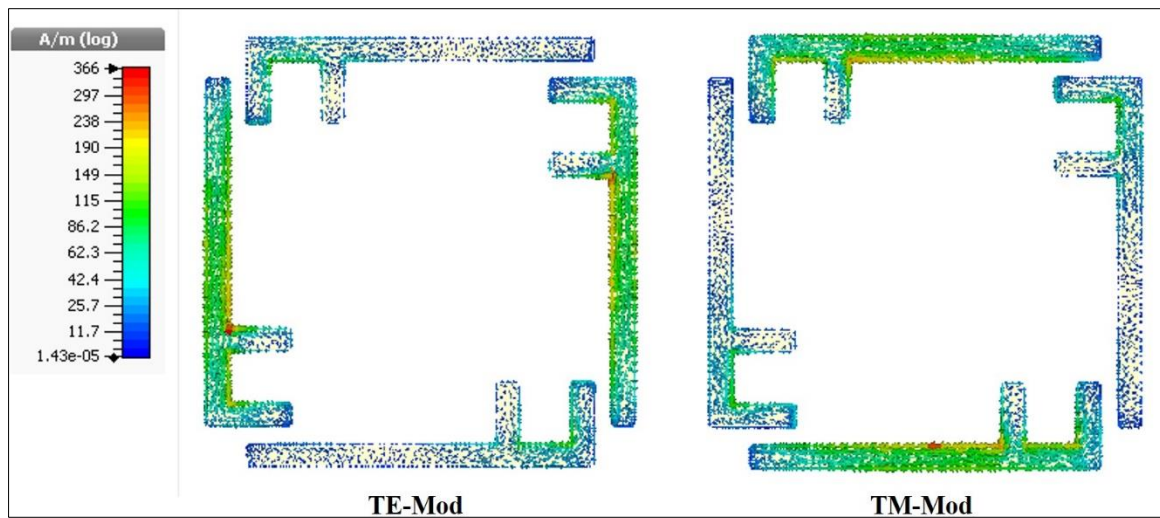


Şekil 3.28. F-tipi ve iç içe F-tipi FSY’nin $\theta=0^\circ$ ’de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiği

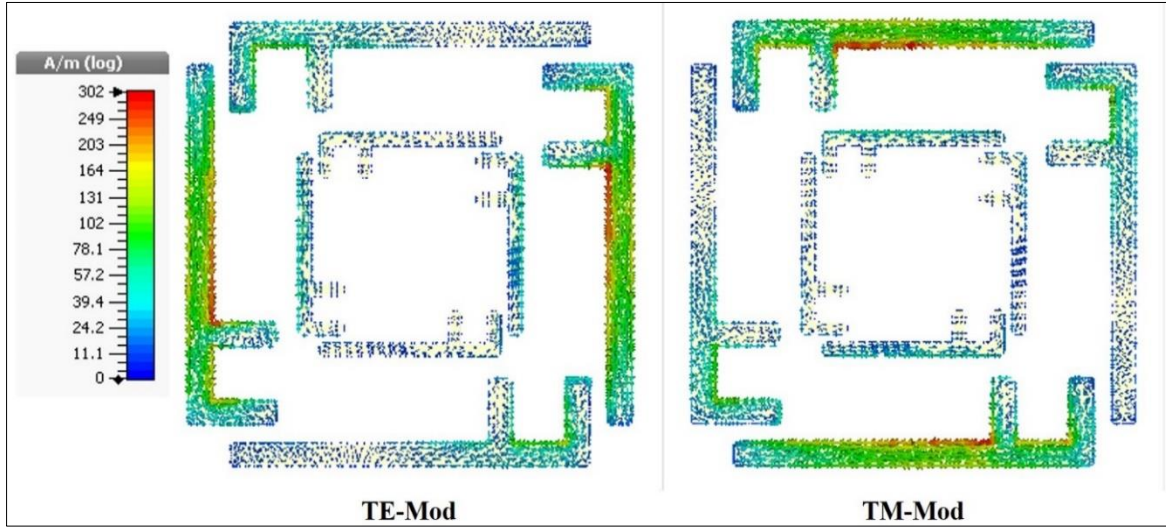
Çizelge 3.9. İç içe yapıların normal yapılar üzerindeki meydana getirdiği değişim

Tek bantlı FSY tasarımları	Normal yapı		İç içe yapı		f_r 'nin azalma oranı	AD 'nin değişim oranı
	f_r	AD	f_r	AD		
	GHz	dB	GHz	dB		
Tek yönlü tırmık	18,77	-42	18,19	-38,4	3,09	8,57
Testere dişi	11,9	-47,8	10,9	-44,4	8,40	7,11
F-tipi	18,4	-44,9	17,7	-41,7	3,80	7,13

İç içe F-tipi FSY eleman yüzeye dik açıyla gelen EM dalgada TE ve TM modlarında 17,7 GHz'de rezonansa girmekte ve 16,68 ile 18,62 GHz frekans bandı aralığında bant durduran filtre özelliği göstermektedir. Çalışma frekansını rezonans derinliği -41,7 dB'dir. F-tipi FSY'ye göre rezonans frekansında %3,8 oranında (0,7 GHz) azalma, iletim katsayısında ise %7,13 oranında (-3,2 dB) değişim gözlemlenmiştir. Benzetim ortamında tasarımı gerçekleştirilen normal çerçeve yapılar ile iç içe yapıların bu yapılar üzerindeki etkileri Çizelge 3.9'da detaylı olarak gösterilmiştir. Çizelge incelendiğinde daha önce de belirtildiği üzere iç içe yapıların rezonans frekansının normal yapılara nazaran daha düşük ve atenuasyon değerlerinin ise daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bunun nedeni rezonans elemanlar üzerinde oluşan yüzey akımının içteki ve dıştaki iletken yapılar arasında ilave bir enerji depolaması, yani kapasitif etki meydana getirmesidir.



Şekil 3.29. 18,4 GHz rezonans frekansında F-tipi FSY'nin yüzey akım dağılımı (A/m)

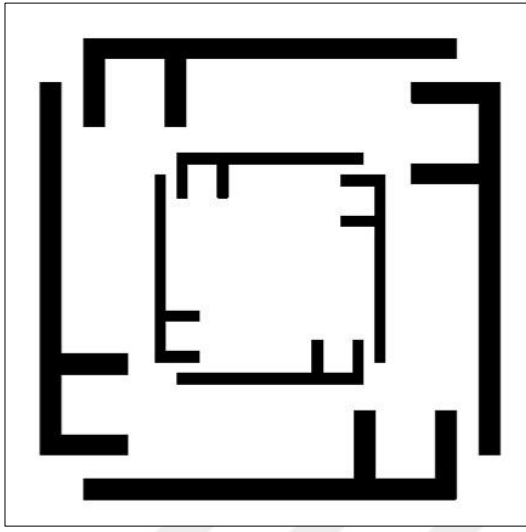


Şekil 3.30. 17,7 GHz rezonans frekansında iç içe F-tipi FSY'nin yüzey akım dağılımı (A/m)

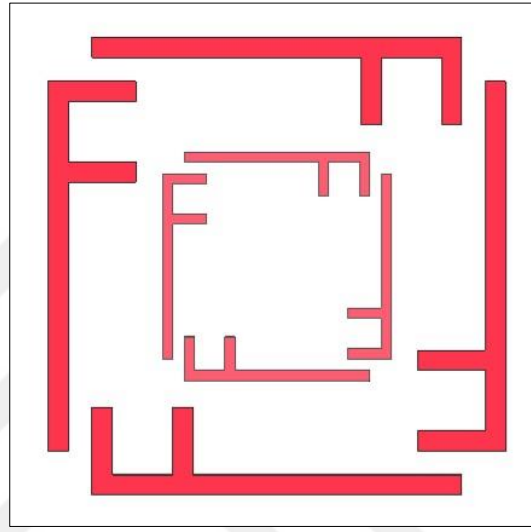
Gelen bir EM dalganın periyodik olarak dizilmiş bir yapının yüzeyine temas ettiğinde yüzeydeki iletkenleri indükleyerek bir akım dağılımına neden olduğu konusundan bölüm 2.3.4'te bahsedilmişti. Önerilen birim hücre yapısının FSY'nin çalışma karakteristiği üzerindeki etkisi hakkında daha net bir bilgiye sahip olmak için yüzey akım dağılımı incelenmiştir. F-tipi FSY'nin 18,4 GHz rezonans frekansındaki yüzey akım dağılımı (A/m) Şekil 3.29'da gösterilmektedir. TE- veya TM-polarize dalgaya bağlı olarak, FTR'lerin l_x uzunluğundaki iletken kolu üzerinde ilerleyen (oluşan) yüzey akımı özellikle FTR'nin uzun kol ile kısa kollarının birbirlerine bağlandığı noktalarda yoğunlaşmaktadır. Ayrıca iletken iki kısa kolun arasında dolaşan yüzey akımının bu noktada bir kapasitif enerji birikime neden olduğu akım dağılımından anlaşılmaktadır. Şekil 3.30'da verilen iç içe F-tipi FSY'nin 17,7 GHz'deki yüzey akım dağılımı incelendiğinde içteki ölçeklendirilmiş FTR'nin uzun koluyla dıştaki FTR'nin uzun kolunun birbirlerine bakan kısımlarında yüzey akımının yoğunlaştığı (kırmızı renk yoğunluğu belirtmektedir) görülmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere dıştaki ve içteki FTR'ler arasında yüzey akım dağılımından oluşan ilave kapasitif enerji rezonans frekansında azalmaya neden olmaktadır (Eş. 3.1).

Literatür incelendiğinde önerilen yapının iki farklı bant aralığında bant durduran filtre özelliği sergileyebilmesi için iki farklı yöntem uygulanabileceği görülmektedir. Birincisi, yapının etrafına ilave bir çerçeve iletken döngü eleman eklemektir. Ancak bu yöntem yapının boyutunu arttıracığından tercih edilmemiştir. İkincisi ise kullanılan dielektrik alttaşın arka yüzeyine istenen frekans aralığında bant durdurma özelliği gösterebilen iletken

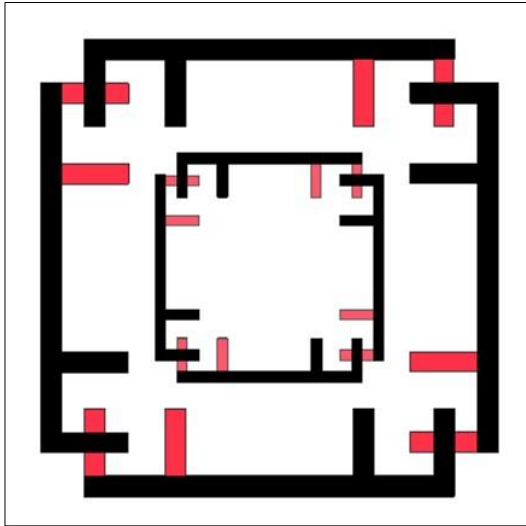
bir FSY elemanı yerleştirmektir. Bu yöntemde arka yüze yerleştirilecek iletkenin ön yüzdeki FSY elemanı ile arasındaki simetriklik uyumu genel FSY yapısının açılabilir kararlılığını belirlemektedir. Bundan dolayı dördüncü adımda farklı bir FSY tasarımı gerçekleştirilmek yerine ön yüzde kullanılan (Şekil 3.31.a) dıştaki ve içteki FTR'lerin Şekil 3.31.b'de görüldüğü gibi antipodal (ters simetriği) alınarak dielektrik alttanın arka yüzüne yerleştirilmiştir.



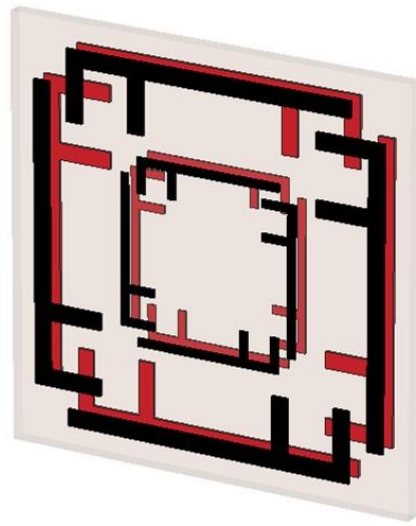
(a)



(b)



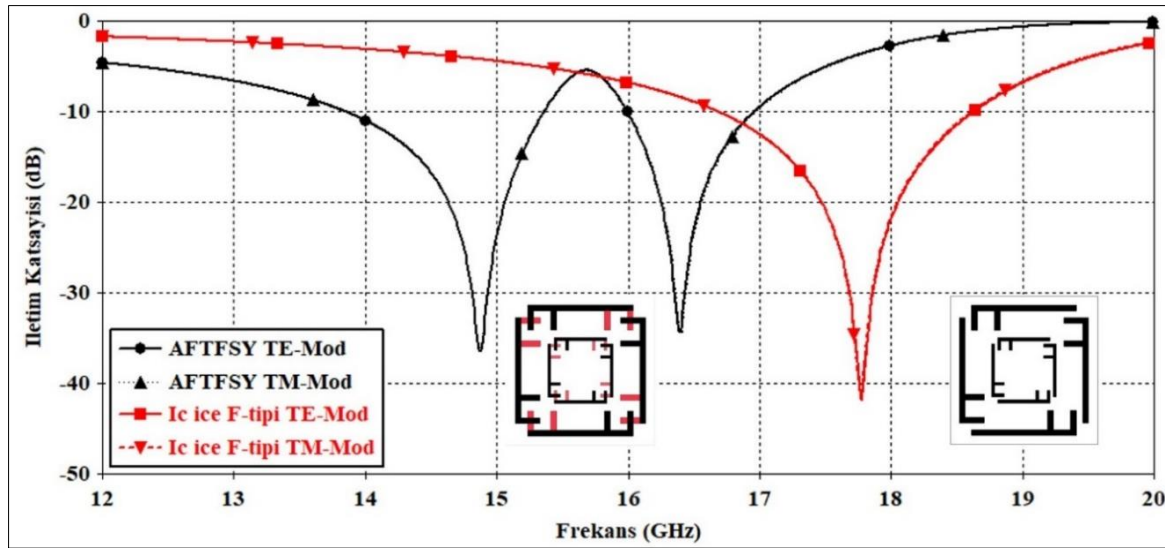
(c)



(ç)

Şekil 3.31. Çift bant antipodal F-tipi FSY'nin (AFTFSY) tasarım aşamaları (a) Dielektrik alttanın ön yüzündeki iç içe FSY yapısı, (b) alttanın arka yüzüne yerleştirilen ters simetriği alınmış iç içe FSY yapısı, (c) AFTFSY'nin önden görünüşü, (ç) AFTFSY'nin 3B görünüşü

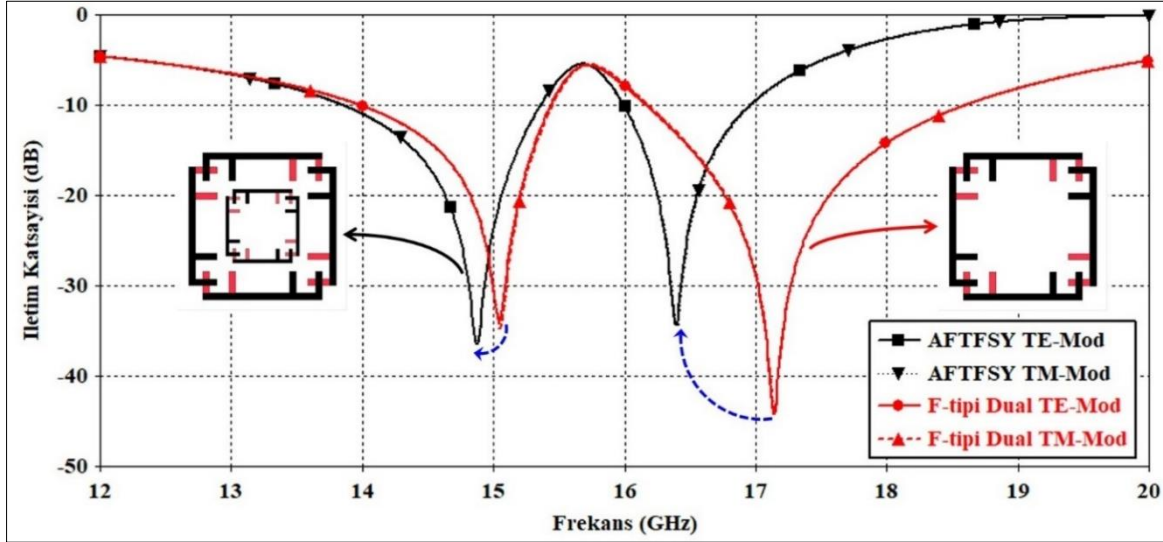
Antipodal, kelime anlamı olarak, birbirleri ile zıt özellikler sergileyen güney ve kuzey yarım küreyi betimlemek amacıyla özellikle Yeni Zelanda ve Avusturalya’da kullanılan taban tabana zıt toprak parçaları anlamına gelmektedir. Özellikle Vivaldi anten tasarımında birbirlerine ters ve simetrik olarak yerleştirilmiş iki ışıma parçasının durumlarını ifade etmek için “Taban tabana tamamen zıt” anlamında kullanılmaktadır [62]. Yapının daha iyi anlaşılabilmesi maksadıyla dielektrik malzeme saydamlaştırılarak AFTFSY’nin önden ve 3B görünüşü sırasıyla Şekil 3.31.c ve Şekil 3.31.ç’de verilmiştir. Ön yüze yerleştirilen iletken FTR’lerle arka yüzdekiler birebir aynı boyutlarda olup parametre değerlerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 3.32. İç içe F-tipi FSY ile AFTFSY’nin $\theta=0^\circ$ ’de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.32’de verilen S-parametre grafiğine göre yüzey normaline paralel olarak ($\theta=0^\circ$) gelen EM dalgayla indüklenmiş AFTFSY yapısının iki farklı frekansta rezonansa girdiği ve TE/TM modda aynı özellikleri sergilediği görülmektedir. İlk rezonans frekansı 14,85 GHz ve iletim katsayısı (İK) -36,4 dB olan AFTFSY’nin ikinci rezonans frekansı ise 16,4 GHz ve İK’sı -34,3 dB’dir. Önerilen çift bant FSY yapısı 13,85 ile 15,36 GHz ve 15,99 ile 16,95 GHz frekans bandı aralığında, sırasıyla 1,51 GHz ve 0,96 GHz bant genişliğinde, bant durduran filtre (BDF) özelliği göstermektedir. 12-20 GHz aralığında kalan diğer frekans bandında ise gelen EM dalganın FSY’nin diğer tarafına geçmesine (bant geçiren filtre [BGF]) izin vermektir. İç içe F-tipi FSY ile AFTFSY karşılaştırıldığında; birim hücre yapılarının aynı boyutta olduğu, iç içe yapının rezonans frekansının azalarak AFTFSY’de

iki farklı frekans bandında BDF özelliği sergilediği, ancak AFTFSY'nin atenuasyon derinliğinin iki f_r 'de de azaldığı görülmektedir.



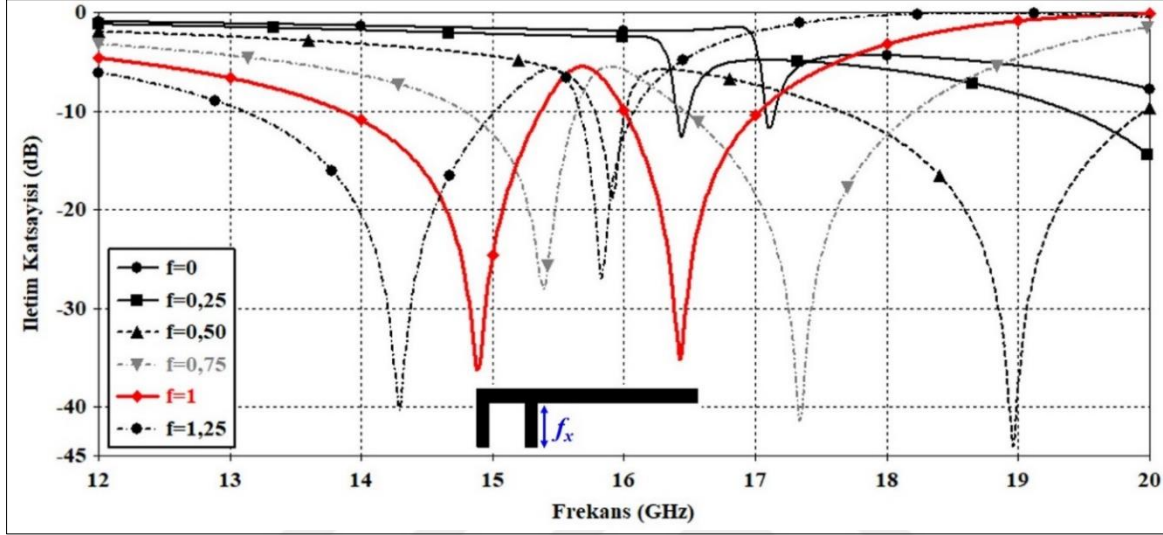
Şekil 3.33. AFTFSY ile normal F-tipi çift bant FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması

İç içe yapıların çift bantlı AFTFSY'deki etkisini görebilmek için iç kısmına ölçeklendirilmiş FTR'ler eklenmemiş çift bant F-tipi FSY (normal F-tipi FSY) ile karşılaştırılmıştır. Normal F-tipi çift bant FSY'de ön yüzde sadece dıştaki FTR'ler bulunmakta ve bunların ters simetrikleri alttaşın alt yüzüne yerleştirilmektedir. Normal F-tipi çift bant yapının birinci rezonans frekansı 15,1 GHz ve ikincisi 17,15 GHz olarak ölçülmüştür. Buna göre normal F-tipi yapıyla kıyaslandığında AFTFSY'nin birinci f_r değeri %1,65, ikinci f_r değeri %4,4 oranında düşmekte, ancak BDF özelliği sağlayan ilk bant genişliği %4,1 oranında artarken ikincisi %60 oranında daralmaktadır. Sonuç olarak iç içe yapı AFTFSY'nin ikinci çalışma frekans bandında bir daralma meydana gelse de, özellikle FSY yapısının boyutları değişmeden iki rezonans frekansının da azalması önemli ve istenen bir durumdur (Şekil 3.33).

3.2.2. Çift bant AFTFSY'nin parametrik ve benzetim analizleri

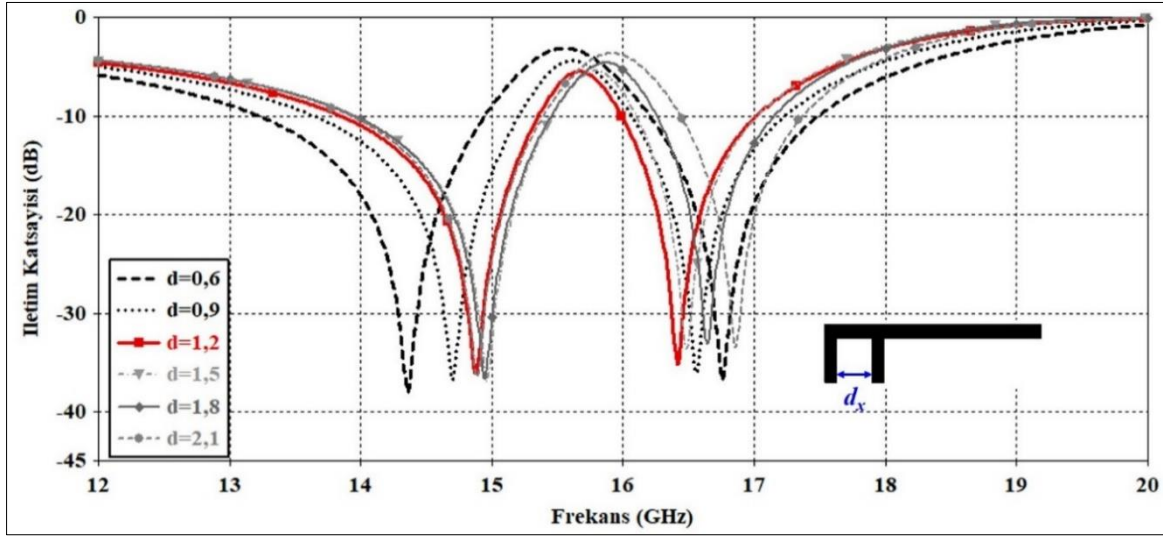
Bu bölümde öncelikle AFTFSY'nin parametreleri frekans eğrileri üzerinden analizler edilerek yapının eniyilemesi gerçekleştirilmiş ve boyutları değişen bileşenlerin yapının performansına etkisi incelenmiştir. Parametre analizinde gelen EM dalganın yüzeye paralel

(θ parametresi hariç) ve Floquet modunun TE (0,0) olduğu kabul edilmiş, bir parametre değeri değiştirilirken diğer parametreler Çizelge 3.8'deki değerlerinde sabit tutulmuştur. Daha sonra AFTFSY üzerinde yapılan yapısal değişiklikler benzetim ortamında mevcut yapıyla karşılaştırılmıştır.

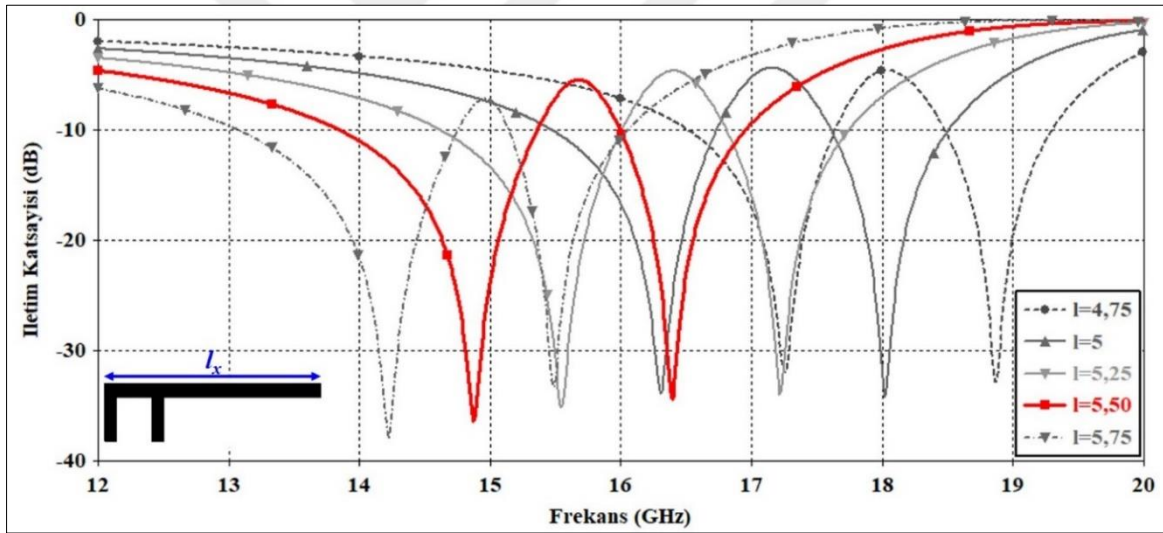


Şekil 3.34. f_x parametresinin AFTFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

İncelenen ilk parametre değeri FTR yapısının kısa kol uzunluğu olan f_x 'dir. Parametre değerleri 0 ila 1,25 mm arasında değişen yapıya ait S-parametre grafiği Şekil 3,34'te verilmiştir. f_x değeri 0'a eşit olduğunda kısa kollar olmayacak, yapı sadece dışta ve içte dörder adet iletken çubuktan oluşacaktır. Bu durumda oluşan yapının belirlenen frekans bandı aralığında (12-20 GHz) rezonansa girmediği görülmektedir. Parametre değeri 0,5 mm iken AFTFSY'nin yaklaşık 19 GHz'de ve BG'si 2,34 GHz olan bir rezonans frekansına sahip olduğu ancak ikinci rezonans frekansın 15,9 GHz'de iletim katsayısının sadece -18,6 dB ve BG'sinin (0,24 GHz) çok dar olduğu anlaşılmaktadır. Parametre değeri yükseldikçe iki farklı frekans bandının ortaya çıktığı, ilk rezonans frekansının derinliği ve BG'si artarken ikinci rezonans frekansının BG'sinin ve derinliğinin azaldığı görülmektedir. f_x değeri 1 mm iken iki rezonans frekansının da BG, AD ve f_r değeri açısından eşdeğer karakteristik özellikler sergilediği görülmektedir. f_x değeri daha da büyüdükçe ($f_x > 1$) ikinci rezonans frekansında kayda değer bir bozulma meydana gelmektedir.



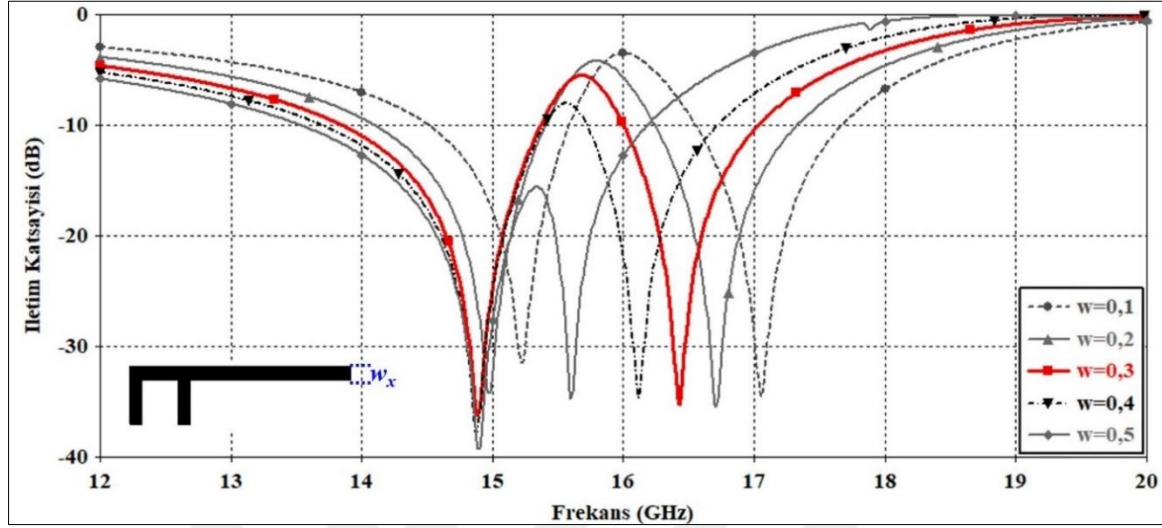
Şekil 3.35. d_x parametresinin AFTFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği



Şekil 3.36. l_x parametresinin AFTFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

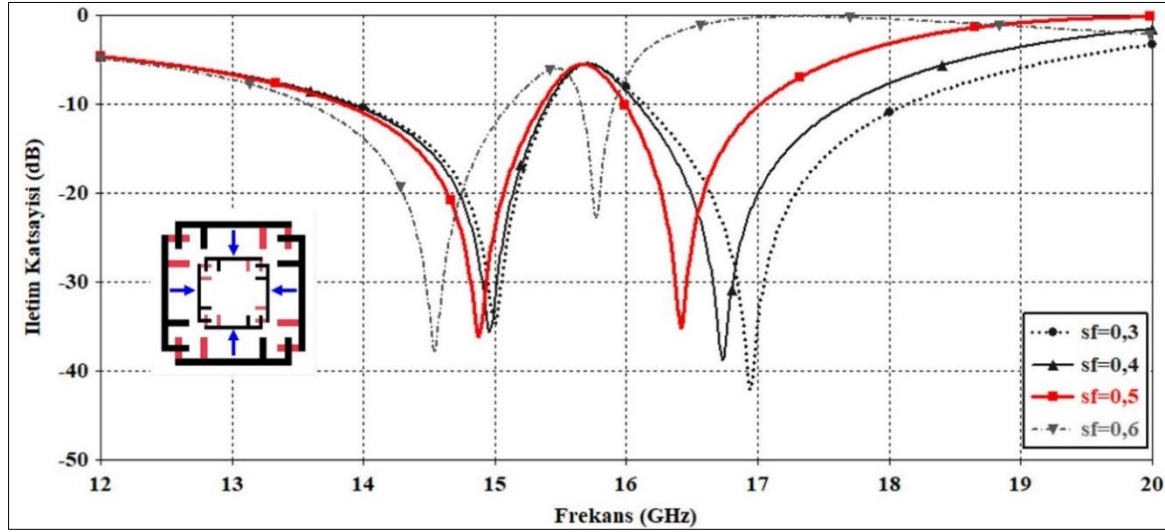
Analiz edilen diğer bir parametre ise FTR'nin kısa kolları arasındaki mesafedir (d_x). Bu parametre 0,6 ile 2,1 mm arasındaki değerlerde incelenmiştir. 0,6 mm'den daha küçük aralıklarda iki kısa kol arasındaki mesafe yapının açısal kararlılığını azalttığı için değerlendirilmemiştir. Şekil 3.35 incelendiğinde d_x değeri 0,6 mm iken yapının 14,35 ve 16,77 GHz frekanslarında tam rezonansa girdiği ve değer büyüdükçe iki rezonans frekansının birbirine yaklaştığı görülmektedir. d_x değeri 1,8 mm'den daha büyük olduğunda ise frekans değerleri yeniden birbirlerinden uzaklaşmaktadır. Ayrıca bu parametre değerinin

değişimiyle çalışma frekans bantlarının genişliklerinde kayda değer bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.37. w_x parametresinin AFTFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

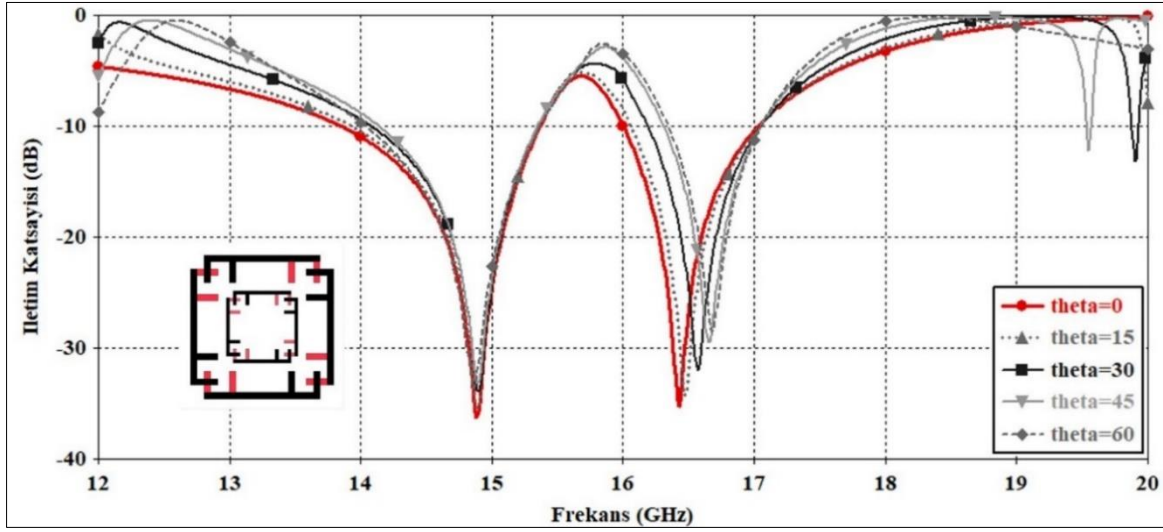
Bölüm 2.3.2'de belirtildiği üzere FSY'lerdeki iletken uzunluklar indüktif devre elemanları ile ifade edilebilmektedir. Eş. 3.1 incelendiğinde FSY'deki iletken uzunluğu arttığında indüktif değer de artması, bununla beraber yapının rezonans frekansının azalması beklenmektedir. AFTFSY yapısındaki FTR iletkenlerinin uzunluğu l_x parametresiyle ifade edilmektedir. Bu parametre 4,75-5,75 mm aralığındaki beş farklı değerde incelenmiştir. Şekil 3.36'dan da görüleceği üzere l_x 4,75 mm iken birinci rezonans frekansı 17,25 GHz, ikincisi 18,86 GHz'dir. Değerin her 0,25 mm'lik artışında rezonans frekansında ortalama 0,8 GHz'lik bir azalma meydana gelmektedir. Bu durum yukarıda belirtildiği gibi iletken uzunluğu ile çalışma frekansı arasındaki ilişkiyi doğrulamaktadır. Parametre değeri 5,75 mm iken rezonans frekansları en düşük (14,2 ve 15,5 GHz) değerini alsa da iletkenler arasındaki mesafe çok azaldığı için yapının eğik açılarla gelen EM dalgalara karşı performansı kararsızlaşmaktadır. Ayrıca l_x değeri 6 mm'den büyük olduğunda FTR'ler birbirine temas etmekte (birleşmekte) ve yapının iletim/yansıma karakteristikleri bozulmaktadır. Bunlara ilave olarak, iletken uzunluğunun artışı yapının BG değerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı da görülmektedir.



Şekil 3.38. sf parametresinin AFTFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

Bant durduran filtre karakteristiğine sahip FSY'nin rezonans frekansını etkileyen faktörlerden birisinin iletken kalınlığı olduğundan bölüm 2.3.1'de bahsedilmişti. w_x parametre değerleri 0,1 ila 0,5 mm arasında değişen AFTFSY'e ait S-parametre grafiği Şekil 3,34'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde iletken kalınlığı 0,1 mm iken rezonans frekanslarının sırasıyla 15,22 ile 17,05 GHz olduğu, w_x değeri arttıkça f_r değerlerinin azaldığı görülmektedir. Değer 0,3 mm'den daha büyük olduğunda ise birinci rezonans frekansının değişmediği ancak ikinci rezonans frekansının küçülmeye devam ettiği, 0,5 mm'de iki frekans değeri arasındaki belirginliğin kaybolarak (-10 dB altına düşmesi) AFTFSY'nin çift bantta sergilediği BDF özelliğinin yok olduğu anlaşılmaktadır.

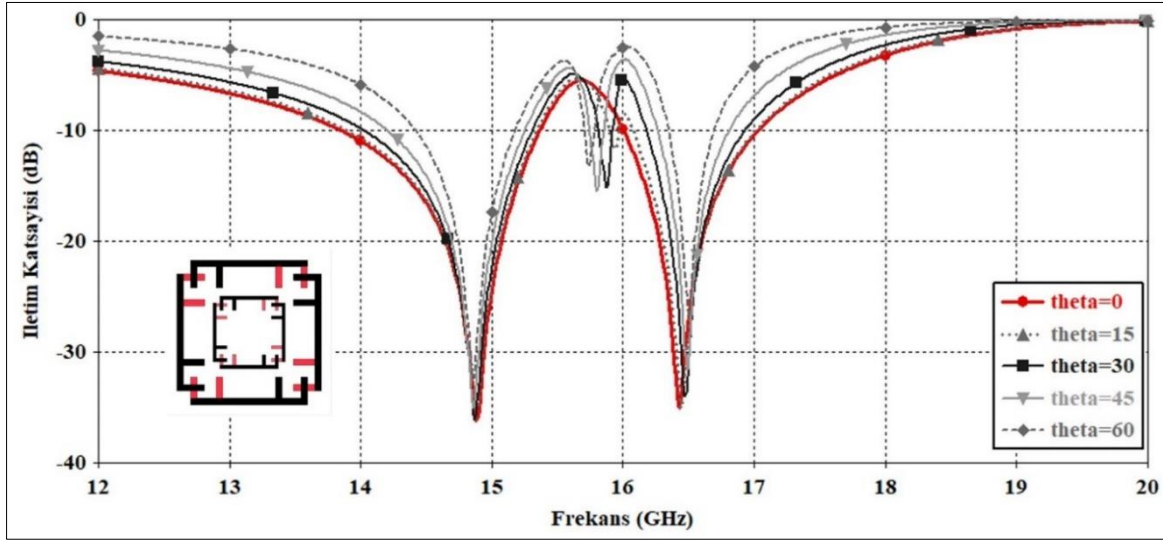
Ölçek çarpanı (sf) parametresinin iç içe testere dişi FSY üzerindeki etkisine bölüm 3.1'de değinilmişti. Buna göre sf değeri arttığında FSY'nin rezonans frekansının ters orantılı olarak azaldığı gözlemlenmişti. AFTFSY'de ise sf değeri 0,3 mm'den 0,5 mm'ye artarken yukarıdakiyle benzer bir durum oluşarak ikinci rezonans frekansı 16,95 GHz'den 16,4 GHz'e düşmektedir. Ancak bu düşüş birinci rezonans frekansında yaşanmamakta, frekans değerlerinde 14,95 GHz'den 14,85 GHz'e sadece 0,1 GHz'lik bir azalma meydana gelmektedir. sf değeri 0,5'den daha büyük olduğunda ise dış FTR ile iç FTR yapılar birbirine çok yakınlaşmakta ve AFTFSY'nin karakteristik özellikleri tamamen bozulmaktadır. Bu durum sf değeri 0,6 mm iken ikinci rezonans frekansındaki değişimden rahatlıkla anlaşılmaktadır. (Şekil 3.38)



Şekil 3.39. Farklı θ açıları için AFTFSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği

EM dalgaların doğrudan, yansıma ve saçılmalarla birden fazla yoldan ilerleyebildiği, dolayısıyla FSY'ye eğik açılarla ulaşabildiği bilinmektedir. FSY yüzeyinin eğik açıyla gelen dalgaya verdiği tepki ise, dik açıyla gelen dalgaya nazaran, dalganın yüzey normaliyle yaptığı açının büyümesiyle orantılı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Bu durum *açısal kararlılık* olarak adlandırılmaktadır. Yüzeye geliş açısı 0° ile 60° arasında değişen TE polarizeli dalgaya karşı AFTFSY'nin sergilediği performans Şekil 3.39'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde θ açısı 60° iken birinci rezonans frekansında neredeyse hiç kayma meydana gelmediği, BG'sinin sadece alt frekansında 0,3 GHz'lik bir artış olduğu görülmektedir. İkinci rezonans frekansında ise %1,5'lik bozulma (16,4 GHz'den 16,68 GHz'e) görülse de geliş açısı 60° olduğunda çalışma frekans bandı 16,3 ile 17,07 GHz aralığında yani rezonans frekansını durduracak aralıkta olduğu anlaşılmaktadır. BG değerinin ise tıpkı birinci frekans bandında olduğu gibi alt frekansının 0,34 GHz yükseldiği, üst frekansının değişmedi gözlemlenmiştir.

60° 'ye kadar eğik açıyla gelen EM dalgalara karşı açısal kararlı bir yapıya sahip olan AFTFSY yapısının 12-20 GHz çalışma bandında 13,85 ile 15,36 GHz ve 15,99 ile 16,95 GHz aralığında BDF, kalan diğer frekans aralığında ise BGF özelliği göstermektedir. Bu kapsamda Ku-Bant ve K-Bant uydu haberleşme sistemlerindeki girişim etkisini azaltmak amacıyla kullanılabileceği değerlendirilmiştir [63].

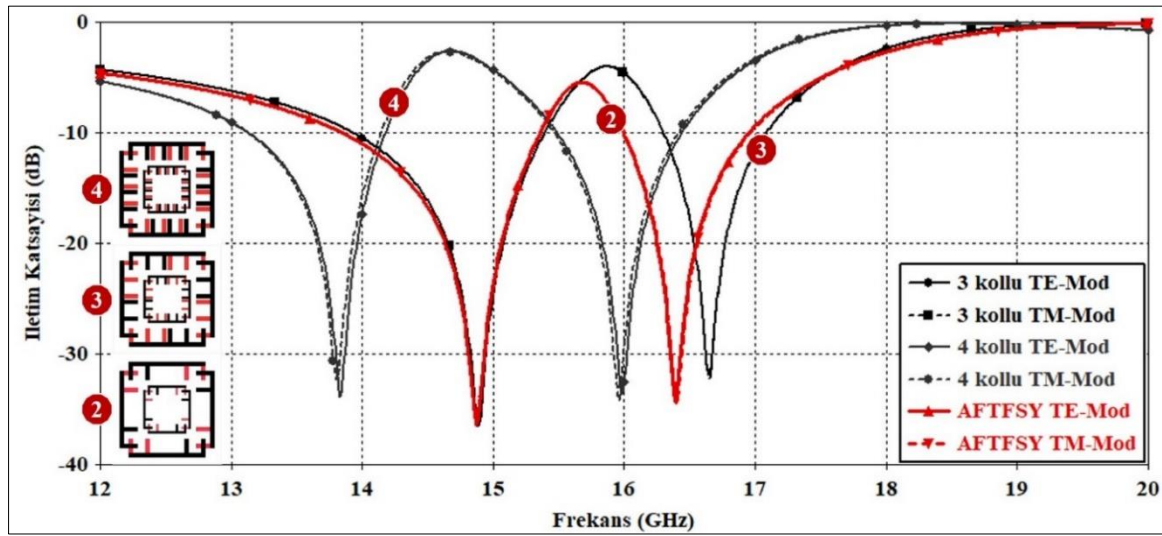


Şekil 3.40. Farklı θ açıları için AFTFSY'nin TM moddaki S-parametre grafiği

TM modda gelen EM dalganın yüzey normaliyle yaptığı açının büyümesiyle birlikte AFTFSY'nin açısal kararlılığındaki değişim Şekil 3.40'ta sunulmuştur. Buna göre $\theta=60^\circ$ iken her iki rezonans frekansında da önemli bir bozulma olmadığı, birinci rezonans frekansında %0,13, ikincisinde %0,25'lik bir kayma meydana geldiği görülmektedir. TE moddakinin aksine BDF özelliği gösteren her iki frekans bandının hem alt frekansı yükselmekte hem de üst frekansı düşmektedir, kısacası BG daralmaktadır. Geliş açısı 60° olduğunda çalışma frekans bandı sırasıyla 14,4 ile 15,18 GHz ve 16,3 ile 16,7 GHz aralığındadır. Ayrıca θ değeri 30° 'den büyük olduğu durumlarda 15,7 ile 15,9 GHz frekans bandı arasında bazı bozulmalar görülmektedir. Buradan şu sonucu çıkarabiliriz, EM dalganın geliş açısı 60° 'ye kadar BG ve f_r değerlerinde değişimler gözlemlense de önerilen AFTFSY yapısının çalışma bandı aralığı rezonans frekanslarını içerdiğinden BDF özelliğini kaybetmediği ve 60° 'ye kadar açısal kararlı olduğu söylenebilir.

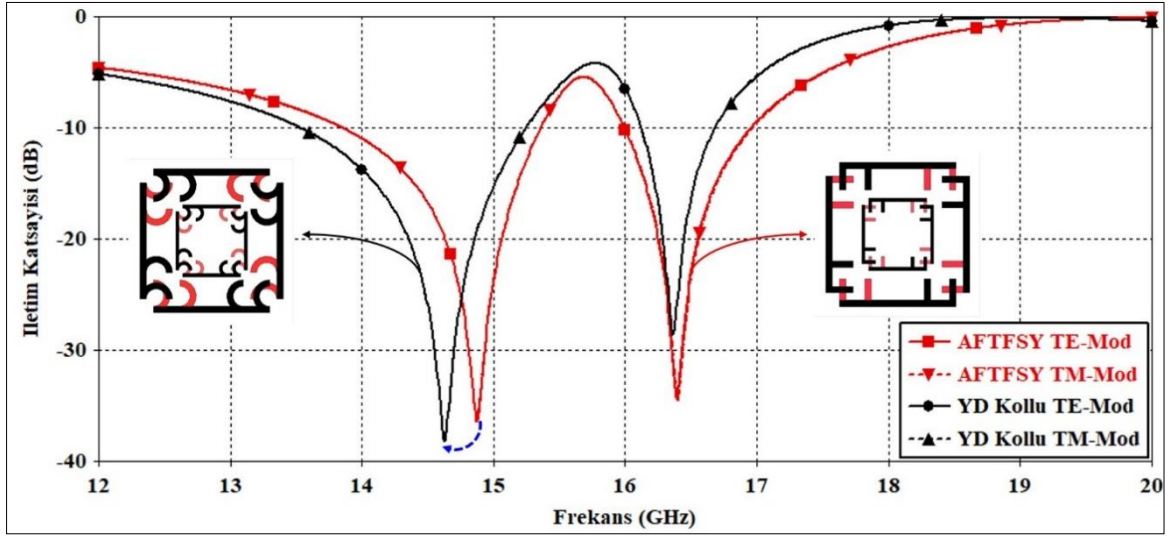
Bu kısımdan itibaren AFTFSY üzerinde yapısal değişiklikler uygulanarak benzetim ortamında mevcut yapıyla karşılaştırılmıştır. FTR iletkeninin rezonans frekansını belirleyen en önemli parçası kısa kollarıdır. Bu kollardaki değişim yapının genel karakteristik özelliklerinde önemli etkilere neden olacaktır. Başlangıçta kısa kolların sayısı artırılarak tasarimsal değişikliğe gidilmiştir. AFTFSY (iki), üç ve dört kollu F-tipi çift bant FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafikleri Şekil 3.41'de sunulmuştur. Buna göre yapının kol sayısı ikiden üçe çıkarılınca ilk rezonans frekansı sabit kalmakta, ikinci rezonans frekansı 0,25 GHz yükselirken BG'si 0,18 GHz azalmaktadır. Dört kollu yapıda ise iki

çalışma frekans bandı da diğerlerine kıyasla azalmaktadır. Birinci rezonans frekansı 13,83; ikincisi 15,96 GHz'dir. BG değeri ise birinci çalışma bandında 0,69 GHz azalırken ve diğerinde aynı kalmaktadır. Rezonans frekansındaki bu azalma istenen bir durum olarak görünse de kol sayısı arttıkça yapı tek yönlü ve çift yönlü tırmık FSY'ye benzemektedir ve Çizelge 3.7'de verildiği üzere bu yapıların eğik açılarda gelen EM dalgaya karşı rezonans frekansındaki bozulma oranı diğer yapılara kıyasla daha yüksektir. Bundan dolayı F-tipi iletken yapının kısa kol sayısının artması aslında istenmeyen bir durum oluşturmaktadır.

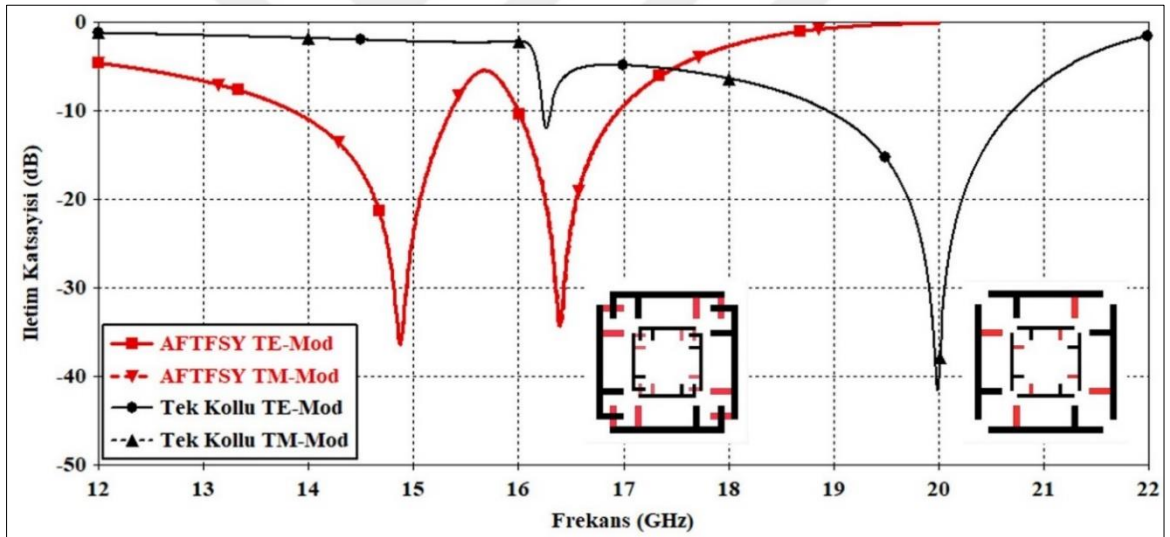


Şekil 3.41. AFTFSY (iki), üç ve dört kollu F-tipi çift bant FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması

Diğer bir yapısal değişim ise kısa kolların düzlemsel yapısının dairesel olarak yeniden tasarlanmasıdır. Tasarlanan kısa kolun iç yarıçapı 0,475 mm ve iç kısmının uzunluğu 1,5 mm'dir. Düzlemsel yapıya kıyasla, dairesel yapıyla birlikte iletken uzunluğunda bir artış meydana gelmiştir. Şekil 3.42'den de görüleceği üzere yarım daire (YD) kollu F-tipi çift bant FSY'nin birinci rezonans frekansı 0,22 GHz azalarak 14,63 GHz, BG'si 0,23 GHz artarak 1,74 GHz olmuştur. İkinci rezonans frekansında ise 0,04 GHz'lik bir azalma olurken çalışma frekans bandı 0,39 GHz daralmış ve iletim katsayısı 5,7 dB artarak -28,6 dB olmuştur. Sonuç olarak YD kollu yapının iki rezonans frekansı arasındaki genişlik artsa da ikinci çalışma bandındaki daralma ve iletim katsayısındaki artış BDF özelliğinde seçiciliği azaltmaktadır.



Şekil 3.42. AFTFSY (iki) ve yarım daire (YD) kollu F-tipi çift bant FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 3.43. AFTFSY (iki) ve tek kollu F-tipi FSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması

Son olarak iletken FTR'lerin iki kısa kolundan birincisi çıkartılarak oluşan tek kollu FSY'nin karakteristik yapısı incelenmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 3.43'te verilen yeni durumda yapının bant durduran birinci çalışma bandı yok olurken BG değeri 1,76 GHz olan ikinci rezonans frekansı 20 GHz'de oluşmaktadır. Bu tasarım sonucundan; AFTFSY'nin birinci kolu ile dielektrik alttaşın alt yüzeyindeki 90° simetrik diğer FTR'nin birinci kolu arasında bir etkileşim olduğu ve bu etkileşim neticesinde depolanan enerjinin ikinci bir rezonans frekansına neden olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumla ilgili detaylı bilgi bölüm 3.3'te verilecektir.

3.2.3. Ultra geniş bant AFTFSY tasarımı

Amerika Birleşik Devletleri'nde ulusal ve uluslararası iletişim kurallarını belirleyen Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission) tarafından tanımlanan rapor ve düzenlemeye göre; bir uygulamanın ultra geniş bantlı (UGB) olabilmesi için, uygulamaya ait sinyallerin her iletim sırasında 500 MHz'den büyük bant genişliğine sahip olması veya kesirli bant genişliğinin (Fractional bandwidth – BG_f) tüm iletim bant genişliğinin %20'sinden fazla olması gerekmektedir. Kesirli bant genişliği, sinyalleri dar bant, geniş bant veya ultra geniş bant olarak sınıflandırmak için kullanılan bir faktördür ve -10 dB'deki bant genişliğinin merkez frekansına oranıyla tanımlanır [64]. Eş. 3.2 bu ilişkiyi göstermektedir.

$$BG_f = \frac{BG}{f_c} \times \%100 = \frac{f_h - f_l}{(f_h + f_l)/2} \times \%100 = \frac{2 \times (f_h - f_l)}{f_h + f_l} \times \%100 \quad (3.2)$$

f_h , f_l ve f_c sırasıyla en yüksek, en düşük ve merkez frekansı gösterir. BG_f 'ye göre uygulamaların sınıflandırılması ise;

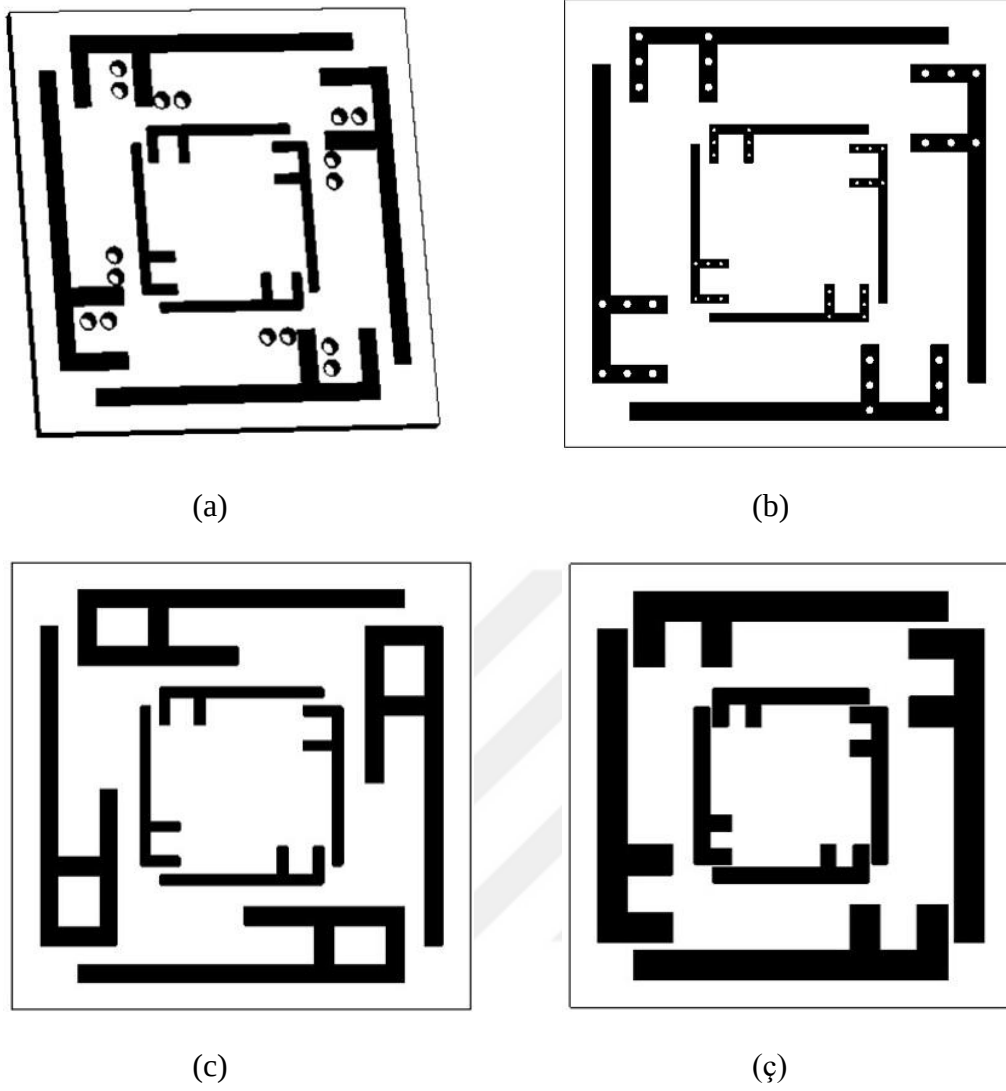
- Dar bant $BG_f < \%1$,
- Geniş bant $\%1 < BG_f < \%20$,
- Ultra geniş bant $\%20 < BG_f$

olarak tanımlanmaktadır [64].

Şekil 3.32'de sunulan s-parametre grafiği incelendiğinde, AFTFSY'nin BDF özelliği gösteren iki farklı çalışma bandı arasındaki bant genişliği (birinci BG'nin f_h 'si ile ikinci BG'nin f_l 'si arası, 15,36-15,99 GHz) -10 dB seviyesinin altına indirilerek geniş bant bir BDF elde edilebileceği görülmektedir. Bu kapsamda geniş bant AFTFSY elde edebilmek için,

- Dielektrik yüzeyi veya iletken üzerinde delikler açmak,
- İlave parça eklemek,
- Mevcut parametreleri değiştirmek

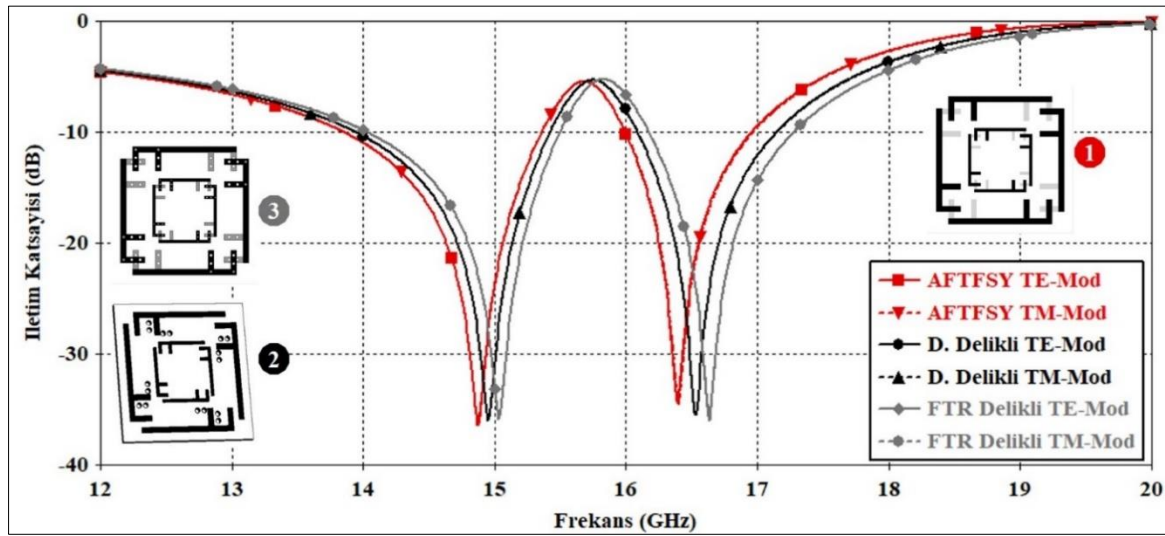
suretiyle yapı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. UGB FSY birim eleman tasarım çalışmalarının ön yüzden görünüşleri Şekil 3.44'te sunulmuştur.



Şekil 3.44. AFTFSY'nin; (a) dielektrik yüzeyi üzerinde delikler açılması, (b) FTR üzerinde delikler açılması, (c) iletken elemanlarına ilave parça eklenmesi ve (ç) parametrelerin değiştirilmesi yoluyla yapılan UGB FSY birim eleman tasarım çalışmaları

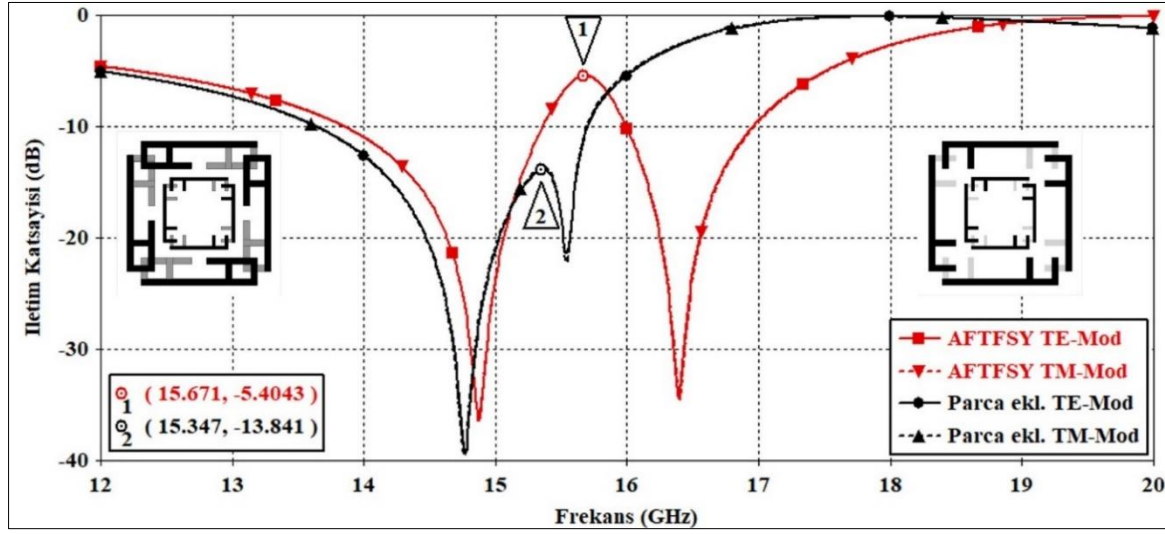
İlk tasarım çalışması AFTFSY'nin dielektrik alttaşı ve FTR'lerinde delik açarak yapılmıştır. Buradaki amaç yapının yüzey akım dağılımının yoğunlaştığı bölgelere delikler açmak suretiyle ilave kapasitif etki meydana getirmek ve bu etkiyle yapının iletim karakteristiğinde değişim yaratmaktır. Şekil 3.30'da da belirtildiği üzere AFTFSY'nin yüzey akım dağılımı özellikle dıştaki FTR'lerin uzun kolu boyunca ve uzun kolun kısa kollarla birleştiği noktalarda yoğunlaşmaktadır. Bundan dolayı dielektrik yapının iki kısa kolu arasına ve içteki kısa kolun uç kısmına birbirlerine simetrik olacak şekilde çapı w_x genişliğinde olan ikişer adet delik yerleştirilmiştir (Şekil 3.44.a). Diğer bir tasarım ise içteki ve dıştaki FTR'lerin kısa kolları üzerine aralarında 0,44 mm mesafe olacak şekilde, çapı $w_x/2$

genişliğinde olan üçer adet delik açılmıştır (Şekil 3.44.b). Şekil 3.45'te verilen bu tasarımlara ait analiz sonuçları incelendiğinde, AFTFSY'nin iki rezonans frekans arasında, çalışma bantlarını birbirinden ayıran tepe noktasında (-5,4 dB) eksi yönde herhangi bir artış eğilimi meydana gelmemiştir. Çalışma bantlarında beklenen genişleme yerine, delikli dielektrik ve delikli FTR yapısında sırasıyla birinci rezonans frekansı 14,95 ve 15,05 GHz'e; ikincisi ise 16,52 ve 16,63 GHz'e kaymıştır. Kısacası delikli yapılarda beklenen etki meydana gelmemiştir.



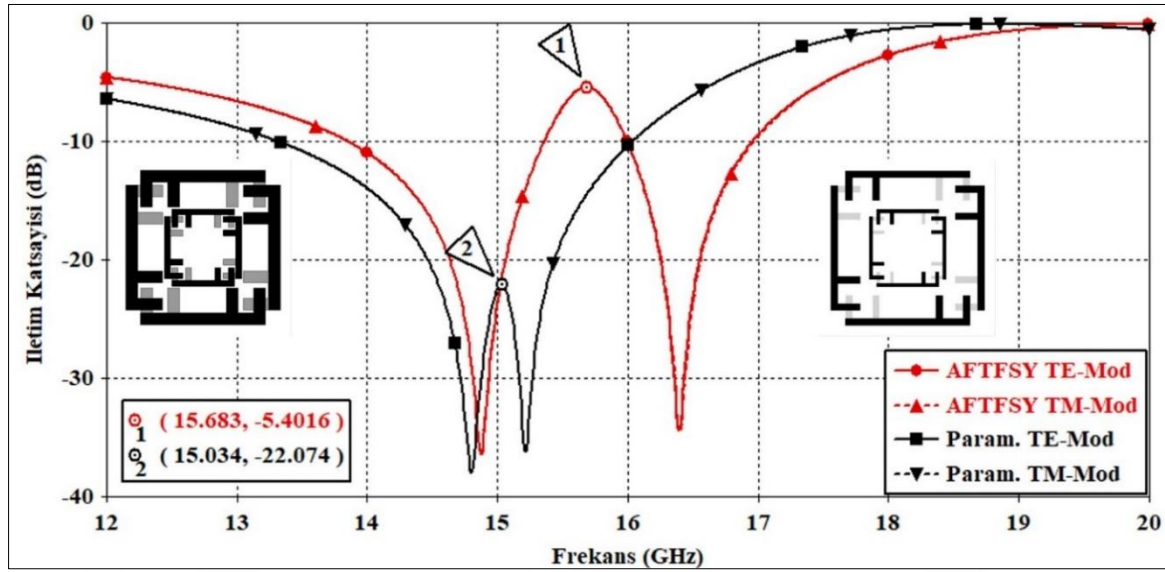
Şekil 3.45. AFTFSY (1), delikli dielektrik AFTFSY (2) ve delikli FTR AFTFSY'nin (3) $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması

İkinci tasarım çalışmasında yine yüzey akım dağılımdaki etki üzerinden yola çıkarak AFTFSY'nin kısa kolları arasına ve içteki kısa kolun uç kısmına, kısa kolları dik kesecek şekilde genişliği w_x , uzunluğu 0,9 mm olan iletken düzlemsel yapılar Şekil 3.44.c'de gösterildiği gibi eklenmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde AFTFSY'nin çalışma bantlarını birbirinden ayıran 1 no.lu (-5,4 dB) tepe noktasının FTR yapısına iletken parça ekleyerek 2.no.lu (-13,85 dB) noktaya kadar çekildiği Şekil 3.46'dan açıkça görülmektedir. İki rezonans frekansı arasındaki tepe noktasının istenilen seviyenin (-10 dB) altına çekilmesiyle alt ve üst frekans sınırları 13,6 ile 15,7 GHz aralığında ve bant genişliği 2,1 GHz olan bir FSU yapısı elde edilmiştir. Bu değerler Eş. 3.2'de yerine koyulduğunda parça eklenmiş FSU'nin kesirli bant genişliğinin (BG_f) %14,33 olduğu görülmektedir. Sonuç olarak bölümün başında belirtilen sınıflandırmaya göre yapının geniş bantlı olduğu anlaşılmaktadır.

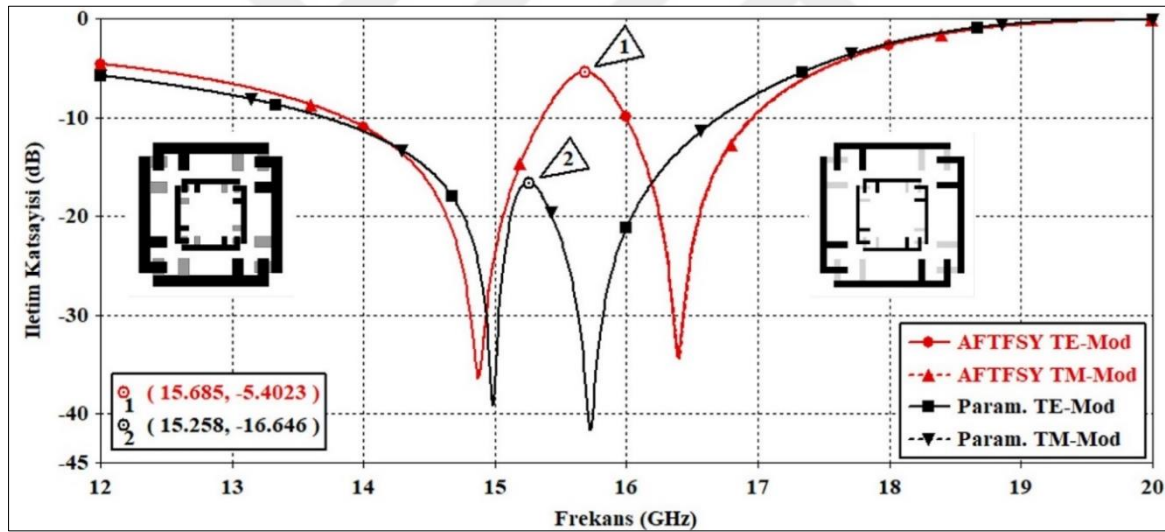


Şekil 3.46. AFTFSY ile iletken parça eklenmiş AFTFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması

UGB FSY tasarımına ulaşmak için uygulanan son yöntem önerilen AFTFSY'de parametresel değişiklik yapılmasıdır. Bölüm 3.2.2'de w_x parametresinin değişimi incelenmiş ve parametre değeri arttıkça iki rezonans frekansı arasındaki tepe noktasının (iletim katsayısının) azaldığı görülmüştür. Bu kapsamda, yapılan birçok benzetim sonucunda iki farklı parametre grubu ile iki farklı sonuç elde edilmiştir. Bu sonuçlara ait s-parametre grafikleri Şekil 3.47 ve 48'de verilmiştir. Birinci parametre grubunda iletken kalınlığı (w_x) 0,52 mm ve FTR'nin kısa kolunun uzunluğu (f_x) 1 mm olarak değiştirilmiş, diğer parametreler Çizelge 3.8'de verilen değerlerde sabit tutulmuştur. Buna göre çift bantlı AFTFSY'nin çalışma bantlarını birbirinden ayıran tepe noktasının (1 no.lu) -5,4 dB'den, FTR parametre değerleri değiştirilerek, -22,07 dB'ye (2.no.lu noktaya) kadar çekildiği Şekil 3.47'den anlaşılmaktadır. 13,3 ile 16,1 GHz aralığında bant durdurma özelliğine sahip olan bu yeni yapının bant genişliği 2,8 GHz olmuştur. Alt ve üst frekans değerleri Eş. 3.2'de yerine koyulduğunda parametreleri değiştirilmiş birinci grup yapının BG_f değerinin %19,05 olduğu hesaplanmıştır. Kesirli bant genişliği değerinin %20'nin altına olması nedeniyle bu yapıda geniş bantlı olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 3.47. AFTFSY ile parametre değerleri değiştirilmiş (1. yapı - Param.) AFTFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması



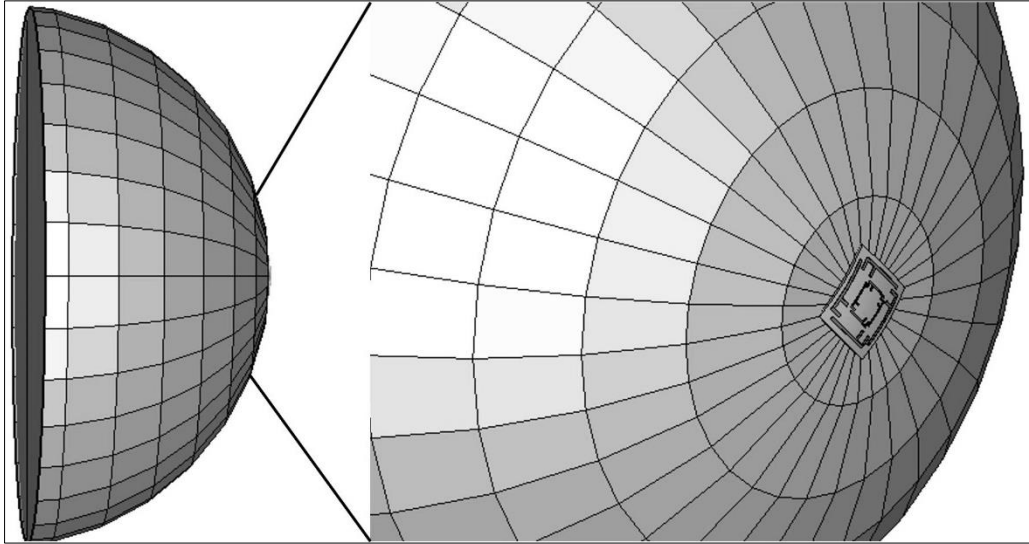
Şekil 3.48. AFTFSY ile parametre değerleri değiştirilmiş (2. yapı - Param.) AFTFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması

İkinci grup parametre değerlerinde AFTFSY yapısının w_x değeri 0,54 mm ve f_x değeri 0,9 mm olarak ayarlanmış, yine birinci grupta olduğu gibi diğer parametre değerleri sabit tutulmuştur. Bu yapının Şekil 3.48'de verilen benzetim sonuçları incelendiğinde çift bantlı AFTFSY'nin 1 no.lu tepe noktası 11,25 dB azalarak -16,65 dB olmuştur. Böylelikle çalışma bandının - 10 dB'deki alt frekansı 13,6 GHz, üst frekansı 16,8 GHz ve bant genişliği 3,2 GHz olarak elde edilmiştir. Bu değerler altında parametreleri değiştirilmiş ikinci grup

yapının kesirli bant genişliği %21,05 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç yapının UGB sınıfında bir tasarıma sahip olduğunu göstermektedir.

3.2.4. AFTFSY'nin konformal yüzeylere uygulanması (radom çalışmaları)

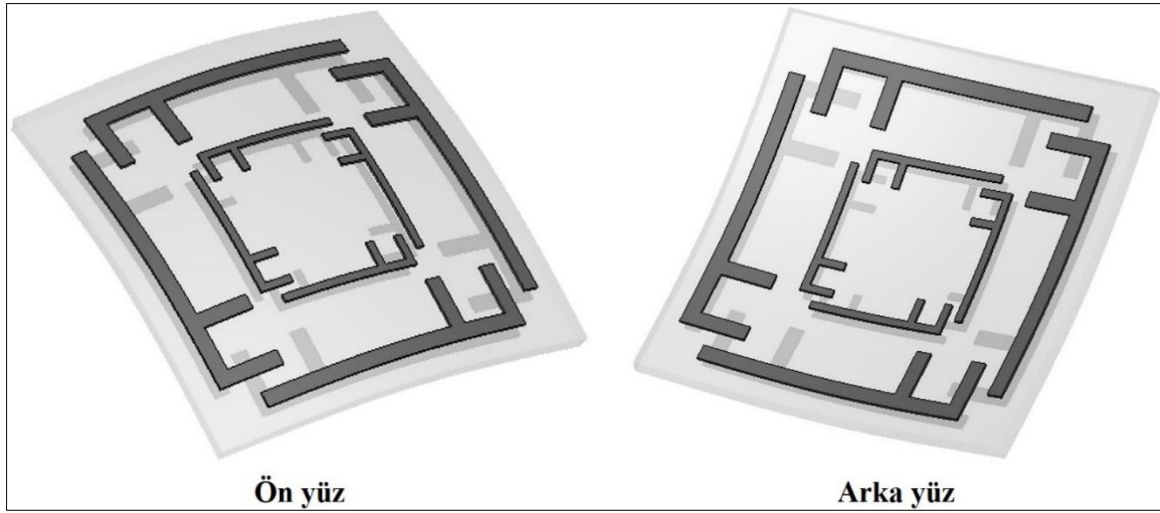
FSY yapıları uygulandığı yüzeylerin benzetim ortamında tasarlandığı gibi her zaman düzlemsel olması beklenmemelidir. Bu bölümde AFTFSY'nin eğik yapılı yüzeylere (konformal) uygulandığında, gelen EM dalganın da açısına bağlı olarak, iletim ve yansıma karakteristiklerindeki değişimin ne boyutta olacağı üzerinde benzetim ortamında çalışılmıştır. Çalışma yüzeyi olarak anten tasarımlarında kullanılan radom yapısı tercih edilmiştir. Radom kelimesi, İngilizce radar ve kubbe anlamına gelen “dome” kelimelerinin birleşiminden meydana gelmektedir. Radar anten yapısının üzerine kapatılan, anten grubunun RF özelliklerini değiştirmeyecek özellikte malzemeden üretilen, bir koruyucu olarak düşünülebilir. Özellikle dış ortamda kullanılan anten yapılarını olumsuz etkiler yaratan toz, su, su buharı, rüzgâr, böcek, havadaki partiküller ve güneşten korunurken aynı zamanda görünürlüğünü azaltarak kısmi gizleme de sağlamaktadır. Şekil 2.16.a'da uçakların burun kısımlarındaki radom yapısına bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.49. Radom tasarımının yandan görünüşü ve konformal radom yüzeyine uygulanmış AFTFSY'nin perspektif görünüşü

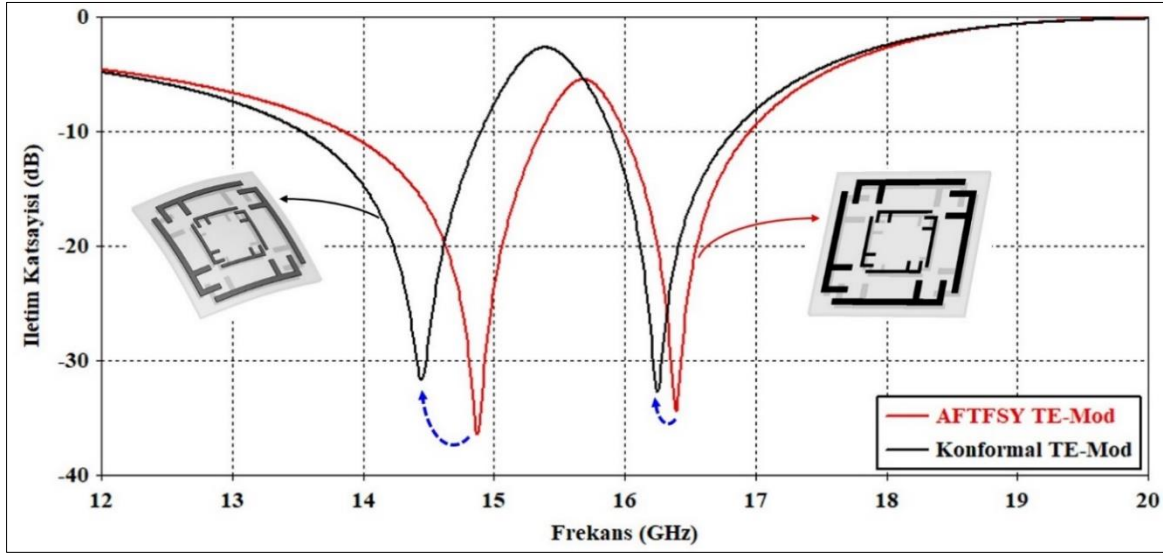
AFTFSY tasarımında eğimli yüzey uygulama alanı olarak uçak/uzay mekiği radomları seçilmiştir. Uçak/uzay mekiği radomları genellikle maksimum geçirgenlikte ve hafiflikte

olması istenmekte olup konformal bir yüzeye sahiptirler. Bu çalışmada sadece önerilen yapının düzlemsel olmayan yüzeylerdeki performans analizi inceleneceğinden yüzey dielektrik malzemesi olarak bölüm 3.1’de detaylı özellikleri verilen Arlon AD 300 kullanılmaya devam edilmiş, özellik içeren elastik malzemeler tercih edilmemiştir. Uçak radomunu temsil etmek için 1 m çapında yarım küre şeklinde Şekil 3.49’da gösterildiği üzere bir yapı tasarlanmıştır. Bu yapının uç kısmına daha önce tasarımı gerçekleştirilen AFTFSY bükülmek suretiyle yerleştirilmiştir. Bükme işlemi sonucunda konformal radom yüzeyine uygulanmış AFTFSY’nin ön yüz ve arka yüzden dimetrik perspektif görünüşü Şekil 3.50’de verilmiştir.



Şekil 3.50. Konformal radom yüzeyine uygulanmış AFTFSY’nin ön yüz ve arka yüzden dimetrik perspektif görünüşü

Benzetim sonucunda elde edilen S-parametre grafiğine göre TE modda yüzey normaline paralel olarak ($\theta=0^\circ$) gelen dalgayla indüklenen konformal yapının birinci rezonans frekansı 14,45 GHz’de ve ikinci rezonans frekansı 16,25 GHz’de oluşmaktadır. Yapının bant durduran filtre davranışı gösterdiği frekans aralığı ise sırasıyla 13,51 ile 14,91 GHz ve 15,88 ile 16,84 GHz’dir. Bant genişliği ise birinci çalışma bandında 1,40 GHz iken ikincisinde 0,96 GHz’dir. Konformal yapı AFTFSY yapısı ile karşılaştırıldığında, yapının bükülmesiyle, rezonans frekanslarının azaldığı Şekil 3.51’den anlaşılmaktadır. AFTFSY’nin birinci rezonans frekansındaki bozulma %2,69, ikincisindeki bozulma ise %0,91’dir. İlk çalışma bandında %7,28 daralma meydana gelirken, ikinci bant aralığının sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 3.51. AFTFSY ile konformal AFTFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de ve TE moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması

Sonuç olarak konformal yüzeylere uygulanması maksadıyla yapısal olarak bükülen AFTFSY'nin performansının bükülme miktarıyla orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Bir metre çapında ve yarım küre şeklindeki radomun yüzeyini kaplayacak şekilde bükülen konformal AFTFSY'nin rezonans frekanslarının belirli bir miktar bozulduğu, ancak AFTFSY rezonans frekansının konformal yapının bant genişliği içinde kaldığı için BDF özelliğini sürdürdüğü anlaşılmaktadır. Buradan, önerilen yapının 1 m çapından daha büyük çaplı yüzeylere uygulandığında bükülme oranı azalacağından karakteristik özelliklerindeki bozulmanın da azalacağı söylenebilir. Çapı 1 m'den az eğimli düzlemler içinse, bükülme oranının artışıyla orantılı olarak özellikle yapının birinci çalışma bandındaki bozulmanın da artacağı anlaşılmaktadır. Bu bozulmaların bükülmeye bağlı olarak yapının parametre değerlerindeki değişiklikten meydana geldiği aşikârdır.

3.3. Çok Bantlı Karakteristiğe Sahip AFTFSY Tasarımı ve Analizi

Çalışmanın gelinen aşamasında öncelikle tek bantlı farklı yapılar tasarlanmıştır. Bu yapıların içerisinde F-tipi tasarım temel FSY birim hücre elemanı olarak seçilmiş ve çift bantlı AFTFSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapının eniyilemesi maksadıyla benzetim ortamında parametrik analizler yapılarak iletim karakteristiklerinin geliştirilmesi üzerinde çalışılmıştır. Bundan sonraki bölümde çok bantlı karakteristiğe sahip FSY tasarımının gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Tasarım sonucunda, en az üç farklı frekans bandı aralığında bant durduran

filtre ve en az iki çalışma bandında bant geçiren filtre özelliğine sahip bir yapı elde edilmesi hedeflenmektedir. Gelen EM dalga açısı 0° ila 60° arasında iken önerilecek yapının açısal kararlılığa sahip ve iletim/yansıma frekanslarındaki bozulma oranının en fazla %2 olması beklenmektedir. Ayrıca tasarımın karakteristik özelliklerine ait benzetim ortamında elde edilen verilerin farklı yöntemlerle, özellikle matematiksel olarak hesaplanarak, doğrulanması önem arz etmektedir. Son olarak önerilen çok bantlı karakteristiğe sahip AFTFSY'nin çalışma bantlarının (rezonans frekanslarının) uygulanabilir bir alanda kullanılabilir olması hedeflenmektedir.

Belirtilen tasarım hedeflerine ve kısıtlamalarına ulaşmak için sırasıyla aşağıdaki aşamalar uygulanmıştır.

- Bilgisayar destekli benzetim programı (CST) ile istenilen kriterler doğrultusunda FSY birim hücre tasarımı,
- Birim hücrenin parametre analizi yöntemiyle optimizasyonu ve CST ile iletim ve yansıma özelliklerinin elde edilmesi,
- Önerilen yapının iletim karakteristiğini tahmin etmek ve analiz etmek için eşdeğer devre modelinin (EDM) çıkarılması,
- Benzetim ve EDM sonuçlarını karşılaştırarak verilerin doğrulanması,
- Önerilen yapının imalatı ve uygun bir deneysel kurulum ortamı oluşturarak iletim özelliklerinin ölçülmesi,
- Benzetim ve ölçüm sonuçlarını karşılaştırarak üretilen FSY'nin doğrulanması.

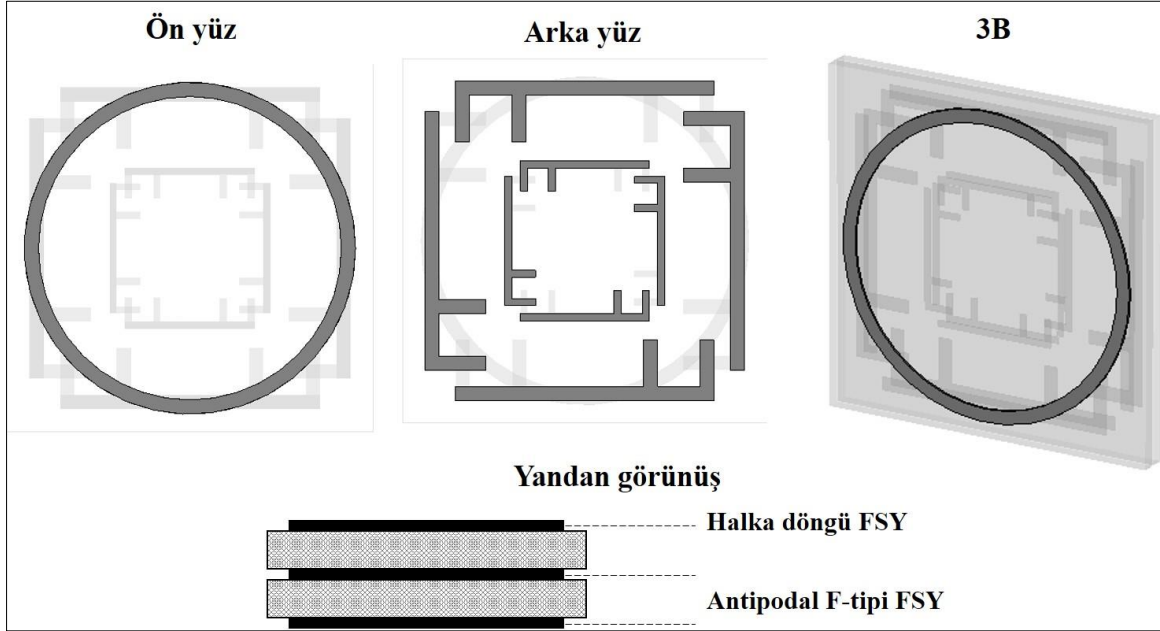
3.3.1. Çift bant AFTFSY'den çok bantlı yapıya geçiş aşamaları

Literatürde çok bantlı yapıları elde etmek için üç farklı yöntem kullanılmıştır [3]. Bunlar,

- Tek katmanlı fraktal yapılar,
- Çok katmanlı yapılar,
- İç içe yapılar (çerçeve eleman) tasarlamaktır.

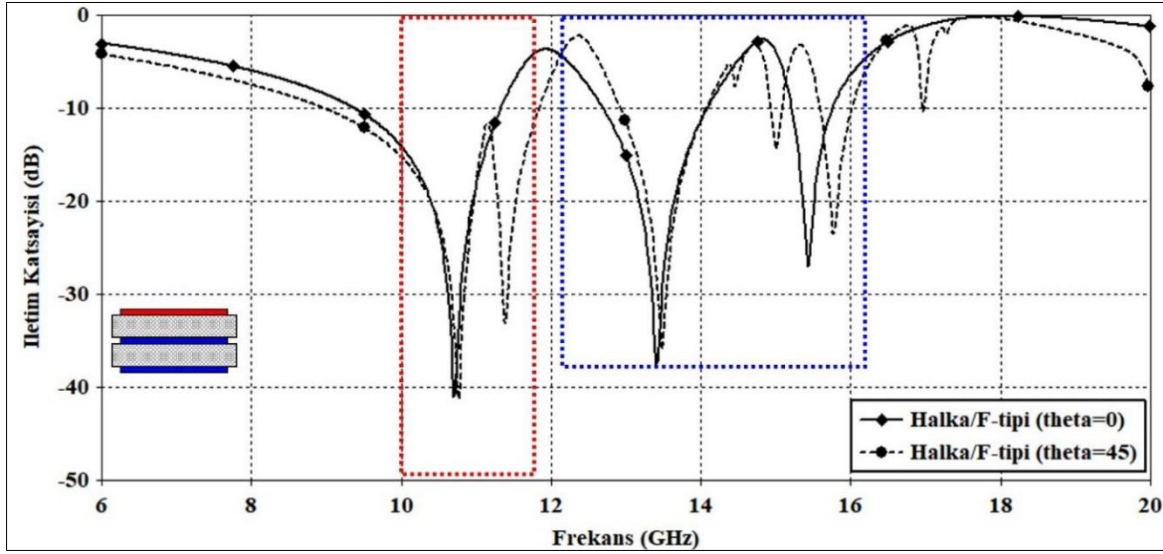
Fraktal yapılar, düzenli veya düzensiz olarak kendisini belirli bir ölçek doğrultusunda tekrarlayan tasarımlardır. FSY'lerde kompakt yapılar elde etmek, çok bantlı frekans tepkisi üretmek, bant genişliğini iyileştirmek ve eleman boyutlarını küçültmek maksadıyla tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında FSY'nin temel elemanı olarak F-tipi iletken (FTR) yapılar tercih edilmiştir. Ancak çok bantlı karakteristiğe sahip bir FSY elde etmek için çift bantlı AFTFSY yapısını fraktal bir yapıya dönüştürmek AFTFSY'nin karakteristik ve yapısal

özelliklerini tamamen değiştirecektir. Bundan dolayı tek katmanlı fraktal tasarım yöntemi tercih edilmemiştir.



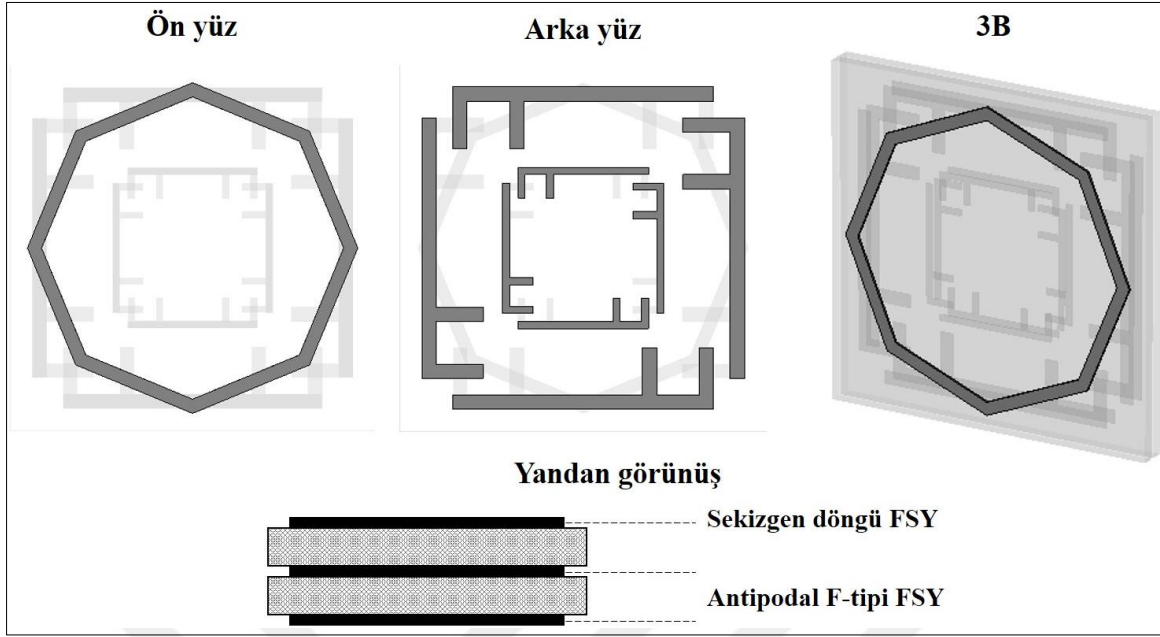
Şekil 3.52. Halka döngü FSY ve çift bantlı AFTFSY'nin üst üste yerleştirilmesiyle elde edilen çok katmanlı yapının önden, arkadan, yandan ve 3B görünüşü

Diğer bir yöntem ise çok katmanlı (kaskad) yapılar tasarlamaktır. Bu tür yapılar; ardışık frekans bantlarının ayrılması, daha geniş iletim ve yansıma bantlarının elde edilmesi ve çok bantlı karakteristik bir yapı oluşturulması amacıyla tercih edilmektedir. Çift bantlı AFTFSY, bir dielektrik malzemenin alt ve üst yüzeyine iletken FTR'ler yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Eğer bu yapının üstüne farklı frekans bandında iletim karakteristiği sergileyen bir FSY yapısı eklenirse bant sayının artacağı değerlendirilmektedir. İlk olarak en basit yapılardan birisi olan ve bölüm 3.1'de detaylı olarak incelenen halka döngü FSY ile AFTFSY kaskad olarak üst üste yerleştirilmiştir. Halka döngü FSY'nin alt yüzü AFTFSY'nin üst yüzeyindeki FTR ile birebir örtüşmektedir (temas etmektedir). Yapıların alttaşı özellikleri ve boyutları ($7,75 \times 7,75 \text{ mm}^2$) aynıdır. Halka döngü iletkenin kalınlığı 0,3 mm, yarı çapı 3,5 mm'dir. Halka / F-tipi çok katmanlı FSY'nin (HF-FSY) önden, arkadan, yandan ve 3B görünüşü Şekil 3.52'de verilmiştir.



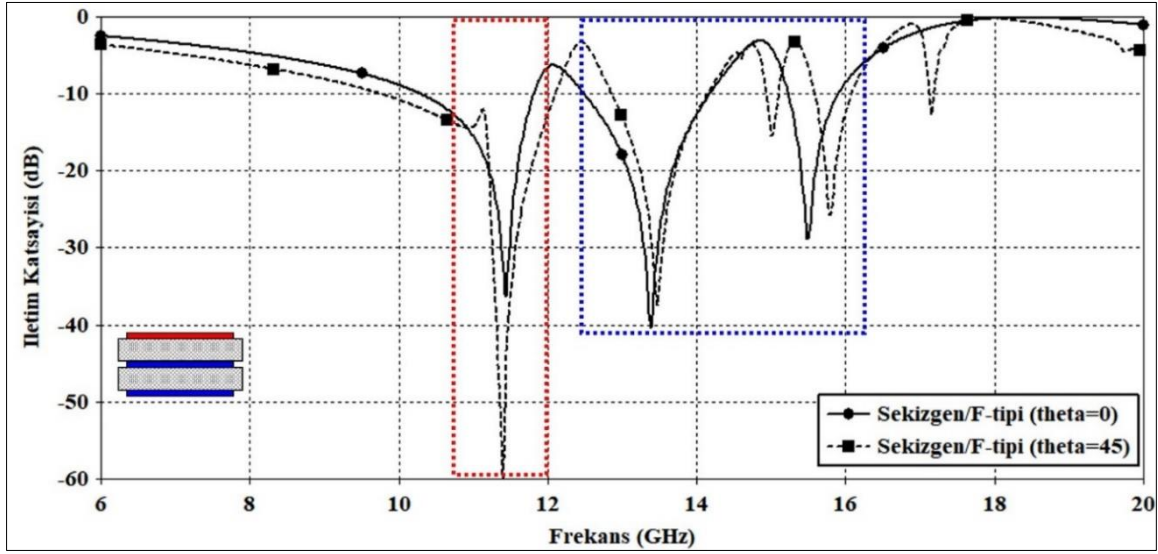
Şekil 3.53. Farklı θ açıları için çok katmanlı halka / F-tipi FSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği

Benzetim sonucunda elde edilen S-parametre grafiğine göre TE modda yüzey normaline paralel olarak ($\theta = 0^\circ$) gelen dalgayla indüklenen HF-FSY yapısının üç farklı frekans bandında BDF ve iki farklı frekans bandında BGF özelliği gösterdiği anlaşılmaktadır. Yapının birinci rezonans frekansı 10,7 GHz, iletim katsayısı -41 dB ve bant genişliği 1,98 GHz'dir. İkinci rezonans frekansı 13,4 GHz ve -37,5 dB'de, üçüncüsü ise 15,4 GHz ve -27 dB'de oluşmaktadır. Halka döngü ve antipodal yapının karakteristik özellikleri çok katmanlı FSY'ninkine karşılaştırıldığında birinci frekans bandının halka döngü yapısından, diğer bantların ise AFTFSY'den kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Şekil 3.53 incelendiğinde EM dalga yüzeye 45° 'lik açıyla geldiğinde TE modda çok bantlı yapının iletim karakteristiğinde bazı bozulmaların yaşandığı görülmektedir. Rezonans frekanslarındaki bu bozulma değeri (RFB) sırasıyla %0,47, %0,45 ve %2,2'dir. Özellikle üçüncü frekans bandındaki bozulma yapının bu bant aralığındaki BDF özelliğini değiştirmektedir. Ayrıca 11,4 GHz'de -32 dB derinliğinde ve 15 GHz'de -13 dB derinliğinde oluşan istenmeyen ışınlamalar çok bantlı yapının 11,95 GHz ve 14,85 GHz'de gösterdiği BGF özelliğinin kaybolmasına neden olmaktadır.



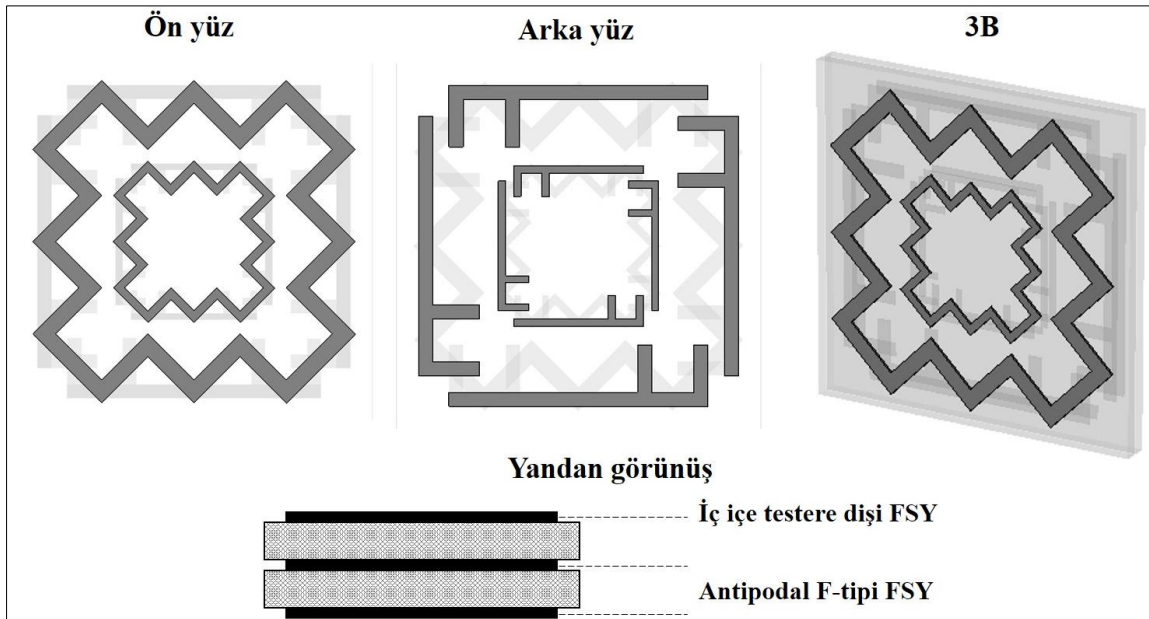
Şekil 3.54. Sekizgen döngü FSY ve çift bantlı AFTFSY'nin üst üste yerleştirilmesiyle elde edilen çok katmanlı yapının önden, arkadan, yandan ve 3B görünüşü

Kaskad yapıda, çok katmanlı eleman olarak halka döngü FSY yerine sekizgen döngü yapı kullanıldığında oluşan görünüm Şekil 3.54'te sunulmuştur. Halka döngü ile sekizgen döngünün altta merkezine olan uzaklıkları ve iletken genişlikleri birbirine eşittir. Sekizgen / F-tipi FSY (SF-FSY) tıpkı HF-FSY yapısında olduğu gibi üç farklı durdurma bandına (rezonans frekansları sırasıyla 11,43 GHz; 13,38 GHz; 15,45 GHz) sahiptir. Gelen EM dalganın yüzey normaliyle yaptığı açı 45° olduğunda SF-FSY'nin ilk frekans bandında ufak bir bozulma görünse de HF-FSY'de görüldüğü gibi ilave bir rezonans frekansı oluşmamaktadır. Bu durdurma bandında BG değeri 1,52 GHz'den 2,38 GHz'e yükselmekte ve rezonans frekansı 11,43 GHz'den 11,39 GHz'e gerilemektedir. BDF özelliğindeki ikinci ve üçüncü rezonans frekanslarında ise bozulma oranı sırasıyla %0,67 ve %1,94'tür. HF-FSY'ye kıyasla SF-FSY'nin ikinci rezonans frekansındaki bozulma oranı daha yüksek, üçüncüsünde ise daha düşüktür. Ancak, Şekil 3.55'ten de anlaşılabileceği üzere, $\theta=45^\circ$ iken 15,58-16,08 GHz aralığındaki üçüncü durdurma bandı istenen rezonans frekansını ($\theta=0^\circ$ 'de 15,49 GHz) kapsamadığından yani durduramayacağından SF-FSY yapısının θ açısı arttıkça kararsızlaştığını söyleyebiliriz.



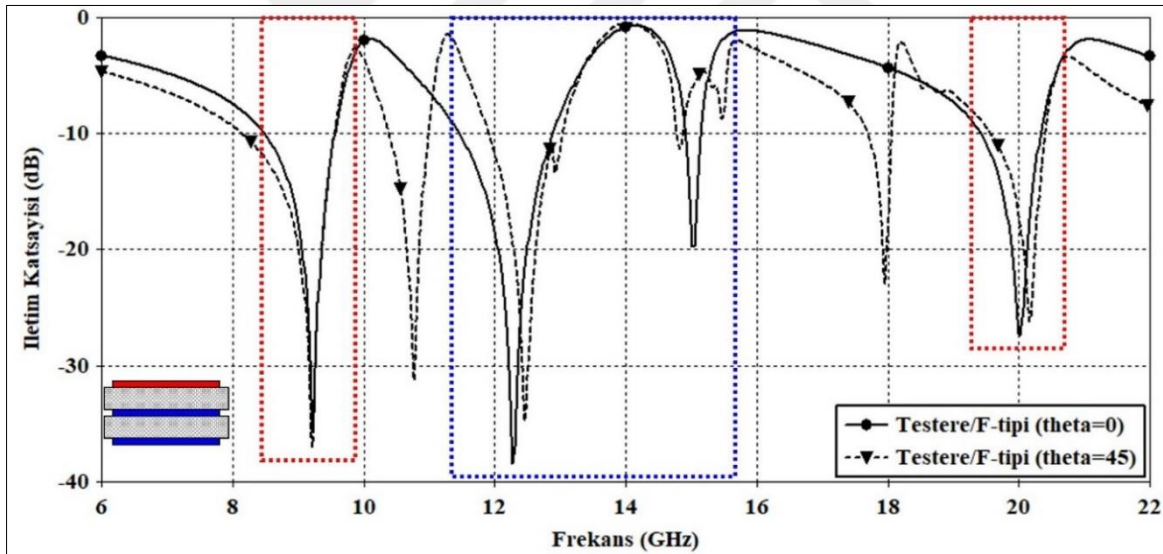
Şekil 3.55. Farklı θ açıları için çok katmanlı sekizgen/F-tipi FSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği

Çok katmanlı tasarım yönteminde son olarak iç içe testere dişi FSY yapısı kullanılmıştır. Bölüm 3.1'de belirtildiği üzere bu yapının açısal kararlılığı diğer tek bantlı yapılara nazaran daha iyidir. Bundan dolayı AFTFSY ile oluşturulacak kaskad yapıda da açısal kararlılığın yüksek olması beklenmektedir. Tıpkı HF-FSY ve SF-FSY'de olduğu gibi Testere / F-tipi kaskad FSY'de (TF-FSY) AFTFSY'nin üst yüzeyine yerleştirilmiştir. TF-FSY tasarımının farklı yönlerden görünüşü Şekil 3.56'da verilmiştir.



Şekil 3.56. İç içe testere dişi FSY ve çift bantlı AFTFSY'nin üst üste yerleştirilmesiyle elde edilen çok katmanlı yapının önden, arkadan, yandan ve 3B görünüşü

TF-FSY yapısının TE modda bant durduran filtre karakteristiği incelendiğinde (Şekil 3.57), dört farklı durdurma bandına sahip olduğu görülmektedir. θ açısı 0° olduğunda 12,45 GHz ile 15 GHz'deki ikinci ve üçüncü rezonans frekansının F-tipi FSY'den, 9,2 GHz ile 20 GHz'deki rezonans frekanslarının ise iç içe testere dişi FSY'den kaynaklandığı anlaşılmaktadır. HF- ve SF-FSY yapılarıyla karşılaştırıldığında dört farklı BDF özelliğine sahip çalışma bandının olması bir avantaj olarak görünse de θ açısı arttığında yapının karakteristik özellikleri bozulmaktadır. $\theta=45^\circ$ olduğunda; birinci rezonans frekansı değişmezken, ikinci ve dördüncü rezonans frekanslarında sırasıyla %1,44 ve %0,75 oranında bir bozulma meydana gelmektedir. Üçüncü frekans bandı ise tamamen bozularak BDF özelliği kaybolmaktadır. Bunun yanı sıra birinci ve ikinci f_r arasında 10,75 GHz'de -31 dB derinliğinde ilave bir f_r oluşmaktadır. Oluşan bu istenmeyen f_r 'den dolayı 10,1 GHz'deki BGF özelliğindeki iletim frekansı da yok olmaktadır. Sonuç olarak TF-FSY yapısının açısal kararlılığının θ açısı arttıkça azaldığı anlaşılmaktadır.

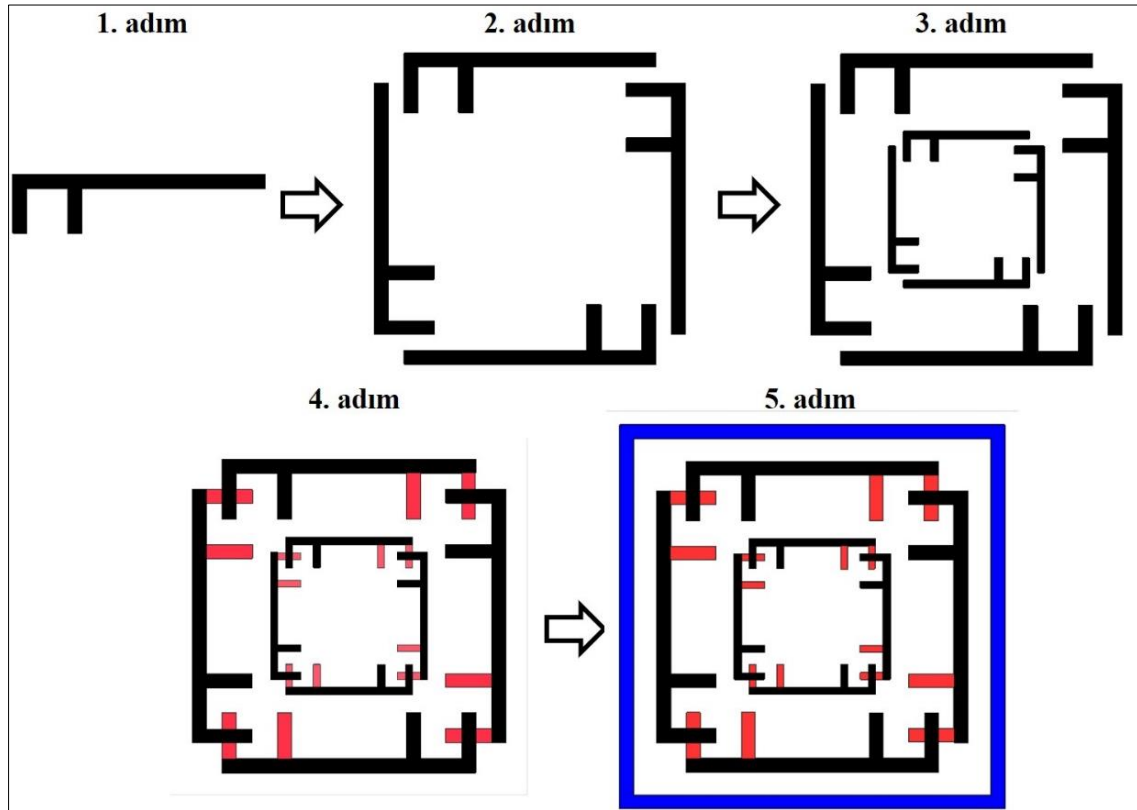


Şekil 3.57. Farklı θ açıları için çok katmanlı testere/F-tipi FSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği

Çok bantlı karakteristiğe sahip antipodal F-tipi yapıyı içeren bir FSY elde edebilmek için benzetim ortamında kaskad yöntemiyle üç farklı tasarım gerçekleştirilmiştir. Her bir tasarım sonucunda bant sayısı artırılarak en az üç farklı frekans bandı aralığında BDF özelliği gösteren yapılar elde edilmiştir. Ancak gelen EM dalga açısı 45° iken yapıların açısal kararlılıklarının bozulduğu, çalışma bantları arasında istenmeyen rezonans frekanslarının oluştuğu, bundan dolayı BGF özelliğindeki iletim bantlarının kaybolduğu gözlemlenmiştir.

Bu durumdan aslında çok bantlı bir yapı elde etmenin kolay olduğu anlaşılmaktadır. Asıl problem ise, her bir çalışma bandının gösterdiği karakteristik özelliklerin EM dalganın farklı geliş açılarında bozulmadan kararlı olarak kalmasını sağlamaktır. Bunun yanında çok katmanlı yapıların en büyük dezavantajı üretiminin zor ve düşük frekans bantlarında yüksek BG sahip çalışma bantları elde etmenin güç oluşudur. Bundan dolayı tez çalışmasının devamında çok bantlı yapıları elde etmek için diğer bir tasarım çeşidi olan iç içe yapılar (Çerçeve Eleman) yöntemi kullanılmıştır.

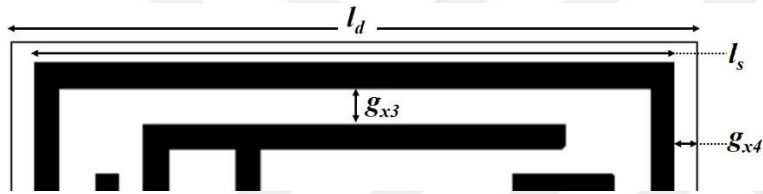
3.3.2. Uygulanabilir çok bantlı karakteristiğe sahip AFTFSY (ÇBKFSY) tasarımı



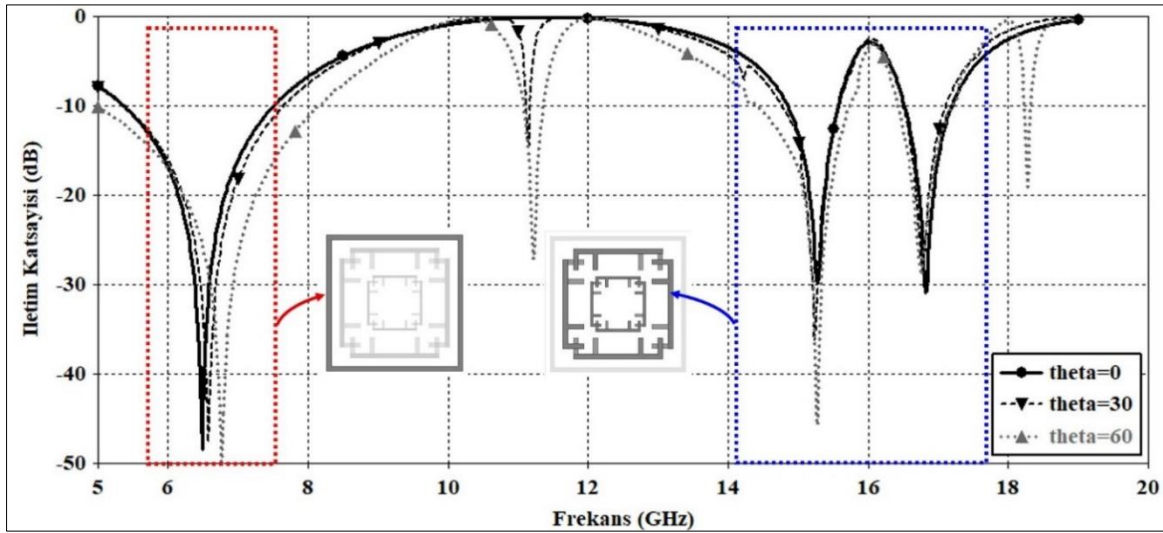
Şekil 3.58. İç içe F-tipi FSY'nin tasarım aşamaları; 1. Adım - F-tipi FSY modelinin temel rezonans elemanı (FTR), 2. adım - F-tipi FSY'nin birim eleman yapısı, 3. Adım - iç içe F-tipi FSY'nin birim eleman yapısı, 4. Adım - Çift bant antipodal F-tipi FSY'nin (AFTFSY) ve son adım - çok bantlı karakteristiğe sahip AFTFSY (ÇBKFSY) tasarımı

Çok bantlı tasarım yöntemlerinden tek katmanlı fraktal yapıların F-tipi yapılar ile uyumsuz olması, kaskad yapıların ise eğik açılarda gelen EM dalgaya verdiği tepkilerin kararsız ve üretiminin zor olması nedeniyle tez çalışmasında bant sayısını artırmak için çerçeve eleman tasarımı kullanılmıştır. Çerçeve eleman olarak farklı geometrik şekiller kullanılması

mümkündür. Ancak kullanılacak eleman yapısı ne kadar karmaşık olursa AFTFSY ile simetriklik uyumu o kadar az olacak, bu durum da yapının açısal kararlılığını azaltacaktır. Ayrıca karmaşık yapıların çerçeve eleman olarak kullanılması dielektrik alttaşın yüzey büyüklüğünü artıracağından FSY'nin birim hücre yapısı kompakt bir yapıya sahip olmayacaktır. Çok bantlı FSY'nin temel yapı taşı AFTFSY incelendiğinde genel itibariyle karesel biçimde olduğu görülmekte, bu sebeple yapının simetrikliğine en uygun elemanın kare döngü olduğu anlaşılmaktadır. Ancak Çizelge 3.7'deki verilere göre kare döngü iletkenin θ açısı 45° iken rezonans frekansındaki bozulma (RFB) oranı hem TE hem de TM polarizeli dalgada %2'den büyük olduğu için çok bantlı yapının açısal kararlılığını sağlayabilmek maksadıyla AFTFSY yapısında ve dielektrik alttaş büyüklüğünde parametresel olarak değişiklik yapılması kaçınılmazdır.



Şekil 3.59. ÇBKFSY'nin tasarımında AFTFSY'den farklı olarak kullanılan parametreler



Şekil 3.60. Farklı θ açıları için ÇBKFSY'nin TE moddaki S-parametre grafiği

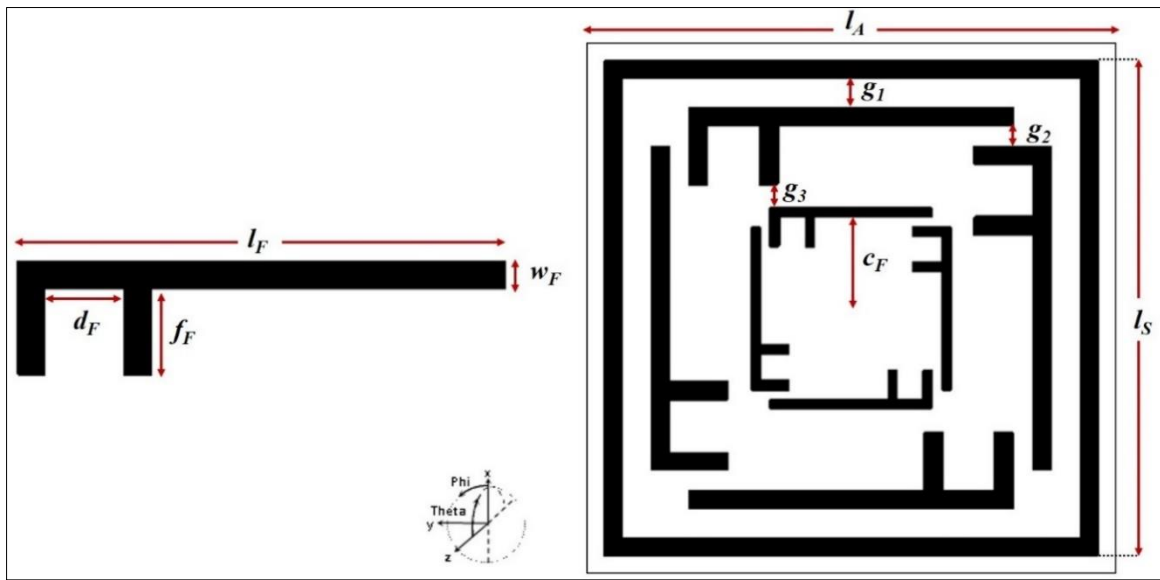
Çok bantlı karakteristiğe sahip AFTFSY'nin (ÇBKFSY) tasarım aşamaları Şekil 3.58'de verilmiştir. Burada belirtilen ilk dört adım bölüm 3.2.1'de detaylı olarak anlatılmıştır. Beşinci adımda AFTFSY'nin üst yüzeyindeki FTR'lerin etrafını çevreleyecek şekilde ve

aynı genişlikte (w) iletken bir kare döngü eleman (mavi renkli) eklenmiştir. Buradaki önemli nokta kare döngü yapının sadece alttaşın üst yüzeyine eklenmesidir. Alt yüzeydeki AFTFSY yapısı aynen korunmuştur. Kare döngü yapı ile dış FTR arasındaki boşluk (g_{x3}) 0,5 mm, kare döngünün dıştan uzunluğu (l_s) 8,4 mm, dielektrik alttaşın dış kenarı ile l_s arasındaki boşluk (g_{x4}) 0,3 mm ve dielektrik alttaşın birim uzunluğu (l_d) 9 mm'dir. ÇBKFSY'nin tasarımında AFTFSY'den farklı olarak ilave edilen parametreler Şekil 3.59'da gösterilmiştir.

Benzetim sonuçları incelendiğinde ÇBKFSY'nin üç farklı frekans bandında BDF, iki farklı frekans bandında BGF özelliğini sergilediği görülmektedir (Şekil 3.60). EM dalga yüzeye dik açıyla geldiğinde yapının ilk rezonansı 6,5 GHz'de oluşurken ikinci ve üçüncü rezonansları sırasıyla 15,25 ve 16,8 GHz frekanslarında belirlemektedir. Gelen EM dalga 6,5 GHz frekansında 47,3 dB zayıflarken, 15,25 GHz frekansında 29,8 dB ve 16,8 GHz'de 30,7 dB kadar zayıflamaktadır. ÇBKFSY yapısı bant geçirme özelliğini en çok 11,5 ve 16 GHz frekanslarında gösterirken, gelen dalga bu frekanslarda sırasıyla 0,04 ve 2,6 dB zayıflamakta, yani sinyalin birinci frekansta %99,6'sı geçerken ikincisinde yaklaşık olarak %74'ü geçmektedir. AFTFSY yapısına bağlı olarak ikinci ve üçüncü rezonans frekanslarının oluştuğu, kare döngü iletkenin yapıya eklenmesiyle birlikte birinci rezonans frekansının meydana geldiğini söyleyebiliriz. Antipodal F-tipi iletkenlerin boyutlarında herhangi bir değişiklik olmasa da rezonans frekansları 14,85 GHz'den 15,25 GHz'e ve 16,4 GHz'den 16,8 GHz'e ötelenmiştir. İki frekans bandının genişlikleri ise 1,51 GHz ve 0,96 GHz'den sırasıyla 0,75 ve 0,7 GHz'e gerilemiştir. Rezonans frekanslarındaki ve BG değerlerindeki bu değişimin, dielektrik malzemenin boyutunun 7,75 mm'den 9 mm'ye artmasından ve dış FTR'ler ile kare döngü iletken yapı arasında meydana gelen girişim (kapasitif) etkisinden kaynaklandığını ifade edebiliriz. Gelen EM dalganın yüzeye yaptığı açı arttığında oluşan değişimin TE moddaki eğrisi Şekil 3.60'da verilmiştir. Buna göre θ açısı 60° olduğunda birinci rezonans frekansındaki bozulma miktarı 0,25 GHz iken, ikincisinde 0,01 GHz ve üçüncüsünde 0,07 GHz'dir. BDF özelliğindeki bant genişliklerine bakıldığında üçüncü çalışma bandının genişliğinde kayda değer bir değişim olmadığı, birinci ve ikinci çalışma bant genişliklerinin ise sırasıyla 2,13 GHz'den 3,16 GHz'e ve 0,75 GHz'den 1,31 GHz'e arttığı görülmektedir. Ayrıca 11,2 GHz'de -25 dB derinliğinde istenmeyen bir rezonans meydana gelmiştir.

Çok bantlı karakteristiğe sahip bir yapı elde edilirken bu bölümün başında belirlenen hedeflere ulaşabilmek önem arz etmektedir. Bu kapsamda ÇBKFSY'nin birinci rezonans

frekansındaki RFB oranının %2'nin altına düşürülmesi ve θ değeri arttıkça oluşan istenmeyen rezonansların yok edilmesi gerekmektedir. Bir yanda da bu yapıya ait çalışma bantlarının (rezonans frekanslarının) uygulanabilir bir alanda kullanılabilir olması sağlanmalıdır. Kullanılabilirlik bakımından çalışma frekanslarını belirlemeden diğer kusurların giderilmesi anlamsız olacağından (her iki durumda da yapının parametre değeri değişecektir.) öncelikle bu konuya ağırlık verilmiştir. Ayrıca ÇBKFSY yapısının rezonans frekanslılarını belirleyecek boyutları hesaplarken laboratuvarında kullanılacak sistemlerin özellikleri de (baskı devre prototip kazıma cihazı ve vektör ağ analizörü) dikkate alınmıştır.



Şekil 3.61. UÇBFSY'nin birim hücre yapısı ve uzunluk parametreleri

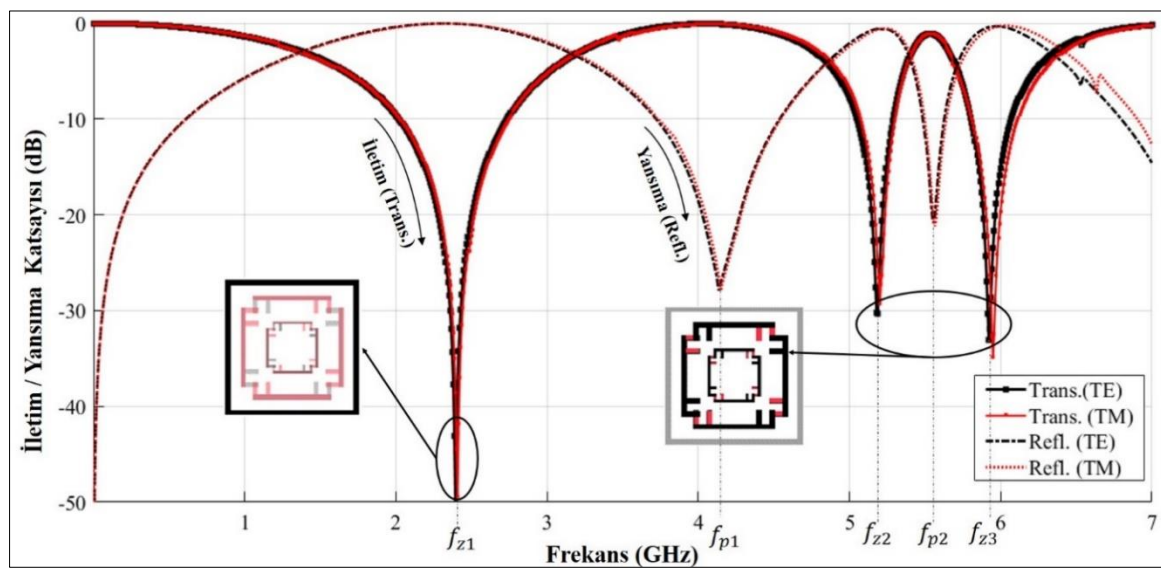
Uygulama alanı olarak kablosuz haberleşme ve uydu sistemlerinde filtreleme özelliği gösteren bir tasarım hedeflenmektedir. Bu FSY tasarımı WLAN (Wireless Local Area Network) ve WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) kablosuz haberleşme sistemlerinden yayılan EM dalgaları filtreleyebilecek aynı zamanda C-bant uydu haberleşmesinde istenen sinyalleri geçirebilecektir. Belirtilen sistemleri içeren frekans bandı 2 ila 8 GHz aralığında olduğu için ÇBKFSY yapısının boyutlarının yeniden düzenlenmesi gerekmektedir.

Uygulanabilir çok bantlı karakteristiğe sahip FSY'nin (UÇBFSY) birim hücre yapısı ve uzunluk parametreleri Şekil 3.61'de sunulmuş, parametre değerleri ise Çizelge 3.10'da verilmiştir. ÇBKFSY ile karşılaştırıldığında uygulanabilir yapının birim hücre boyutunun ve FTR'nin uzun kolunun yaklaşık olarak 2,8 kat, FTR'nin kısa kolları arasındaki mesafenin

1,9, FTR'nin kısa kollarının 1,9 kat, iletken genişliğinin ise 2,3 kat arttığı görülmektedir. Ölçek çarpanı, bir çarpım oranını ifade ettiği için değeri değişmemiştir. Ölçeklendirilmiş içteki FTR'lerin uzunlukları mevcut parametrelerin sf değeriyle çarpımı sonucunda bulunmaktadır. Her bir parametrenin artış oranının birbirinden farklı olmasının nedeni UÇBFSY ve ÇBKFSY'deki çalışma frekanslarının birbirinden farklı aralıklarda olması ve yapının büyümesiyle eş orantılı değişmemesidir. Bu değişikliklere ilave olarak uygulanabilir yapıda gerekli karakteristik özellikleri sağlayabilmek için dielektrik alttaş olarak Arlon AD 300 yerine bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 3,38, kayıp tanjant değeri ($\tan \delta$) 0,0027 ve kalınlığı (sub_h) 0,5 mm olan Rogers 4003C kullanılmıştır.

Çizelge 3.10. UÇBFSY ve ÇBKFSY parametre değerlerinin karşılaştırılması

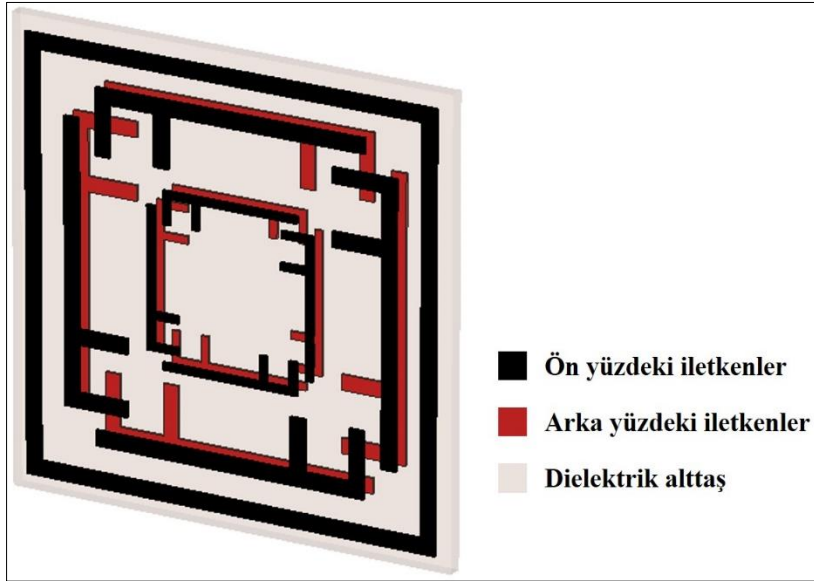
Parametre		l_A	l_S	l_F	d_F	f_F	c_F	w_F	g_1	g_2	g_3	sf
		mm										
Değer	UÇBFSY	25,2	23,3	15,2	1,7	2,4	4,4	0,7	1,56	1,2	1,6	0,5
	ÇBKFSY	9	8,4	5,5	0,9	1	3,4	0,3	0,5	0,42	0,74	0,5
Artış oranı		2,80	2,77	2,76	1,89	2,40	1,29	2,33	3,12	2,86	2,16	1,0



Şekil 3.62. UÇBFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de TE ve TM moddaki iletim (trans.) ve yansıma (refl.) karakteristiği

Yüzey normaline paralel olarak ($\theta=0^\circ$) gelen dalgayla indüklenen UÇBFSY yapısının benzetim sonucunda elde edilen S-parametre grafiğine göre üç farklı frekans bandında BDF ve iki farklı çalışma bandında BGF özelliğini sergilediği görülmektedir (Şekil 3.62). UÇBFSY'nin ilk rezonans frekansı (f_{z1}) 2.4 GHz'de oluşurken gelen EM dalga f_{z1} 'de 50,2 dB zayıflamaktadır. -10 dB'deki ilk durdurma bandı 1,98-2,76 GHz frekansları arasında 0,78 GHz genişliğindedir. UÇBFSY bu frekans bandıyla 2.4 GHz (802.11b/g/n/ax – IEEE protokolü) frekansında çalışan kablosuz haberleşme ve 2,5 GHz frekansında çalışan WiMAX (802.16a/b – IEEE protokolü) sistemlerinin istenmeyen sinyalleri engelleyebilecektir. BDF özelliğindeki ikinci rezonans frekansı (f_{z2}) 5,2 GHz'de ve iletim katsayısı -30,3 dB derinliğinde meydana gelmektedir. Bant genişliği 5,05-5,35 GHz aralığında 0,3 GHz'dir. Önerilen yapı ikinci durdurma bandıyla IEEE'nin 802.11j protokolünde belirtilen 5,03-5,33 GHz arasında çalışan WLAN sistemlerinin frekanslarını filtreleyebilecektir. Son durdurma frekansı (f_{z3}) ise 5,9 GHz'de rezonans olurken iletim katsayısı -32,9 dB ve bant genişliği 0,3 GHz'dir (5,78-6,08 GHz). Üçüncü durdurma bandı ile 5,8 GHz'de çalışan WiMAX (IEEE'nin 802.16a/b protokolü) ve 5.9 GHz frekansında çalışan (5.850-5.925 GHz aralığında) WLAN (802.11p – IEEE protokolü) sistemlerinden yayılan sinyalleri engelleyebilecektir. UÇBFSY'nin Şekil 3.62'de verilen yansıma karakteristiği incelendiğinde 1-7 GHz arasında iki farklı rezonans frekansına (f_{p1} ve f_{p2}) sahip olduğu görülmektedir. Birinci geçirme frekansı 4.1 GHz'de oluşurken ikincisi 5,5 GHz'de meydana gelmektedir. BGF özelliği sergileyen çalışma bantlarının yansıma katsayıları sırasıyla -27,9 dB ve -21,8 dB, bant genişlikleri ise sırasıyla 3,7-4,55 GHz aralığında 0,85 GHz ve 5,45-5,65 GHz aralığında 0,2 GHz'dir. BGF frekanslarıyla çalışma bandının genişliği aralığındaki C-Bant uydu haberleşme sistemlerinden yayılan EM dalgaları iletebilecektir.

Alttaşın üst yüzeyine FTR'leri çevrelemek için çerçeve elemanı olarak yerleştirilen iletken kare döngü sayesinde BDF özelliği gösteren ilk frekans f_{z1} oluşmaktadır. Dielektrik alttaşın üst yüzeyine yerleştirilen FTR'lerin bir sonucu olarak ikinci durdurma frekansı f_{z2} elde edilmektedir. Alttaşın alt yüzeyine üstteki FTR'lerin antipodali olarak yerleştirilen iç ve dış F-tipi iletkenler sayesinde ise üçüncü durdurma rezonans frekansı f_{z3} meydana gelmektedir. Oluşan her bir frekans bandı yapıların karakteristik özelliklerini gösterirken aynı zamanda iletken yapıların kendi aralarındaki etkileşimin de bu frekans bantlarının oluşmasında etkisi büyüktür. Bu durum eşdeğer devre analizinde detaylı olarak açıklanacaktır. Önerilen UÇBFSY birim hücresinin 3B görünüşü Şekil 3.63'te verilmiştir.



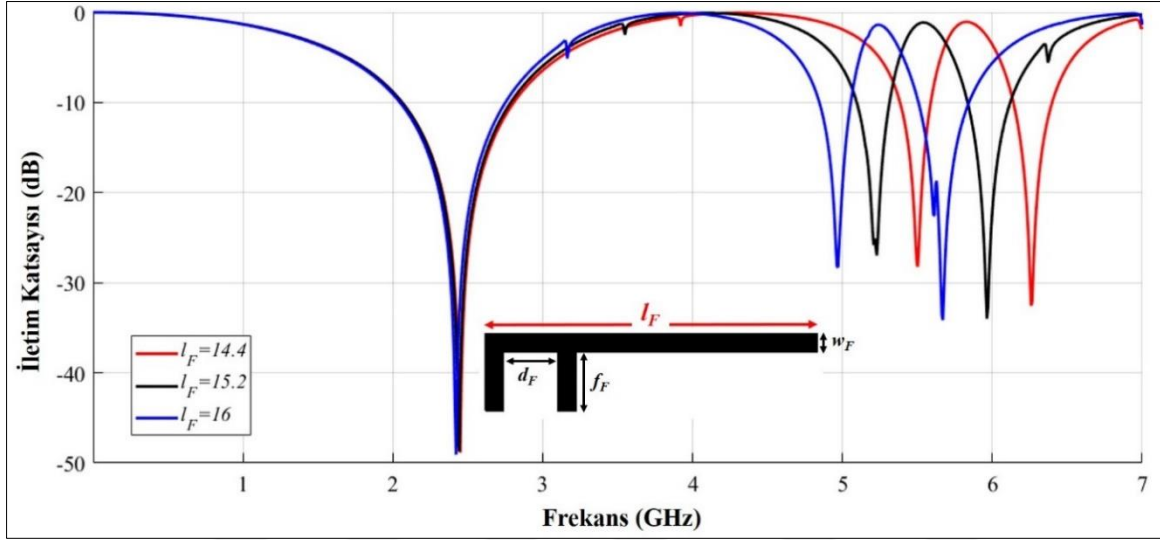
Şekil 3.63. UÇBFSY'deki iletken elemanların dielektrik alttaş üzerindeki yerleşimini gösteren üç boyutlu birim eleman yapısı

3.3.3. UÇBFSY'nin parametrik ve benzetim analizleri

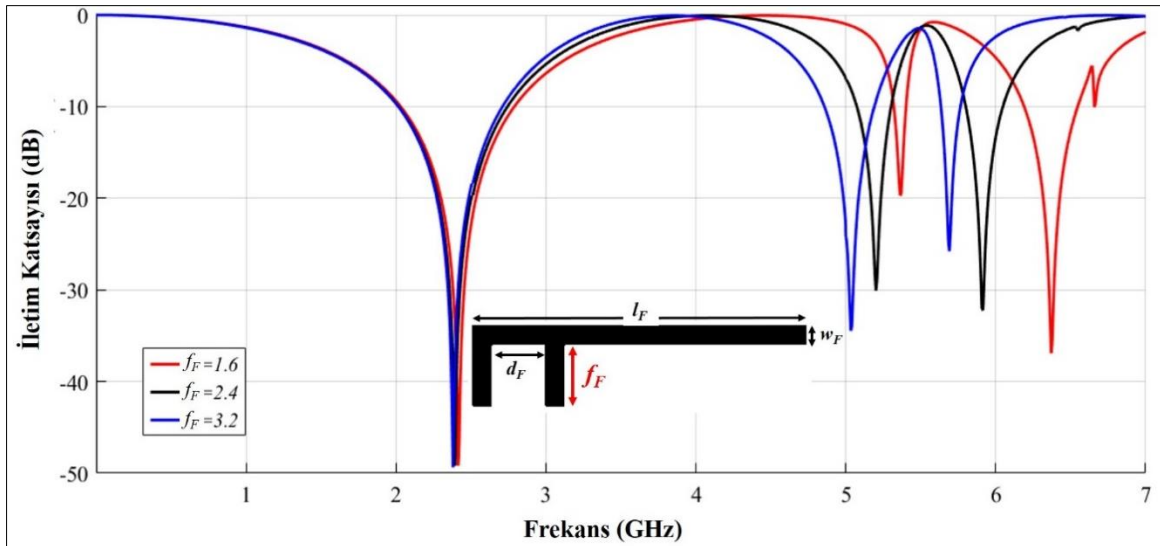
Bölüm 3.2.2'de çift bantlı AFTFSY yapısının parametre değerleri detaylı olarak incelenmiş ve değişen parametre değerlerinin FSY üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu bölümde üç farklı frekans bandında istenmeyen sinyalleri engelleyebilen ve iki farklı frekans bandında iletişim imkânı sunan UÇBFSY'nin karakteristik özelliklerini etkileyen parametreler ile kare döngü iletkenin parametresel değişim üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Parametre analizinde gelen EM dalganın TE modda yüzeye paralel (θ parametresi hariç) olarak geldiği kabul edilmiş ve bir parametre değeri değiştirilirken diğer parametreler Çizelge 3.10'daki değerlerinde sabit tutulmuştur.

İlk incelenen parametre değeri F-tipi iletkenin uzunluğunu ifade eden l_F parametresidir. Parametrenin 14,4 mm ile 16 mm arasında üç farklı değerde benzetim analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarını içeren Şekil 3.64'teki grafik incelendiğinde l_F değerinin artmasıyla kare döngü iletken sayesinde oluşan f_{z1} 'in değişmediği görülmektedir. Bu sonuç l_F 'nin kare döngü yapıdan bağımsız olduğunu göstermektedir. Bunun nedenini kare döngünün bir kenarı (l_s) ile FTR'nin uzun kolu arasındaki mesafenin (g_1), yani iki iletken arasında oluşan kapasitif etkininin, değişmemesi olarak belirtebiliriz. Diğer iki durdurma frekansında (f_{z2} ve f_{z3}) ise l_F 'den kaynaklanan değişim tıpkı AFTFSY yapısında olduğu gibidir. Parametre değeri arttıkça; durdurma bantlarının genişlikleri değişmezken BDF özelliğindeki ikinci ve üçüncü

rezonans frekanslarının sırasıyla 5,5 GHz'den 4,95 GHz'e ve 6,2 GHz'den 5,6 GHz'e düştüğü, iletim bantlarındaki f_{p1} ve f_{p2} rezonans frekanslarının ise sırasıyla 4,3 GHz'den 3,9 GHz'e ve 5,85 GHz'den 5,25 GHz'e gerilediği görülmektedir. Sonuç olarak l_F değerindeki her bir 0,8 mm'lik artışın rezonans frekanslarında 0,2 ila 0,25 GHz aralığında bir azalmaya neden olduğunu söyleyebiliriz.

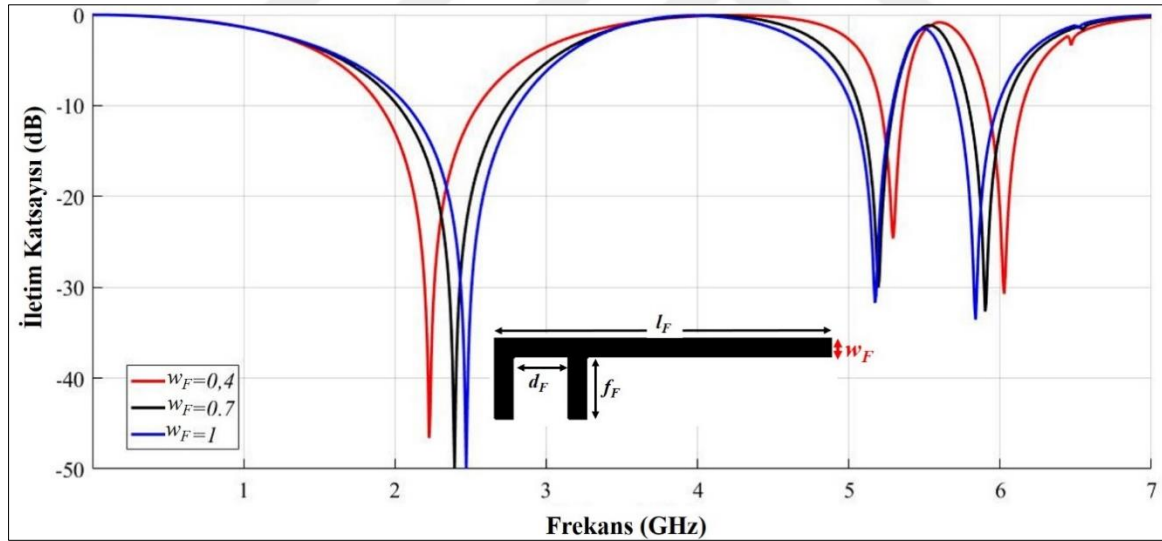


Şekil 3.64. l_F parametresinin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği



Şekil 3.65. f_F parametresinin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

İkinci olarak incelenen parametre değeri F-tipi iletkenin kısa kolunun uzunluğunu ifade eden f_F parametresidir. 1,6 mm ile 3,2 mm arasında değişen üç farklı f_F değerinde UÇBFSY'nin gösterdiği performans Şekil 3.65'te verilmiştir. Tıpkı l_F parametresinde olduğu gibi bu parametre değerindeki değişimin f_{z1} üzerinde bir etkisi yoktur. Bunun sebebi, iletken yüzeyinde oluşan akımlar nedeniyle kare döngü yapı ile FTR'nin kısa kolu arasında bir etkileşim meydana gelmemesidir. Parametre değerindeki artış, f_{z2} rezonans frekansının BG değerini arttırarak belirginleşmesini sağlarken f_{z3} rezonans frekansının, tam tersi, BG değeri azalarak belirginliğini yitirmesine sebep olmaktadır. Ayrıca f_F değerindeki artış oranıyla ters orantılı olarak f_{z2} ve f_{z3} değerlerinde (her bir 0,8 mm'lik artışta ortalama f_{z2} 'de 0,15 GHz'lik ve f_{z3} 'te 0,35 GHz'lik) düşme gözlemlenmektedir. İletim frekanslarında ise, f_{p1} 'de 0,35 GHz'lik bir azalma yaşanırken f_{p2} 'de önemli bir değişim (0,04 GHz'den daha az) meydana gelmemektedir. FTR'nin kısa kolunun uzunluğu ikinci ve üçüncü rezonans frekanslarında önemli bir değişken olarak göze çarparken iki rezonans frekansının benzer karakteristikler gösterdiği 2,4 mm değeri f_F parametresi için en uygun değer olarak bulunmuştur.

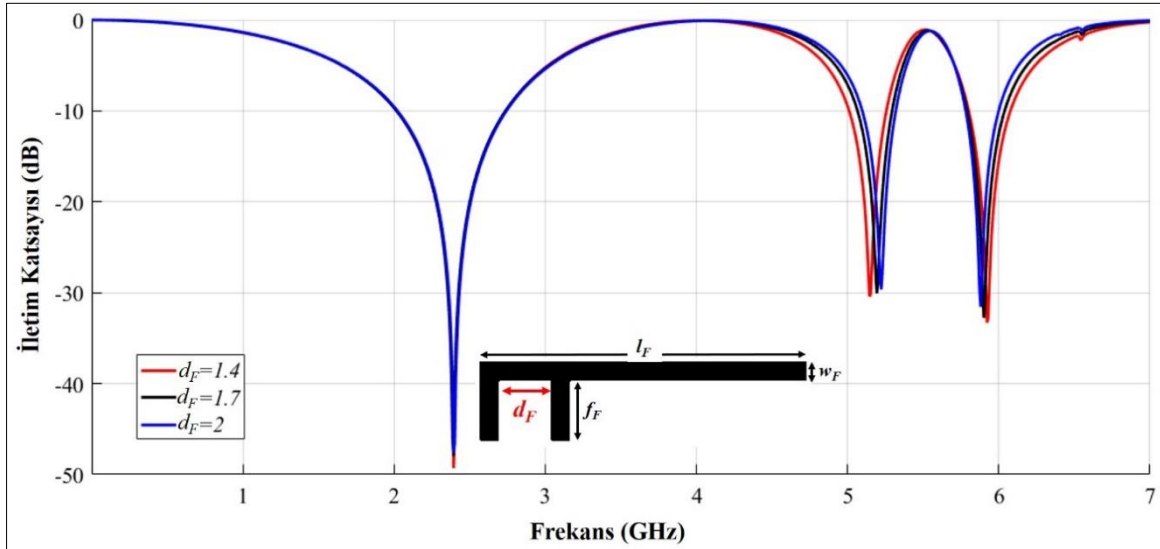


Şekil 3.66. w_F parametresinin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

FSY'lerin rezonans frekansını etkileyen faktörlerden birisinin iletken kalınlığı olduğundan bölüm 2.3.1'de bahsedilmiştir. UÇBFSY'de iletken kalınlığını ifade eden w_F parametresinin 0,4; 0,8 ve 1,2 mm değerinde yapı üzerindeki etkisini gösteren S-parametre grafiği Şekil 3.66'da sunulmuştur. Grafik incelendiğinde w_F değerinin artışıyla birlikte tüm durdurma bantlarında bir değişim gözlemlenmektedir. Parametre artışıyla doğru orantılı olarak f_{z1} 2,2 GHz'den 2,5 GHz'e yükselmektedir. Bunun nedeni w_F değerinin artışıyla birlikte kare döngü

iletken ile dıştaki FTR arasındaki mesafenin (g_1) azalması olarak gösterilebilir. Aradaki mesafenin azalması iki iletken arasında oluşan kapasitif değeri değiştirecek, bu değişim rezonans frekansının yükselmesini sağlayacaktır. İlk durdurma frekansındaki (f_{z1}) tepkinin tam tersi f_{z2} ve f_{z3} 'te bir azalma meydana gelmekte, rezonans frekansları sırasıyla 5,3 GHz'den 5,15 GHz'e ve 6 GHz'den 5,8 GHz'e gerilemektedir. İletim frekanslarında da benzer şekilde bir azalma (f_{p1} 'de 0,15 GHz'lik, f_{p2} 'de 0,3 GHz'lik) gözlemlenmektedir. İletim ve yansıma bantlarındaki bu değişimi iletken kalınlıklarındaki artışla birlikte elemanlar arasındaki mesafenin (g_1 , g_2 ve g_3) değişmesine bağlayabiliriz.

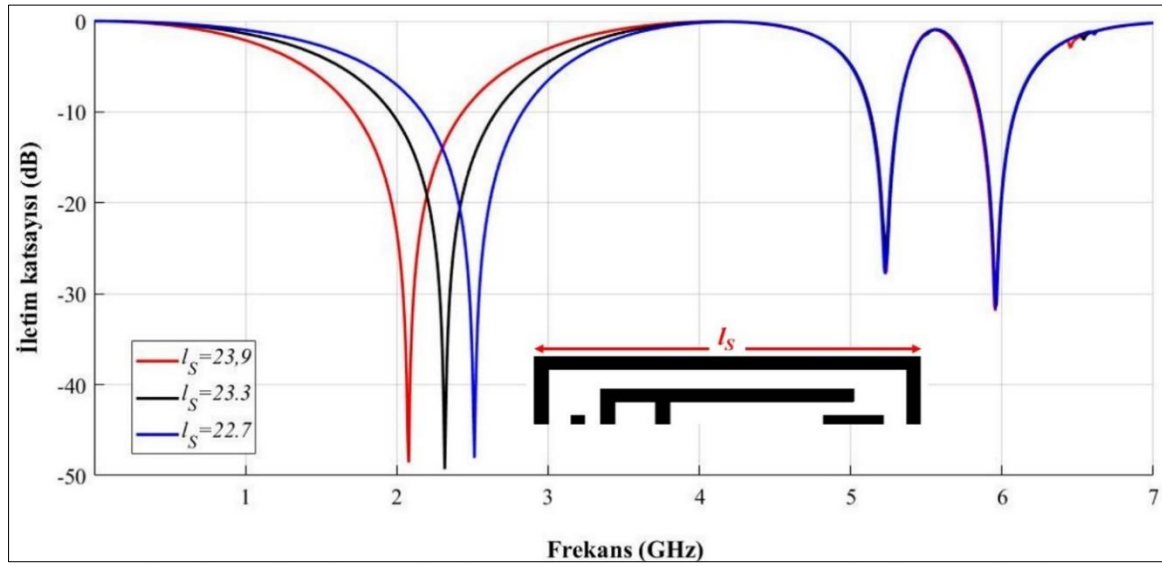
FTR iletkeninin analiz edilen bir diğer parametresi F 'in kısa kolları arasındaki mesafeyi ifade eden d_F 'dir. Parametrenin artışı ile f_{z1} 'de herhangi bir değişim gözlemlenmezken f_{z2} ve f_{z3} frekanslarının arasındaki genişlik azalmıştır. Parametrenin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren S-parametre grafiği (Şekil 3.67) incelendiğinde d_F 1,4 mm iken iki rezonans frekansı arasındaki genişlik 0,8 GHz'dir, parametre değeri 2 mm'ye yükseldiğinde f_{z2} ve f_{z3} arasındaki genişlik 0,6 GHz'e düşmektedir. İletim frekanslarında ise kayda değer bir değişim olmadığı açıkça görülmektedir. Kısacası bu parametre değeri ile birbirine yakın iki durdurma frekansı (f_{z2} ve f_{z3}) arasındaki bant genişliğini değiştirebilmektedir.



Şekil 3.67. d_F parametresinin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

Son olarak UÇBFSY'de çerçeve eleman olarak kullanılan kare döngü iletken rezonatörün bir kenar uzunluğunu ifade eden l_s parametresi incelenmiştir. Bölüm 2.3.1'de bant durduran

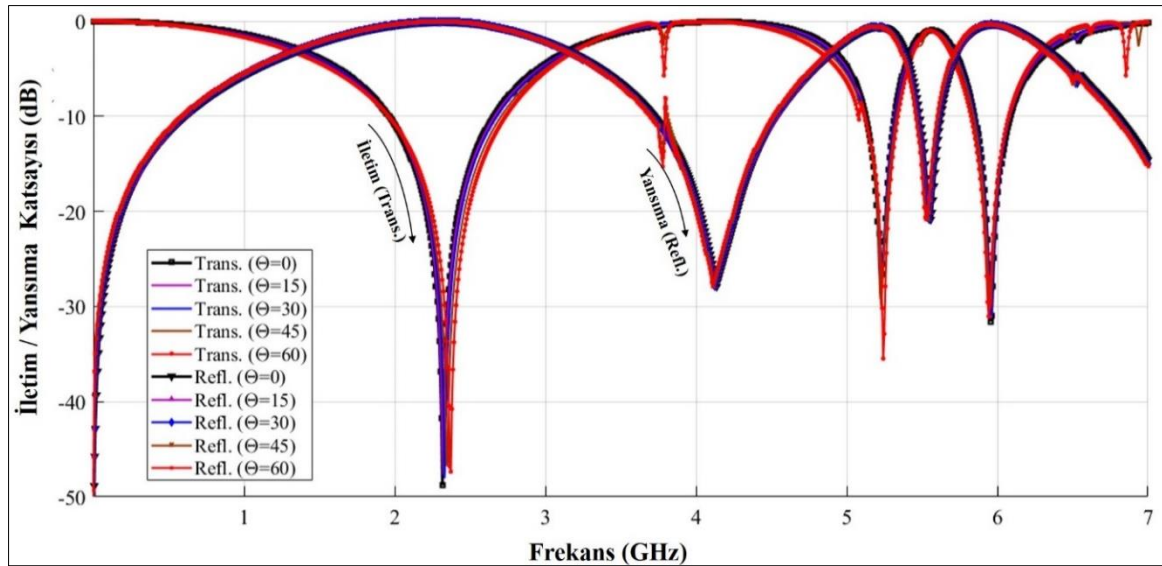
filtre karakteristiğine sahip kare döngü FSY'nin rezonans frekansının birim kenar uzunluğuna bağlı olarak değişeceğinden bahsedilmiştir. Şekil 3.68'deki S-parametre grafiği incelendiğinde f_{z2} ve f_{z3} 'te herhangi bir değişim gözlemlenmezken, f_{z1} 'in l_s parametresinin artışıyla ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Parametre değeri 22.7 mm iken birinci durdurma frekansı 2.55 GHz'de, 23,9 mm iken 2,1 GHz'de oluşmaktadır. Sonuç olarak bu parametre uzunluğunun FTR yapılarından bağımsız olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.68. l_s parametresinin UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

FSY tasarımının sahip olması gereken ve bölümün başında belirtilen isterlerden birisi de yapının θ açısı arttıkça karakteristik özelliklerini koruması, diğer bir deyişle açısal kararlı olmasıdır. Yüzeye geliş açısı 0° ile 60° arasında değişen TE polarizeli dalgaya karşı UÇBFSY'nin sergilediği performans Şekil 3.69'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde; θ açısı 60° iken BDF özelliğindeki birinci rezonans frekansı 0,04 GHz'lik bir değişimle 2.44 GHz'de oluşmaktadır. f_{z2} 'deki bozulma 0,02 GHz ve f_{z3} 'teki bozulma ise sadece 0,01 GHz olup sırasıyla önerilen yapı 5,22 GHz ve 5.91 GHz'de tam rezonansa girmektedir. UÇBFSY'nin BGF özelliği gösteren çalışma frekanslarında ise sırasıyla 0,005 GHz ile 0,01 GHz'lik bir kayma gözlemlenmektedir. Hem iletim hem de yansıma karakteristiklerindeki çalışma frekanslarının bant genişliklerinde kayda değer bir değişim olmadığı açıkça görülmektedir.

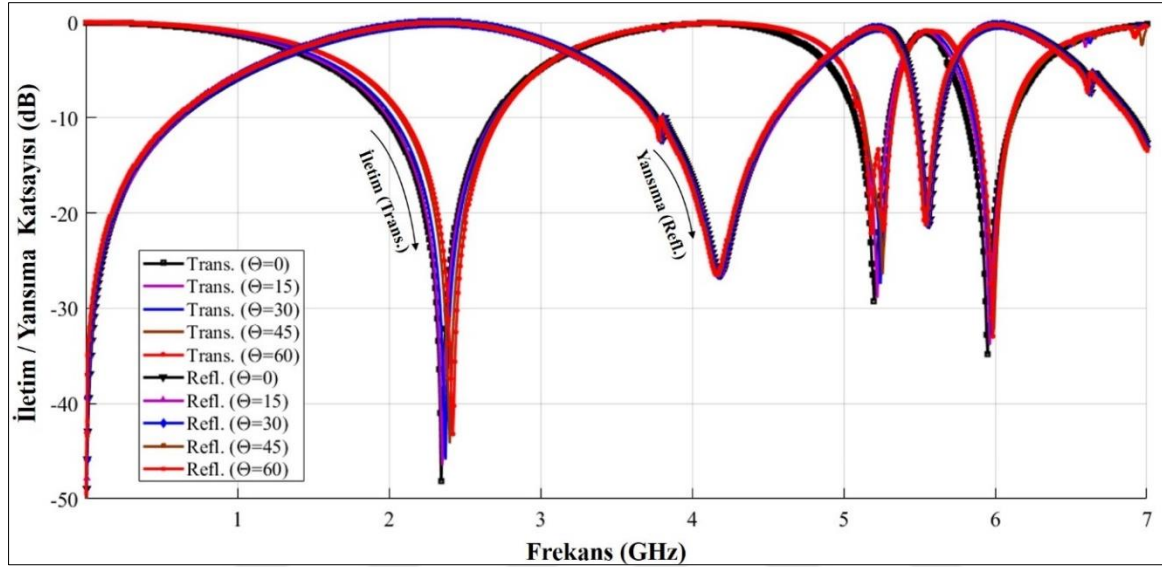
Geliş açısının değişmesi ile sadece rezonans frekansı değişmemekte, aynı zamanda FSY'nin çalışma bandını etkileyen bant genişliğinde de kaymalar ve daralmalar da gözlemlenmektedir. TE modunda UÇBFSY'nin -10 dB'deki kesirli bant genişliği (BG_f) birinci rezonans frekansında %31,25'dir ve ultra geniş bant sınıfında BDF özelliği sergilemektedir. İkinci ve üçüncü rezonans frekanslarında BG_f sırasıyla %5,4 ve %5,25'dir ve çalışma bantları geniş bantlı bir yapıya sahiptir. Bant geçiren filtre özellikleri sergileyen ilk çalışma bandında BG_f 'nin %24,4 ve ikincisinde ise % 6,5 olduğu görülmektedir. Bölüm 3.2.3'te belirtilen sınıflandırmaya göre bant geçiren çalışma bantlarının sırasıyla ultra geniş bantlı ve geniş bantlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.69. Farklı θ açıları için UÇBFSY'nin TE moddaki iletim (trans.) ve yansıma (refl.) karakteristiği

TM modda gelen EM dalganın yüzey normaliyle yaptığı açının artışıyla birlikte UÇBFSY'nin karakteristik özelliklerindeki değişim Şekil 3.70'de sunulmuştur. Geliş açısı 60° olduğunda yapı; BDF özelliğindeki rezonans frekansları sırasıyla 2,45 GHz, 5,24 GHz ve 5,88 GHz'de, BG_f özelliğindeki rezonans frekansları ise sırasıyla 4,08 GHz ile 5,53 GHz'de oluşmaktadır. Önerilen yapının TM modda, TE moddakine benzer şekilde karakteristik özelliklerini (performansını) büyük ölçüde koruduğu, sadece θ açısı 60° iken f_{z2} 'de iletim katsayısının yükseldiği (rezonans derinliğinin azaldığı) ve istenmeyen bir dalgalanma meydana geldiği ancak çalışma BG'lerinde bir değişim olmadığı görülmektedir. Buradan şu sonucu çıkarabiliriz; yapının rezonans frekanslarında geliş açısının artmasıyla birlikte (60° 'ye kadar) 0,05 GHz'den daha küçük değişimler gözlemlense de UÇBFSY'nin

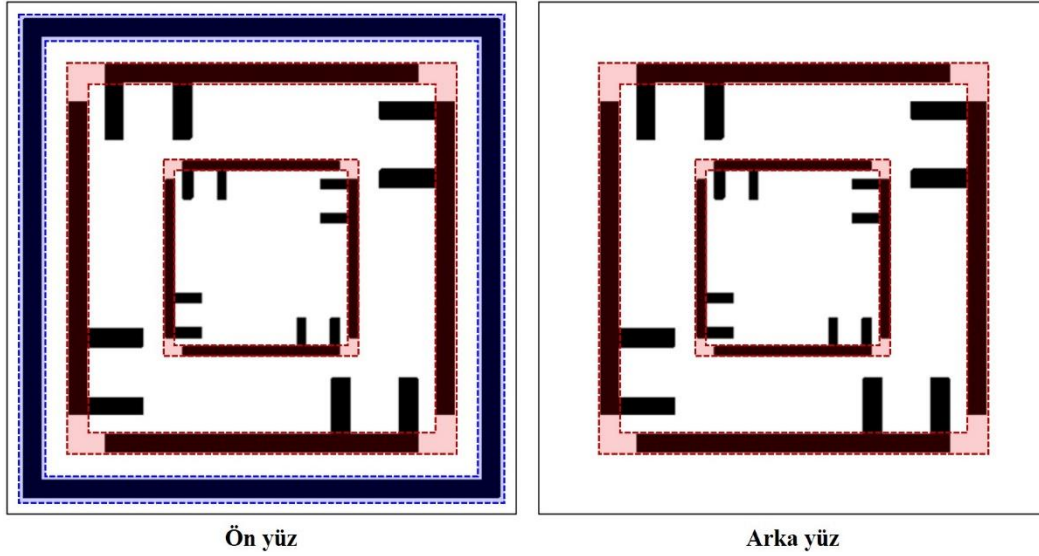
çalışma bandı aralığında kayda değer bir değişim olmadığı, BDF/BGF özelliğini kaybetmediği ve 60° 'ye kadar kararlı bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Tasarımın performans kararlılığı konusundan literatürdeki benzerleriyle karşılaştırılması bölümünde daha detaylı olarak bahsedilecektir.



Şekil 3.70. Farklı θ açıları için UÇBFSY'nin TM moddaki iletim (trans.) ve yansım (refl.) karakteristiği

3.3.4. UÇBFSY'nin eşdeğer devre analizi

Tez çalışmasında geline nokta kadar FSY tasarımını yapmak, bileşenlerinin elektromanyetik (EM) karakteristiklerini analiz etmek ve parametrelerini optimize etmek amacıyla bilgisayara dayalı benzetim programı (CST MWS) kullanılmıştır. Bu bölümde, benzetim ortamında yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin doğruluğunu kanıtlamak için UÇBFSY'nin eşdeğer devre modeli (EDM) çıkarılacak ve eşdeğer devre analizi (EDA) yapılacaktır. Eşdeğer devre belirli bir yapının tüm elektriksel özelliklerini barındıran teorik bir devreyi ifade etmektedir. Bilgisayarlara veya uzun formüllere dayanan analiz yöntemlerinin aksine, EDA karmaşık yapılarının hesaplamasını basitleştiren bir yöntem olarak tercih edilmektedir. FSY'lerdeki iletken ve yalıtkan yapılar EDM'de devre elemanı olarak ifade edilmektedir. En çok kullanılan devre elemanları direnç (R), indüktör (L) ve kondansatördür (C). EDA hakkında detaylı bilgi bölüm 2.5.5'te verilmiştir.



Şekil 3.71. UÇBFSY görünümünün basitleştirilmesi (iç içe kare döngü yapılar)

FSY tasarımları ne kadar karmaşık olursa eşdeğer devre modelini türetmenin o kadar zor olduğu ve bundan dolayı karmaşık yapılarda analiz yöntemi olarak tercih edilmediği bilinmektedir [65]. Bu nedenle FSY'ler için eşdeğer devrelerin oluşturulmasında basitlik başlangıç noktası olarak kabul edilebilir. Tez çalışmasında önerilen UÇBFSY tasarımı incelendiğinde farklı dielektrik alttaşın iki farklı yüzeyine yerleştirilmiş olması ile iç içe ve birbirinden bağımsız iletken yapılardan oluşması yapının karmaşıklığını ortaya koymaktadır. Yapının merkezinden dışa doğru baktığımızda içteki FTR'lerin aslında süresiz bir kare döngüye benzediği farz edilebilir. Şekil 3.71 incelendiğinde basitleştirilmiş UÇBFSY'nin üst yüzeyinde en dıştaki sürekli (mavi kesikli çizgi), içtekiler süresiz (kırmızı kesikli çizgi) olmak üzere üç farklı boyuttaki kare döngü benzeri; alt yüzeyinde ise iç içe süresiz iki kare döngü benzeri iletken yapıdan meydana geldiği görülmektedir. İçteki FTR'lerden oluştuğu farz edilen süresiz kare döngü yapı dıştaki diğer iki kare döngüye (sürekli ve süresiz) nazaran çok çok daha küçük boyutlardadır ve sadece bu yapının etkisiyle oluşabilecek bir rezonans frekansı tez çalışmasındaki bant aralığı (2-8 GHz) dışında kalacaktır. Bundan dolayı içteki süresiz kare döngü yapı eşdeğer devre analizinde ihmal edilmiştir. Dıştaki FTR'lerin oluşturduğu süresiz yapı ile çerçeve eleman olan sürekli yapıya (içi içe bir çift kare döngü benzeri bir yapı) ait eşdeğer devre modelinin paralel bağlanmış iki seri LC devresinden oluşması beklenmektedir [13]. Ayrıca dielektrik malzemenin alt yüzeyindeki antipodal FTR'lerin oluşturduğu süresiz kare döngülerin eşdeğer devreye paralel olarak bağlanan ilave bir seri LC devresi oluşturacağı

değerlendirilmektedir. Sonuç olarak basitleştirilmiş UÇBFSY'nin birbirine paralel üç seri LC devresi benzeri bir EDM'ye sahip olacağı EDA için temel olarak kabul edilmiştir.

Bölüm 2.5.5'te detaylı olarak anlatıldığı üzere; eşdeğer devre analizinde iletken uzunluklar indüktif devre elemanları (indüktör - L) ile, iletkenler arasındaki boşluklar ise kapasitif devre elemanları (kapasitör - C) ile ifade edilmektedir [32]. Basitleştirilmiş EDA'da UÇBFSY'deki kare döngülerin bir kenar uzunluğu (l_S ve l_F) indüktör ve paralel uzunluklar arasındaki boşluklar kapasitörlerle gösterilebilir. Ancak bu durumda, normal bir kare döngü yapının EDA'sı ile UÇBFSY'ninki arasında bir fark olmayacak ve EDA ile UÇBFSY'nin benzetim sonuçları uyumsuz olacaktır. Basitleştirilmiş yapı, UÇBFSY'nin EDA'sı için sadece bir başlangıç noktası olarak kabul edilmelidir. Çünkü UÇBFSY'nin karmaşık yapısı birçok farklı durumun hesaba katılması gerektiğini açıkça göstermektedir. Örneğin eşdeğer devre analizinde FTR'lerin iletken uzunlukları kısa ve uzun kolları kapsayacak şekilde belirtilmesi gerekirken, her bir iletkenin komşu iletkenlerle etkileşimi de ayrı bir kapasitif değer oluşturacağı dikkate alınmalıdır. UÇBFSY'nin EDM'si oluşturulurken elde edilen devre elemanları Marcuvitz [32] tarafından bulunan sonsuz paralel iletken şerit dizisini temsil eden eşitliklerle hesaplanmaktadır. Yan yana birbirine paralel olarak uzanan iletkenler arasındaki C'nin kapasitif suseptansı (B) aşağıda verilen Eş. 3.3 - 3.8 doğrultusunda bulunur [66].

$$\frac{B}{Y_0} = 4 \frac{p \cos \theta}{\lambda} [\ln(\csc \gamma) + G(p, g, \lambda, \theta)] \quad (3.3)$$

$$G(p, g, \lambda, \theta) = \frac{m_1(\alpha)[m_2(\alpha)(K_+ + K_-) + 4\alpha^2 K_+ K_-]}{2[m_2(\alpha) + \alpha^2 m_3(\alpha)(K_+ + K_-) + 2\alpha^6 K_+ K_-]} \quad (3.4)$$

Burada $\alpha = \sin \gamma$ ve $\gamma = (\pi g / 2p)$ olmak üzere, $m_{1,2,3}(\alpha)$ and $K_{\pm}$ sırasıyla,

$$m_1(\alpha) = (1 - \alpha^2) \quad (3.5)$$

$$m_2(\alpha) = \left(1 - \frac{\alpha^2}{4}\right) \quad (3.6)$$

$$m_3(\alpha) = \left(1 - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{\alpha^4}{8}\right) \quad (3.7)$$

$$K_{\pm} = \left[1 \pm \frac{2p}{\lambda} \sin\theta - \left(\frac{p \cos\theta}{\lambda}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

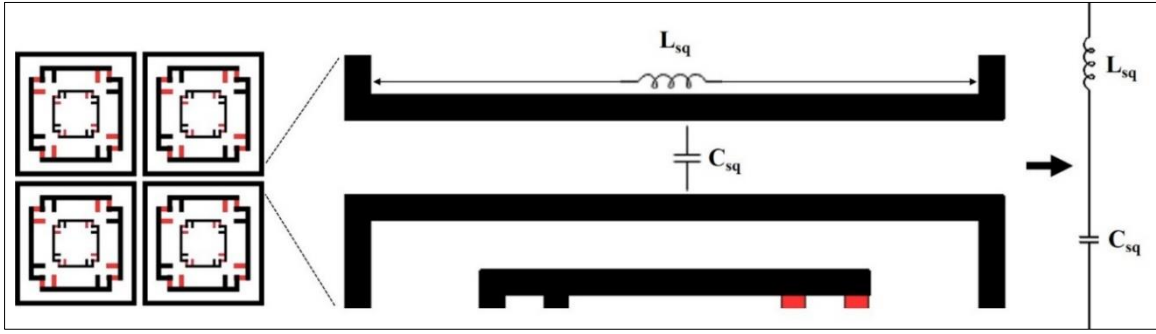
eşitlikleri ile hesaplanır. Burada g , iki iletken arasındaki boşluğu; p , iletkenin periyodikliğini yani periyodunu; λ , dalga boyunu; θ gelen EM dalganın yüzey normaliyle yaptığı açığı ve Y_0 boşluktaki karakteristik admitansı ($Y_0=1/120\pi \Omega$) ifade etmektedir. Bunlara ek olarak iletken kalınlığı sıfır olarak kabul edilmektedir [32]. Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilen süseptans değerinin açısal frekansa (ω) bölünmesiyle kapasitör değeri ($C=B/\omega$) bulunur. Periyodik (dairese) olarak ilerleyen EM dalganın birim zamanda taradığı açı olarak adlandırılan açısal frekans, $\omega=2\pi f$ eşitliğiyle ifade edilmektedir. L'nin indüktif reaktansı (X) ise,

$$\frac{X}{Z_0} = \frac{p \cos\phi}{\lambda} [\ln(\csc\gamma) + G(p, d, \lambda, \phi)] \quad (3.9)$$

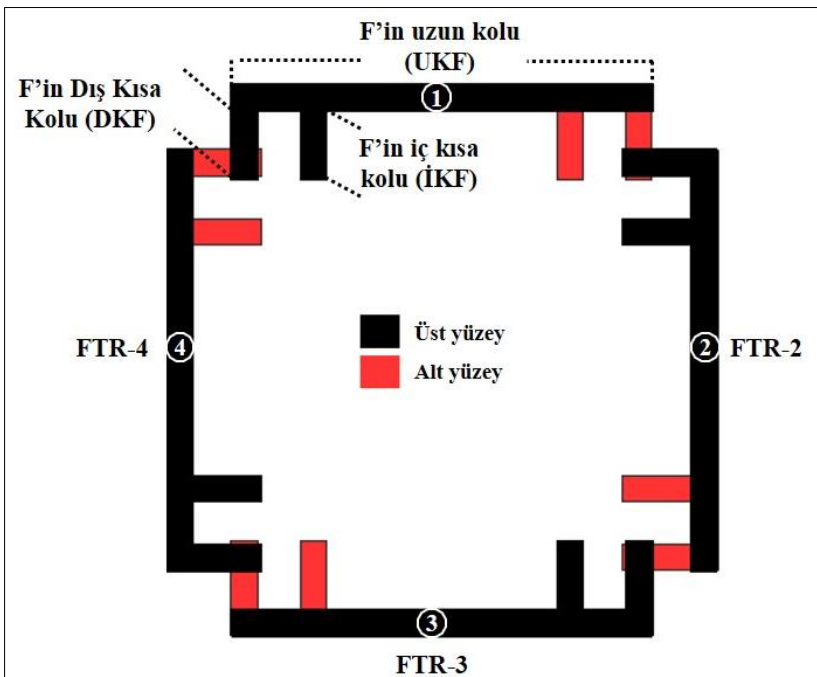
eşitliğiyle hesaplanır. Eş. 3.9'da verilen d , iletkenin uzunluğunu; ϕ gelen EM dalganın yüzey normaliyle yaptığı açığı ve Z_0 , boşluktaki karakteristik empedansı belirtmektedir ($Z_0=377\Omega$). $G(p, g, \lambda, \theta)$ fonksiyonuna benzer şekilde, Eş. 3.4'de g yerine d , θ yerine ϕ ve $\gamma=(\pi g/2p)$ eşitliğindeki g yerine w (iletken kalınlığı) yazılarak $G(p, d, \lambda, \phi)$ fonksiyonu hesaplanır. Eşitlikler sonucunda elde edilen reaktans değerinin açısal frekansa (ω) bölünmesiyle indüktör değeri ($L=X/\omega$) bulunur. Bunlara ilave olarak referans [12]'de belirtildiği gibi, FSY'deki iletken yapıların süreksizliğinden dolayı B ve X değerleri d/p faktörü ile azaltılır. Yukarıda verilen eşitliklerinin uygulanabilmesi için Marcuvitz tarafından belirtilen tek kısıtlama; TE ve TM modlarında elde edilen eşdeğer devrenin dalga boylarının ve geliş açılarının,

$$p(\sin\theta + 1)/\lambda < 1 \quad (X \text{ için } \phi) \quad (3.10)$$

eşitliğini karşılaması gerektiğidir [32].



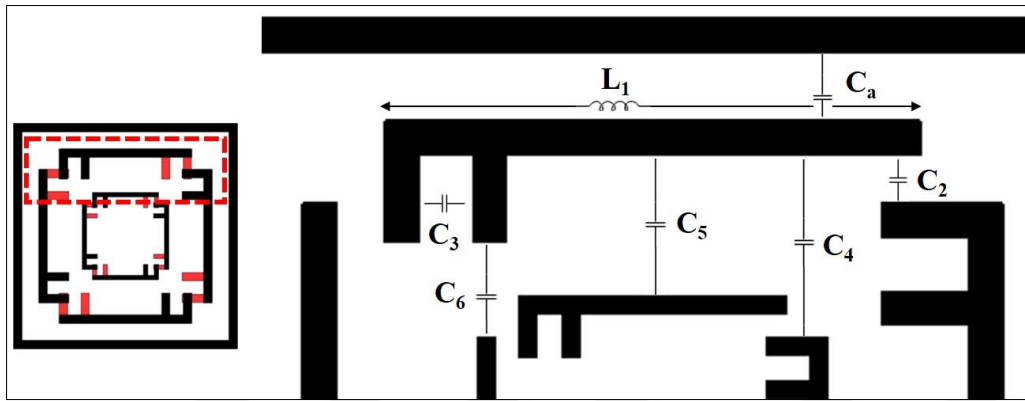
Şekil 3.72. Çerçeve eleman kare döngü yapının eş değer devre analizi



Şekil 3.73. Dört yöne simetrik 90° döndürülmüş FTR'nin parçaları ve ifade şekilleri

UÇBFSY'nin devre modelinde eşdeğer indüktans ve kapasitans değerleri, birim hücre yapısındaki iletkenlerin dıştan içe ve üstten alta doğru üç aşamalı olarak incelenmesiyle bulunmuştur. Kare döngü benzeri dört yöne simetrik yapıların her bir kenarı aynı karakteristik özelliği sergilemektedir. Bundan dolayı bu tür yapıların sadece bir kenarının eşdeğer devre analizinin yapılması, FSY'nin tamamının frekans tepkisini ölçmek için yeterli olmaktadır [34]. Birinci aşamada, önerilen antipodal F-tipi FSY'nin üst yüzeyine çerçeve eleman olarak yerleştirilen kare döngü yapının eş değer devresi çıkarılmıştır. UÇBFSY'nin birbirini takip eden (sonsuz) periyodik bir dizi olduğu varsayıldığında, birim hücre elemanındaki kare döngü ile komşu yapıdaki kare döngü iletkenler arasında bir etkileşim olacaktır. FSY yüzeyine gelen EM dalganın oluşturduğu elektrik alan sayesinde iki iletken

şerit arasında oluşan bu kapasitif etkileşim Şekil 3.72’de gösterildiği gibi C_{sq} eşdeğer kapasitesiyle ifade edilmiştir. Gelen EM dalganın oluşturduğu manyetik alan ise kare döngünün l_s uzunluğundaki bir kenar iletkeninin üzerinde indüktif etki meydana getirir. Bu indüktif etkinin eşdeğer indüktansı ise L_{sq} ile belirtilmiştir. Eşdeğer kapasite Eş. 3.3’te g yerine l_A-l_s , p yerine l_A ve θ yerine 0° ; eşdeğer indüktans ise Eş. 3.9’da d yerine l_s ve ϕ yerine 0° konularak bulunur. Eşdeğer devresi seri bağlı bir LC rezonans devresinden oluşan kare döngü yapı UÇBFSY’nin BDF özelliğindeki birinci rezonans frekansını (f_{z1}) oluşturmaktadır.



Şekil 3.74. Dört yöne simetrik 90° döndürülmüş dış FTR'nin eş değeri devre analizi

İkinci aşamada dielektrik alttaşın üst yüzeyine dört yöne ve merkezden eşit uzaklıkta birbirlerine 90° simetrik olarak yerleştirilmiş iç içe FTR'lerin (dış ve iç FTR'ler) eşdeğer devre modeli analiz edilmiştir. İfade kolaylığı sağlaması için, üst yüzeydeki tüm FTR'ler siyah renkte, alt yüzeydekiler kırmızı renkte gösterilmiş ve saat yönünde numaralandırılmıştır (Şekil 3.73). Yukarıda detaylı olarak belirtildiği üzere 90° döndürülmüş dış FTR'lerin, Şekil 3.71’de belirtildiği gibi süreksiz bir kareye benzediği varsayıldığında, birinci adımda kare döngüde yapıldığı gibi yalnızca bir kenarın, yani yalnızca bir FTR'nin hesaplanması genel yapının karakteristik davranışlarını çözümlmek için yeterli olacaktır. Tıpkı çerçeve eleman olan kare döngü yapıda olduğu gibi gelen EM dalga l_F uzunluğundaki FTR'nin uzun kolu (UKF) ve f_F uzunluğundaki FTR'nin dıştaki kısa kolu (DKF) üzerinde indüktif etki meydana getirir. Bu indüktif etkinin eşdeğer indüktansı L_1 ile ifade edilmiştir. FTR'nin kendi parçaları ve komşu iletkenlerle arasında ise gelen EM dalganın etkisiyle kapasitif etkileşim oluşur. UKF ile kare döngü iletken arasında oluşan kapasitif etkileşim C_a , DKF ile FTR'nin içteki kısa kolu (İKF) arasındaki etkileşim C_3 , FTR-1'in UKF'si ile FTR-2'nin DKF'si arasındaki etkileşim C_2 eşdeğer kapasitesiyle belirtilmiştir. Dış FTR'nin içteki

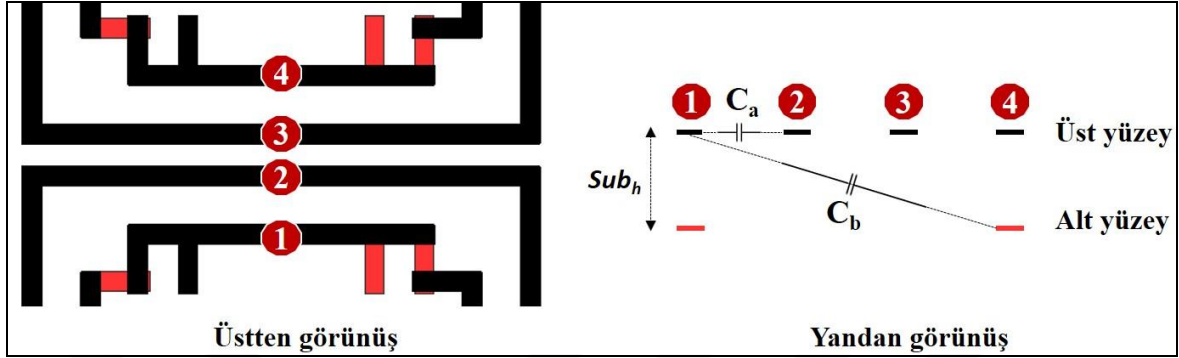
FTR'ler ile arasında oluşan kapasitif etkileşim ise sırasıyla C_4 , C_5 ve C_6 eşdeğer kapasitesiyle ifade edilmiştir. Dış FTR ile ölçeklendirilmiş iç FTR'ler arasındaki kapasitif ve indüktif etkiler sonucunda oluşan devre elemanları Şekil 3.74'de detaylı olarak gösterilmiştir. C_4 , C_5 ve C_6 kapasitansları aynı iletkenlerden başlayıp (dış FTR) aynı yüzeyde benzer iletkenlerde (iç FTR'ler) sonlandıkları için birbirlerine seri bağlı eşdeğer devre modelini (Grup-2) oluştururlar.

Şu ana kadar FSY'nin üst yüzeyindeki dış FTR'nin sadece aynı yüzeydeki iletkenlerle etkileşimi incelenmiştir. Ancak önerilen UÇBFSY yapısındaki iletken FTR'ler dielektrik alttaşın her iki yüzeyinde de yer aldığından, üst ve alt yüzeydeki iletkenler arasında kapasitif bir etki meydana gelmesi kaçınılmazdır. Şekil 3.75 (a) incelendiğinde, 1 numaralı (no.lu) siyah renkli üst yüzeydeki dış FTR ile komşu birim hücre yapısının alt yüzeyindeki 4 no.lu kırmızı renkli dış FTR'nin birbirine paralel uzanan UKF'leri arasında bir kapasitif etkileşim meydana gelmesi beklenmektedir. Bu kapasitif etkileşim C_b eşdeğer kapasitesiyle ifade edilmiştir. C_a ve C_b kapasitansları aynı iletkenlerden başlamakta (çıkmakta) fakat farklı yüzeylerdeki farklı iletkenlerde sonlanmaktadır. C_2 kapasitansı C_a ve C_b kapasitanslarıyla aynı iletkenlerden başlayıp C_a kapasitansı ile aynı yüzeyde farklı iletkende sonlanmaktadır (Şekil 3.74 ve 3.75). Bundan dolayı C_a ve C_b birbirlerine paralel, C_2 ise bunlara seri bağlanarak ilgili iletkenlerin eşdeğer devre modelini (Grup-1) oluştururlar. UÇBFSY'nin üst ve alt yüzeyinde bulunan iletkenler arasındaki kapasitans hesabında (örneğin C_b) alttaşın dielektrik sabiti (ϵ_r) de dikkate alınır ve $1/\epsilon_r$ bir çarpan ifadesi olarak Eş. 3.10'daki gibi Eş. 3.3'e eklenir.

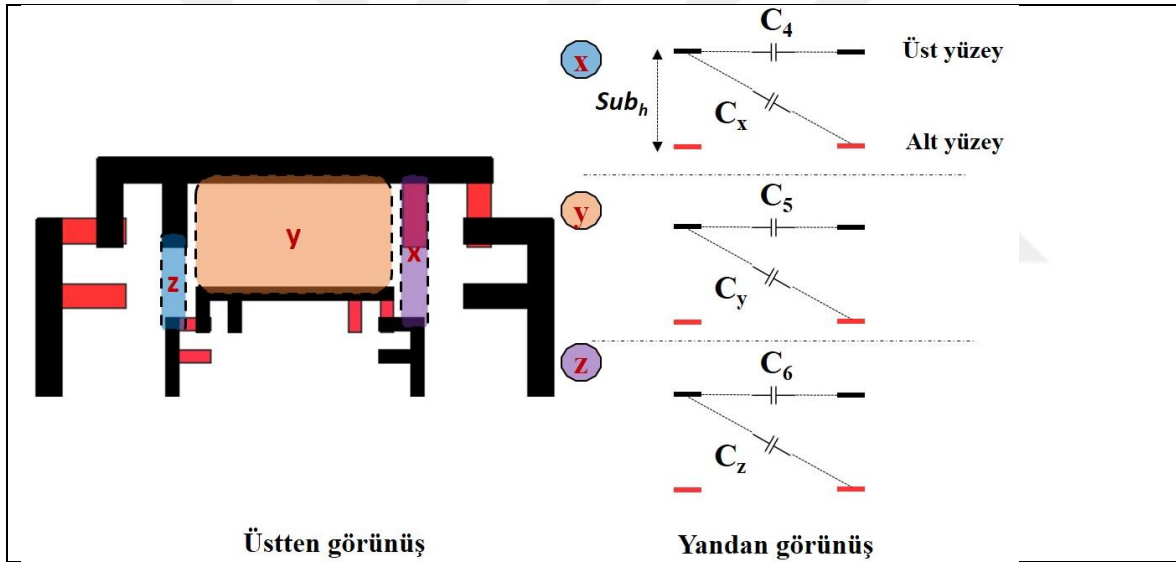
$$\frac{B}{Y_0} = 4 \frac{p \cos \theta}{\lambda \epsilon_r} [\ln(\csc \gamma) + G(p, g, \lambda, \theta)] \quad (3.10)$$

Bunlara ilave olarak, Şekil 3.75 (b)'de x, y ve z olarak işaretlenmiş bölgelerde dielektrik alttaşın üst yüzeyinde bulunan dış FTR ile alt yüzeyindeki ölçeklendirilmiş iç FTR'ler arasında da kapasitif etkileşim meydana gelir. *X bölgesinde oluşan*, üst yüzeydeki 1 no.lu FTR'nin UKF'si ile alt yüzeydeki 2 no.lu ölçeklendirilmiş iç FTR'nin iletken genişliği arasındaki kapasitif etkileşim C_x kapasitansı; *y bölgesinde oluşan*, üst yüzeydeki 1 no.lu FTR'nin UKF'si ile alt yüzeydeki 1 no.lu ölçeklendirilmiş iç FTR'nin UKF'si arasındaki kapasitif etkileşim C_y kapasitansı; *z bölgesinde oluşan*, üst yüzeydeki 1 no.lu FTR'nin İKF'si ile alt yüzeydeki 4 no.lu ölçeklendirilmiş iç FTR'nin DKF'si arasındaki kapasitif etkileşim

C_z eşdeğer kapasitesi ile ifade edilmiştir. Aynı iletkeniden başlayıp farklı yüzeydeki farklı iletkenlerde sonlanan C_x , C_y ve C_z devre elemanları C_a ve C_b 'de olduğu gibi birbirlerine paralel bağlanarak ilgili iletkenlerin eşdeğer devre modelini oluştururlar.



(a)



(b)

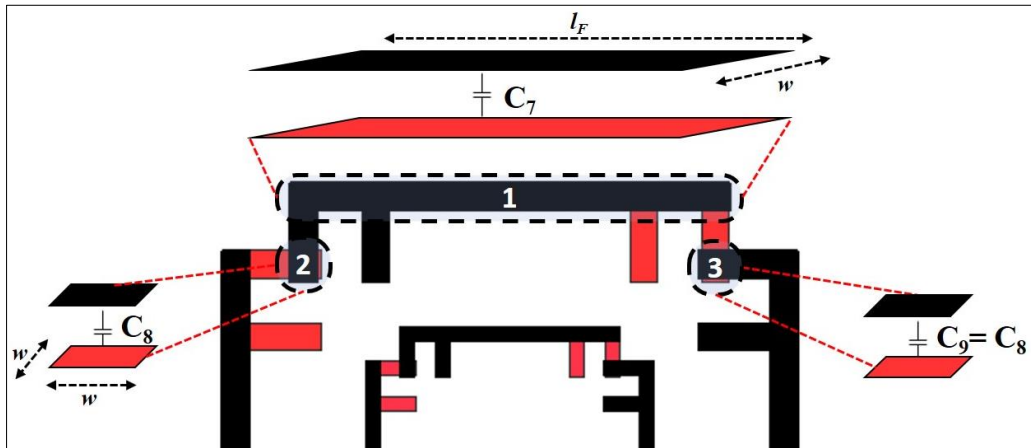
Şekil 3.75. Dielektrik alttaşın üst yüzeyindeki dış FTR ile alt yüzeyindeki (a) komşu dış FTR ve (b) ölçeklendirilmiş iç FTR'ler arasında oluşan kapasitif etkiler

İkinci aşamada bu kısma kadar elde edilen kapasitif değerler, Marcuvitz'in belirttiği şekilde sonsuz paralel iletken şerit dizisi olarak düşünülmüştür. Bundan dolayı, UÇBFSY'nin mevcut iletken yapıları da dikkate alınarak, kapasitansların hesaplanmasında 3.3-3.10 arasındaki eşitlikler kullanılmıştır. Ancak Şekil 3.76'da da gösterildiği üzere, alttaşın üst yüzeyindeki 1 no.lu FTR ile alt yüzeyindeki 1, 2 ve 4 no.lu FTR'lerin üst üste geldiği

kısımlar birbirine paralel iletken şeritlerden daha çok birbirine paralel plakalara benzetmektedir. Dolayısıyla eşit yüzey alanlarına sahip paralel plakalı kapasitörler gibi,

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \quad (3.11)$$

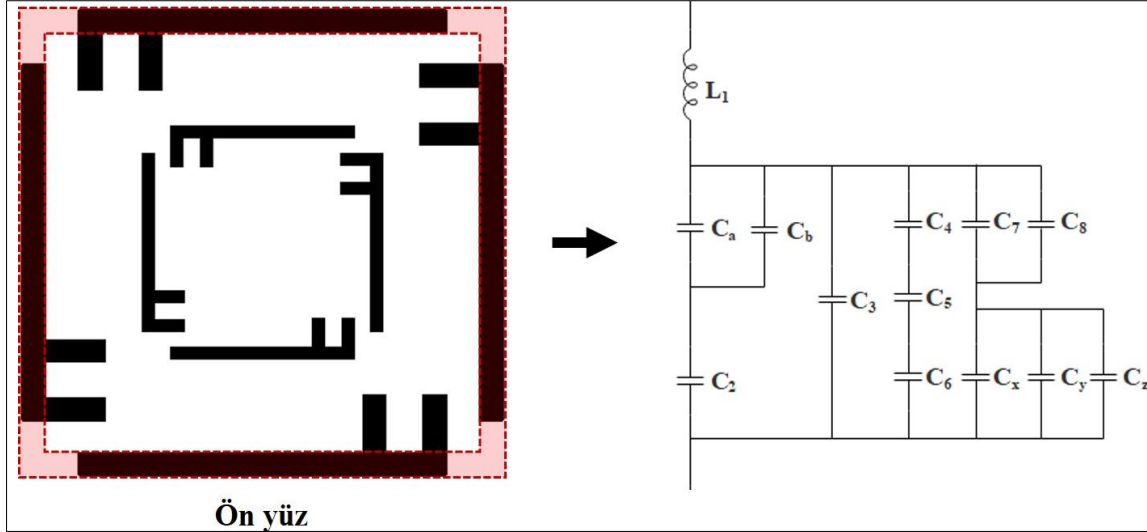
eşitliği kullanılarak hesaplanması uygundur. Burada ε_0 , (8.854×10^{-12} F/m) bir vakumun (serbest uzay) göreceli geçirgenliğini; ε_r , iki iletken plaka arasındaki dielektrik malzemenin göreceli geçirgenliğini (dielektrik sabiti); A , üst ve alt yüzeyde bulunan iletken plakaların alanını ve d , plakalar arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Şekil 3.76 incelendiğinde numaralandırılmış üç farklı bölgede eşit yüzey alanlarına sahip paralel plakalı kapasitörlerin olduğu görülmektedir. Birinci bölgede alttaşın her iki yüzeyindeki 1 no.lu FTR UKF'lerinin birbirlerine bakan $w_F \times l_F$ boyutlarındaki iletken plakaları arasında oluşan kapasitif etki C_7 eşdeğer kapasitansı ile adlandırılmıştır. İkinci bölgede 1 no.lu siyah FTR'nin DKF'si ile 4 no.lu kırmızı FTR'nin DKF'si arasında C_8 , üçüncü bölgede ise 1.no.lu kırmızı FTR'nin DKF'si ile 2 no.lu siyah FTR'nin DKF'si arasında C_9 eşdeğer kapasitansları oluşmaktadır. İkinci ve üçüncü bölgedeki paralel plakalar ($A = w_F \times w_F$) aynı boyutlara sahip olduğu için C_8 ve C_9 kapasitanslarını birbirine eşit değerdedir.



Şekil 3.76. Dielektrik alttaşın her iki yüzeyindeki FTR'lerin birbirlerine paralel yüzeyleri arasında oluşan kapasitanslar

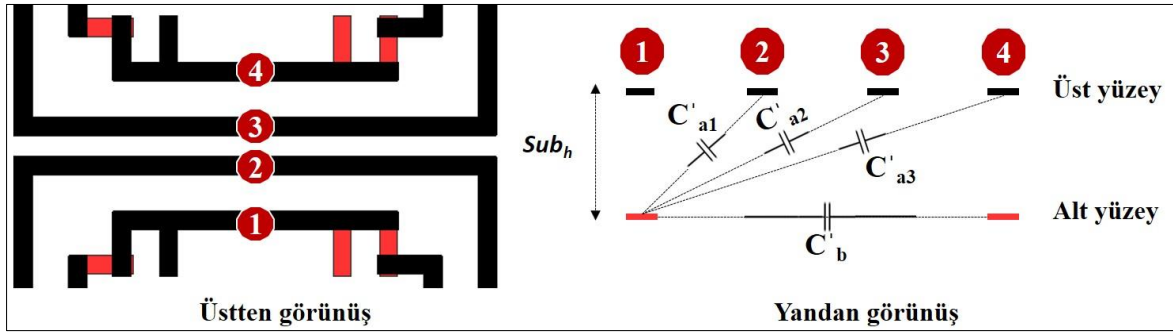
İkinci aşamada sadece üst yüzeydeki dış FTR'nin eşdeğer devre analizi yapıldığı için C_7 ve C_8 değerleri hesaba katılmıştır. Aynı iletkendten başlayıp farklı yüzeydeki farklı iletkenlerde sonlanan C_7 ve C_8 kapasitansları birbirlerine paralel bağlanarak ilgili iletkenlerin eşdeğer devre modelini oluştururlar. Benzer özellikler sergileyen birbirine paralel bağlı C_x , C_y ve C_z

devre elemanları ise C_7 ve C_8 'ye seri olarak bağlanarak (grup-3) ikinci aşamadaki eşdeğer devreyi tamamlarlar. Farklı özellikler gösteren her bir kapasitans grubunun birbirine paralel bağlanmasıyla oluşan toplam kapasitans L_1 indüktansına seri bağlanarak dielektrik alttaşın üst yüzeyindeki FTR'lerin eşdeğer devre modelini oluşturur. Şekil 3.77'de verilen bu EDM UÇBFSY'nin BDF özelliğindeki ikinci rezonans frekansını (f_{z2}) vermektedir.



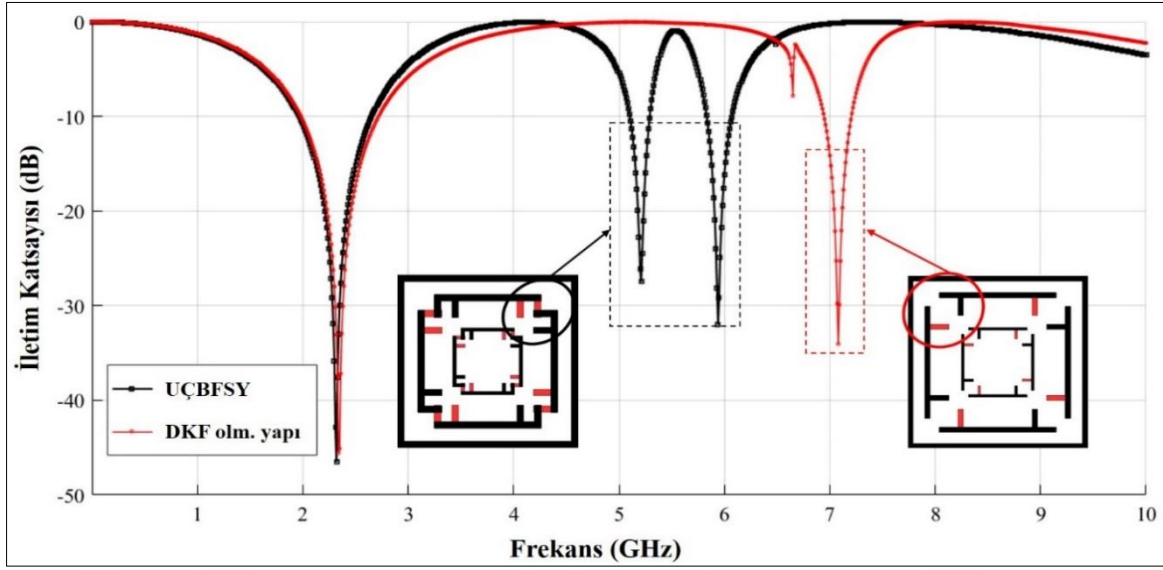
Şekil 3.77. Dielektrik alttaşın üst yüzeyindeki FTR'lerin eşdeğer devre modeli

Son aşamada UÇBFSY'nin alt yüzeyindeki iletken yapıların eşdeğer devre analizi yapılmıştır. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere çerçeve eleman olan kare döngü iletken yapı, önerilen birim hücre yapısında sadece üst yüzeyde bulunmaktadır. Alt yüzeyde ise üst yüzeyde bulunan FTR'lerin ters simetrikleri (antipodali) yer almaktadır (Bkz. Şekil 3.63). Bu nedenle alt yüzeydeki FTR'lerin eşdeğer devre modeli, ikinci aşamada elde edilen üst yüzeydeki FTR'lerin EDM'sine çok benzemekle birlikte temel olarak Şekil 3.77'de verilen EDM'den iki farkı bulunmaktadır. Alt yüzeyde bulunan kırmızı dış FTR'nin eş değer devre analizi için Şekil 3.76 tekrar incelendiğinde, alttaki 1. No.lu dış FTR ile üstteki 1, 2 ve 4 no.lu dış FTR'ler arasında C_7 ve C_9 kapasitanslarının olduğu görülmektedir. Bu eşdeğer kapasitans değerlerinden C_7 , her iki yüzeydeki 1 no.lu dış FTR'ler içinde ortak olduğundan sadece ikinci aşamadaki EDM'de kullanılmıştır. Üçüncü aşamada ise sadece C_9 eşdeğer kapasitansı kullanılarak birbirine paralel bağlı C_x , C_y ve C_z devre elemanlarına seri olarak bağlanmıştır. Bu durum üst ve alt yüzeydeki FTR'lerin EDM'sindeki ilk farktır.

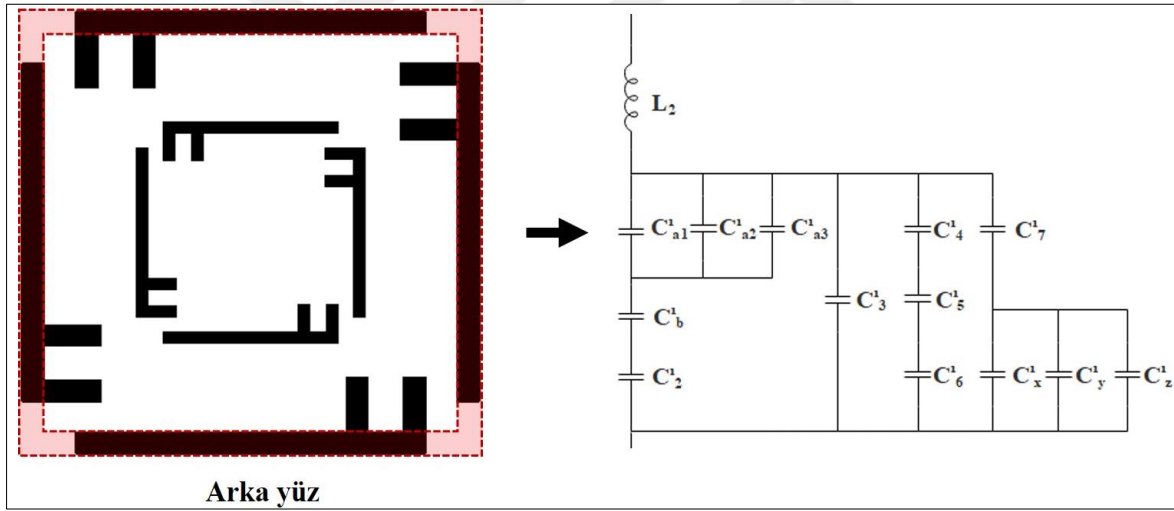


Şekil 3.78. Dielektrik alttaşın alt yüzeyindeki dış FTR ile üst yüzeyindeki dış FTR, kare döngü iletken, komşu birim hücrenin üst yüzeyindeki dış FTR ve kare döngü FTR'ler arasında oluşan kapasitif etkiler

Şekil 3.75 (a) ve Şekil 3.78 incelendiğinde, *ikinci farkın* dielektrik malzemenin üst ve alt yüzeyinde bulunan birbirinden farklı iletkenlerden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Şekil 3.75 (a)'da siyah dış FTR'nin (1 no.lu) sadece komşu kırmızı dış FTR (4 no.lu) ile kapasitif etkileşimi (C_b) söz konusu iken Şekil 3.78'de kırmızı dış FTR'nin (1 no.lu) siyah kare döngü (2 no.lu), komşu birim hücredeki siyah kare döngü (3 no.lu) ve siyah dış FTR (4 no.lu) ile arasında kapasitif bir etkileşim mevcuttur. Alt yüzeydeki dış FTR'ye bağlı olarak oluşan bu eşdeğer kapasitanslar EDM'de sırasıyla C'_{a1} , C'_{a2} ve C'_{a3} ile ifade edilmiş ve bu üç devre elemanı aynı iletkenenden çıkıp farklı yüzeydeki farklı iletkenende sonlandıkları için de birbirlerine paralel olarak bağlanmıştır. Ayrıca Şekil 3.75 (a)'da görülen siyah dış FTR ile kare döngü arasındaki kapasitif etkileşim (C_a), Şekil 3.78'de kırmızı dış FTR (1 no.lu) ile komşu birim hücredeki kırmızı dış FTR (4 no.lu) arasında oluşmaktadır ve EDM'de C'_b eş değer kapasitansı ile ifade edilmiştir. Şekil 3.78'de verilen tüm kapasitif değerler Eş 3.3-3.10'a göre hesaplanmıştır. Alt yüzeydeki iletkenler arasında geriye kalan tüm kapasitif ve indüktif etkileşimler (eşdeğer devre elemanları) ikinci aşamada elde edilenlerle aynı olduğu (aynı yöntemle bulunduğu) için üçüncü aşamada ayrıca belirtilmemiştir. İkinci aşamadakilerle ayırt edilebilmesi için bu aşamadaki eşdeğer kapasitanslar “'” ifadesi (örneğin C_2 yerine C'_2) ile gösterilmiştir. Buna ilave olarak EDM'de C_9 kapasitansı C'_7 olarak belirtilmiş ve indüktif eşdeğer devre elemanı L_1 yerine L_2 ile ifade edilmiştir. Üçüncü aşamanın tamamlanmasıyla elde edilen ve Şekil 3.80'de verilen eşdeğer devre UÇBFSY'nin son rezonans frekansını (f_{z3}) vermektedir.



Şekil 3.79. UÇBFSY ve DKF'si olmayan yapının $\theta=0^\circ$ 'de, TE ve TM moddaki S-parametre grafiklerinin karşılaştırılması

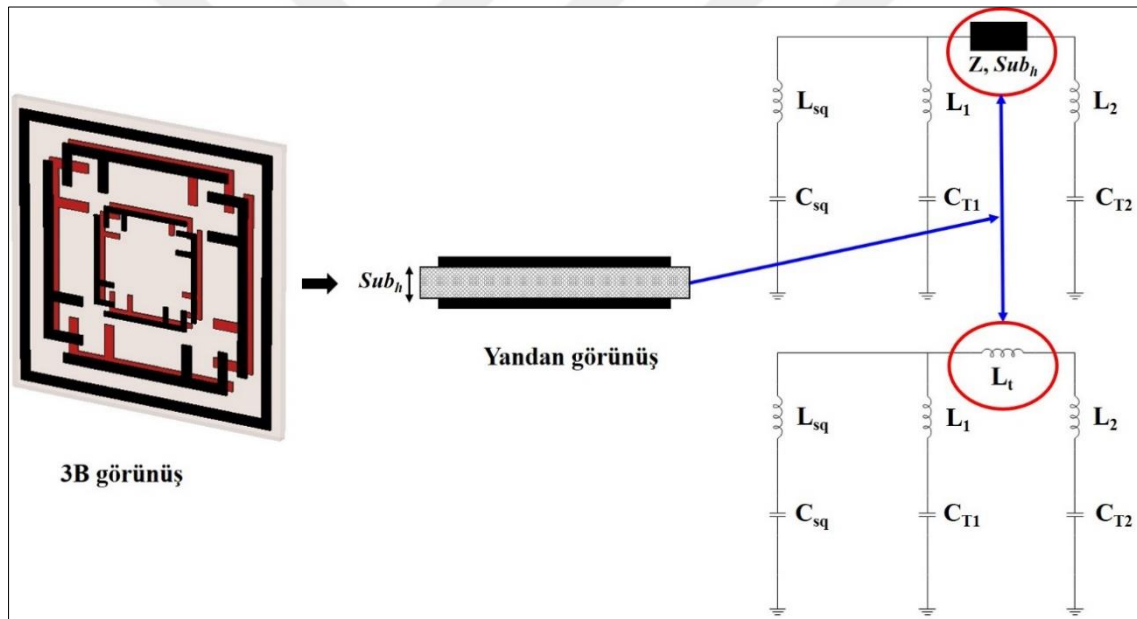


Şekil 3.80. Dielektrik alttaşın alt yüzeyindeki FTR'lerin eşdeğer devre modeli

Üst yüzeydeki FTR'lerin EDM'si ile alt yüzeydekilerin EDM'si arasındaki fark, yapının farklı iki frekansta rezonansa girdiğini göstermektedir. Birebir aynı olan ancak yapının ön ve arka yüzüne ters simetrik olarak yerleştirilmiş FTR'lerin DKF'si EDM'deki farkların belirleyici unsurudur. Bu durumda benzetim ortamında önerilen yapının DKF'leri kaldırılırsa iletim ve yansıma karakteristiklerinin değişmesi beklenmektedir. Şekil 3.79'daki karşılaştırma sonuçları incelendiğinde DKF'si olmayan UÇBFSY'nin 5.2 GHz ve 5.9 GHz'deki rezonans frekanslarının oluşmadığı, bunların yerine 7.1 GHz'de ayrı bir rezonans frekansının olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, EDM'deki ikinci ve üçüncü rezonans

frekanslarının oluşumunu belirten savın benzetim sonuçlarıyla doğrulanmasını sağlamaktadır.

İkinci aşamada elde edilen kapasitif değerlerinin toplamı (sadeleştirilmiş hali) C_{T1} , üçüncü aşamadakilerin toplamı ise C_{T2} ile ifade edildiğinde, UÇBFSY'nin BDF özelliğindeki çalışma frekans bantlarını modelleyen eşdeğer devrelerin (Bkz. Şekil 3.72, 3.77 ve 3.80) her biri birer seri bağlı LC devresi (sırasıyla $L_{sq}C_{sq}$, L_1C_{T1} ve L_2C_{T2}) olmaktadır. Bölüm 3.3.4'ün başında da belirtildiği üzere önerilen yapının üst ve alt yüzeyindeki iletken elemanlar basitleştirilmiş olarak sürekli ve süreksiz iç içe kare döngü yapılarına benzemektedir. Bundan dolayı UÇBFSY'nin sadeleştirilmiş eşdeğer devre modeli beklenildiği üzere birbirine paralel üç seri LC devresinden ($L_{sq}C_{sq}/L_1C_{T1}/L_2C_{T2}$) oluşmaktadır.



Şekil 3.81. Dielektrik alttaşın UÇBFSY'nin eşdeğer devre modelindeki etkisi

Gelen EM dalganın etkisiyle bir indüktörün üzerinde oluşan manyetik alanın komşu indüktör üzerindeki gerilimi indüklemesine karşılıklı (ortak) indüktans adı verilir. Eğer komşu indüktörler arasındaki mesafe yeteri kadar büyük olursa birisinde oluşan manyetik alan diğerini etkileyemeden sönümlenecektir. Bu açıdan bakıldığında; dielektrik alttaşın üst ve alt yüzeyindeki FTR'lerin iki farklı frekansta (5,2 GHz ve 5,9 GHz) rezonansa girdiği ve BDF özelliğindeki bu iki çalışma frekansının birbirinden yeterince uzak olduğu (0,7 GHz) varsayıldığında, f_{z2} 'nin eşdeğer devresi L_1C_{T1} 'in f_{z3} 'ün eşdeğer devresi L_2C_{T2} üzerinde oluşturabileceği karşılıklı (ortak) indüktans ihmal edilebilir. Alttaşın üst yüzeyine çerçeve

eleman olarak yerleştirilmiş iletken kare döngü sayesinde oluşan ilk rezonans frekans (2.4 GHz) ise diğer iki rezonans frekansından çok çok uzak olduğu için, $L_{sq}C_{sq}$ eşdeğer devresinin L_1C_{T1} ve L_2C_{T2} üzerinde yaratabileceği karşılıklı indüktans dikkate alınmamıştır.

Eşdeğer devre modelinde dikkate alınması gereken diğer bir konu ise FSY'nin dielektrik alttaşıdır. UÇBFSY'nin her iki yüzeyine yerleştirilmiş iletken elemanlar arasında kalan alttaş malzeme, bu iletkenlerin etkileşimi esnasında bir yol oluşturmaktadır. Bu yol eşdeğer devrede iletim hattı olarak modellenenebilir [67]. Bu durumda iletim hattının uzunluğu (l_{TL}) dielektrik alttaşın kalınlığına (Sub_h) eşit olacaktır. Yukarıda da belirtildiği üzere karşılıklı indüktans ihmal edildiğinden ve iletim hattının uzunluğu ($Sub_h=0,3$ mm) önerilen FSY'nin en düşük rezonans frekansına (f_{z1}) göre hesaplanan dalga boyundan ($\lambda_{2.4}=125$ mm) çok daha küçük olduğu için ($Sub_h \ll \lambda_{2.4}$) iletim hattı Şekil 3.81'de gösterildiği gibi L_t eşdeğer indüktansı ile değiştirilebilir. İletim hattının manyetik bağlı geçirgenliği μ_r olarak kabul edilirse, L_t şu şekilde hesaplanabilir [67];

$$L_t = \mu_r \mu_0 h . \quad (3.12)$$

Burada μ_0 , boşluktaki manyetik geçirgenliği; h ise dielektrik alttaşın kalınlığını (Sub_h) ifade etmektedir. Yapının eşdeğer devre analizinde dıştan içe ve üstten alta doğru üç aşamalı olarak bir yol izlendiği için dielektrik alttaşın eşdeğer indüktansı (L_t) ikinci aşamada hesaba katılarak ikinci rezonans frekansını (f_{z2}) belirleyen bir faktör olacaktır.

EDM sonucunda 3.1-3.12 arasındaki eşitliklerle elde edilen elektriksel devre elemanları değerleri Çizelge 3.11'de detaylı olarak listelenmiştir. Uluslararası Birimler Sistemine (SI) göre eşdeğer indüktansların birimi Henry (H) ve kapasitansların birimi ise Farad (F) ile ifade edilmiştir.

Uygulanabilir antipodal F-tipi FSY'nin üç aşamalı olarak analiz edilen EDM'si Şekil 3.82'deki gibidir. Birinci aşama elde edilen $L_{sq}C_{sq}$ UÇBFSY'nin BDF özelliğindeki birinci rezonans frekansını (f_{z1}), ikinci aşamada elde edilen L_1C_{T1} ve L_t eşdeğer devre elemanları ikinci rezonans frekansını (f_{z2}), son aşamada elde edilen L_2C_{T2} eş değeri devresi ise son rezonans frekansını (f_{z3}) vermektedir. Boyutları dış FTR'lere kıyasla çok daha küçük olan iç FTR'lerin oluşturduğu süresiz kare döngü EDM hesaplamasında ayrı bir LC devresi olarak eklenmediğine dikkat edilmelidir. Çünkü, daha önce de bahsedildiği üzere, bu yapının

etkisiyle oluşabilecek bir rezonans frekansı tez çalışmasındaki bant aralığı (2-8 GHz) dışında kalacaktır.

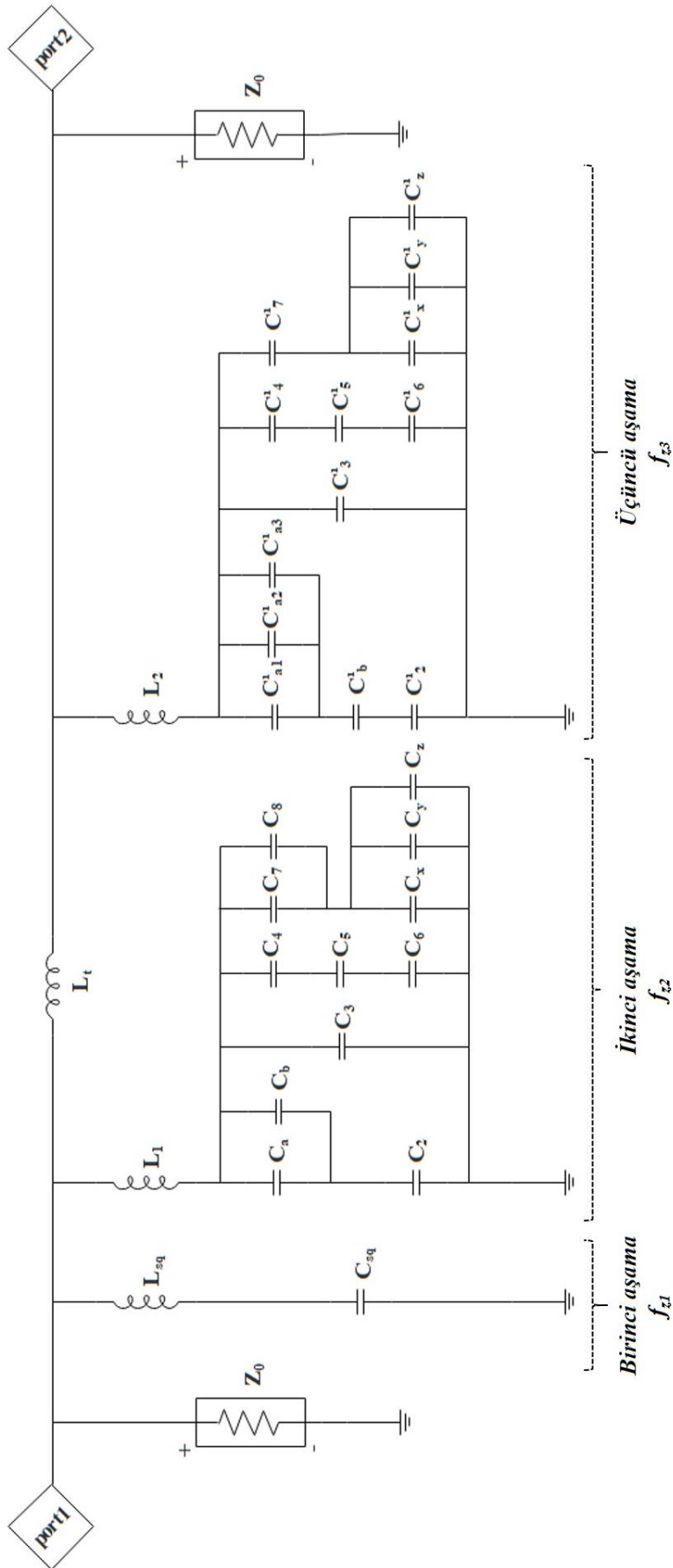
Çizelge 3.11. EDA'nın elektriksel (indüktif ve kapasitif) parametre değerleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer
L_{sq}	15,09 nH	C_y	0,0006 pF
L_1	12,95 nH	C_z	0,018 pF
L_2	12,95 nH	C'_{a1}	0,059 pF
L_t	0,63 nH	C'_{a2}	0,036 pF
C_{sq}	0,29 pF	C'_{a3}	0,025 pF
C_a	0,205 pF	C'_b	0,086 pF
C_b	0,025 pF	C'_2	0,019 pF
C_2	0,019 pF	C'_3	0,025 pF
C_3	0,031 pF	C'_4	0,007 pF
C_4	0,007 pF	C'_5	0,062 pF
C_5	0,062 pF	C'_6	0,003 pF
C_6	0,003 pF	C'_7	0,027 pF
C_7	0,0612 pF	C'_x	0,018 pF
C_8	0,028 pF	C'_y	0,0007 pF
C_x	0,0008 pF	C'_z	0,0008 pF

İkinci ve üçüncü aşamada elde edilen kapasitif elemanların toplamı sırasıyla C_{T1} ve C_{T2} ile ifade edildiğinde, EDM'nin görünüş olarak sadeleştirilmiş devre modeli Şekil 3.81'de verildiği gibi olmaktadır. Sadeleştirilmiş EDM'ye göre, UÇBFSY'nin empedansı (Z_{FSY}),

$$Z_{FSY} = \frac{(1 - w^2 L_{sq} C_{sq})(1 - w^2 (L_1 + L_t) C_{T1})(1 - w^2 L_2 C_{T2})}{jw \left\{ [C_{T1} + C_{T2} - w^2 C_{T1} C_{T2} (L_1 + L_t + L_2)](1 - w^2 L_{sq} C_{sq}) + C_{sq}(1 - w^2 (L_1 + L_t) C_{T1})(1 - w^2 L_2 C_{T2}) \right\}} \quad (3.13)$$

eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.



Şekil 3.82. UÇBFSY'nin eşdeğer devre modeli

Eş. 3.13'te Z_{FSY} değeri sıfıra yaklaştıkça UÇBFSY yapısının yapay bir elektrik duvarına (mükemmel elektrik iletken – PEC) dönüşerek yüzeyine gelen EM dalgayı tam olarak yansıtacağı görülmektedir. Tam tersi durumda ise, Z_{FSY} değeri sonsuza yaklaştıkça gelen EM dalgalar önerilen yapının içinden kayıpsız geçeceği anlaşılmaktadır. Kısacası Eş. 3.13'ün payı sıfıra eşitlendiğinde, Çizelge 3.11'deki parametre değerleri de kullanılarak UÇBFSY'nin BDF (yansıma) özelliğindeki rezonans frekansları sırasıyla Eş. 3.14, 3.15 ve 3.16'ya göre hesaplanabilir.

$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{sq}C_{sq}}} \quad (3.14)$$

$$f_{z2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + \mu_0\mu_r h)C_{T1}}} \quad (3.15)$$

$$f_{z3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_{T2}}} \quad (3.16)$$

Çizelge 3.12. UÇBFSY'nin benzetim sonuçlarıyla EDA sonuçlarının karşılaştırılması

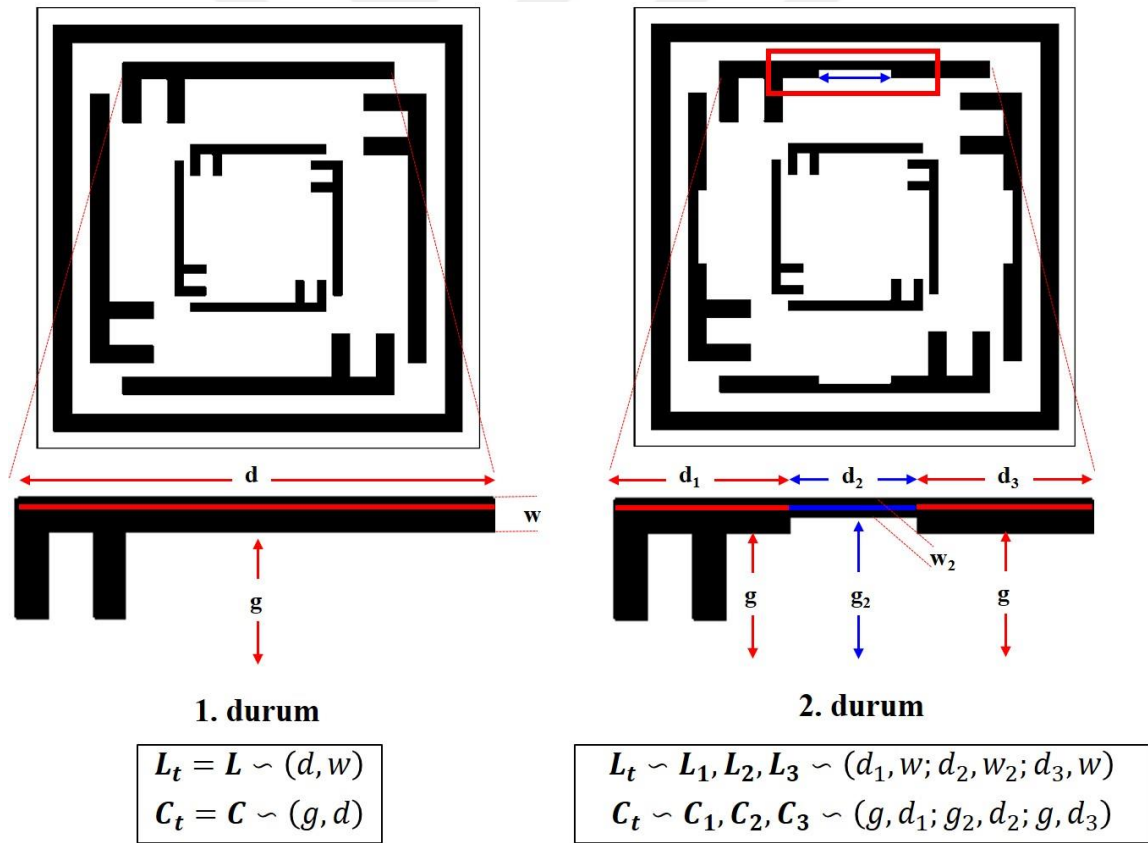
Analiz Yöntemi	Rezonans Frekansı		
	f_{z1}	f_{z2}	f_{z3}
	GHz		
CST	2,4	5,2	5,9
EDA	2,4	5,19	5,86

Eşdeğer devre analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 3.12'deki sunulan verilerden UÇBFSY yapısının 2,4 GHz, 5,19 GHz ve 5,86 GHz'de çalışan üç durdurma frekansına sahip olduğu ve rezonans frekansları açısından EDM ile benzetim programı CST sonuçlarının birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. İki yöntem sonuçları karşılaştırıldığında f_{z1} 'de herhangi bir sapma meydana gelmezken, f_{z2} 'de %0,19'luk (0,01

GHz) ve f_{z3} 'te %0,68'lik (0,04 GHz) bir frekans sapması olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar EDM'nin doğruluğunu ve geçerliliğini göstermektedir.

3.3.5. UÇBFSY'nin rezonans frekanslarını değiştirme yöntemleri

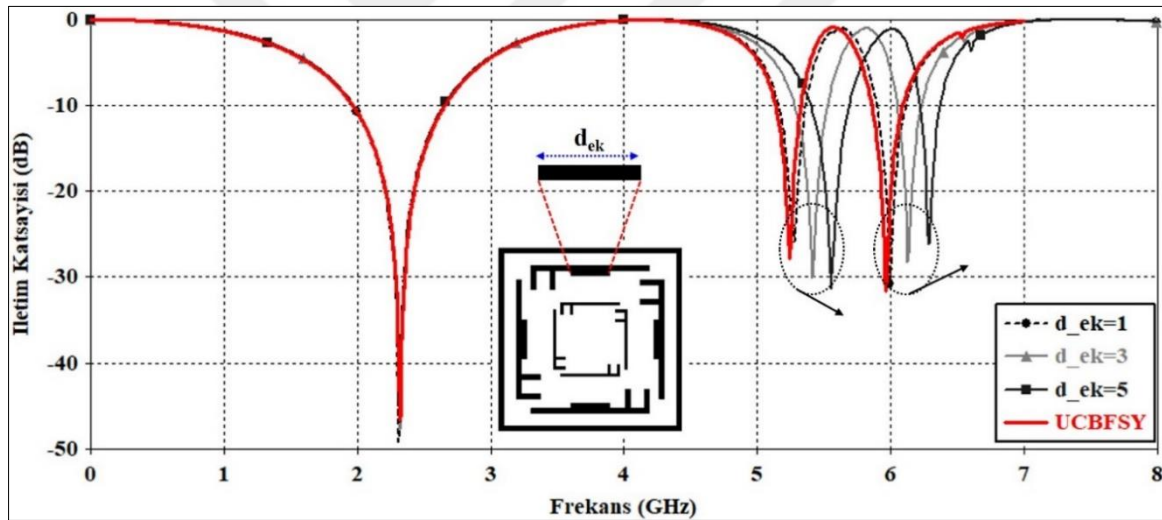
Önerilen yapının rezonans frekansını belirlemede parametre değerlerinin önemli olduğu ve her bir parametrik değişimin yapının karakteristik özelliklerini değiştirdiği bölüm 3.3.3'te belirtilmiştir. Bir önceki bölümde ise UÇBFSY'nin eşdeğer devre analizi yapılarak her bir iletken parça uzunluğunun ve iletkenler arasındaki mesafenin (boşluğun) rezonans frekansında belirleyici rol oynadığı gösterilmiştir. Bu kapsamda, çok bantlı karakteristik özelliği değişmeden, UÇBFSY'nin rezonans frekansını değiştirebilmek için yapıya iletken parça eklemek ve yapıdan iletken parça çıkarmak etkili olacaktır.



Şekil 3.83. UÇBFSY'nin rezonans frekansını değiştirmek için iletken ekleme/çıkarma

UÇBFSY'nin birinci rezonans frekansında değişiklik yapmak için çerçeve eleman olan kare döngü iletken üzerinde, diğer rezonans frekanslarında ise iletken FTR'ler üzerinde değişim yapılması gereklidir. Eşdeğer devre modelindeki karmaşık yapısı da göz önüne alındığında

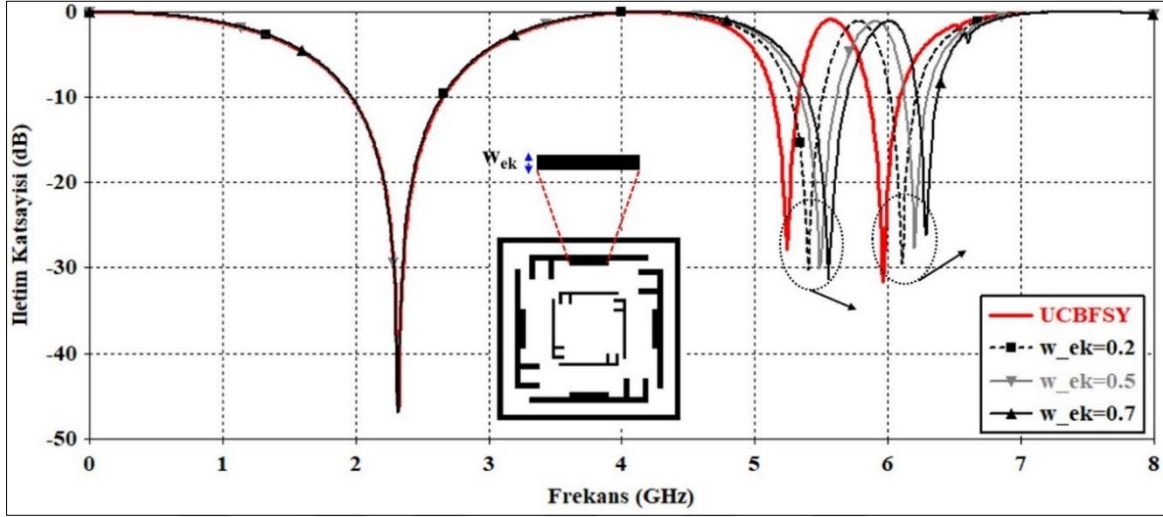
iletken dış FTR'lere eklenecek/çıkarılacak iletken elemanın, kare döngüye nazaran, UÇBFSY'nin genel karakteristik yapısını daha çok etkilemesi beklenen bir durumdur. Dış FTR'lerin uzun kolundan (UKF), FTR'nin her iki ucuna eşit mesafede, d_2 uzunluğunda bir dikdörtgen parça çıkarıldığında Şekil 3.83'deki 2. durum oluşmaktadır. Eş. 3.3-3.9 göre; 1. durumda indüktif devre elemanın belirleyici parametresi d iletken uzunluğu ve w iletken kalınlığı, kapasitif devre elemanın belirleyici parametresi g aralığı ve d iletken uzunluğu olmaktadır. İkinci durumda ise çıkarılan iletken parça nedeniyle yeni oluşacak devre elemanları indüktif ve kapasitif değerleri belirleyecektir. İletken uzunluğu boyunca toplam indüktif değer $d_1, w; d_2, w_2$ ve d_3, w parametreleriyle oluşan sırasıyla L_1, L_2 ve L_3 indüktif elemanlarının toplam eşdeğerinden oluşacaktır. Toplam kapasitif değer $g_1, d_1; g_2, d_2$ ve g_3, d_3 parametreleriyle oluşan sırasıyla C_1, C_2 ve C_3 kapasitif elemanlarının toplam eşdeğerinden oluşacaktır.



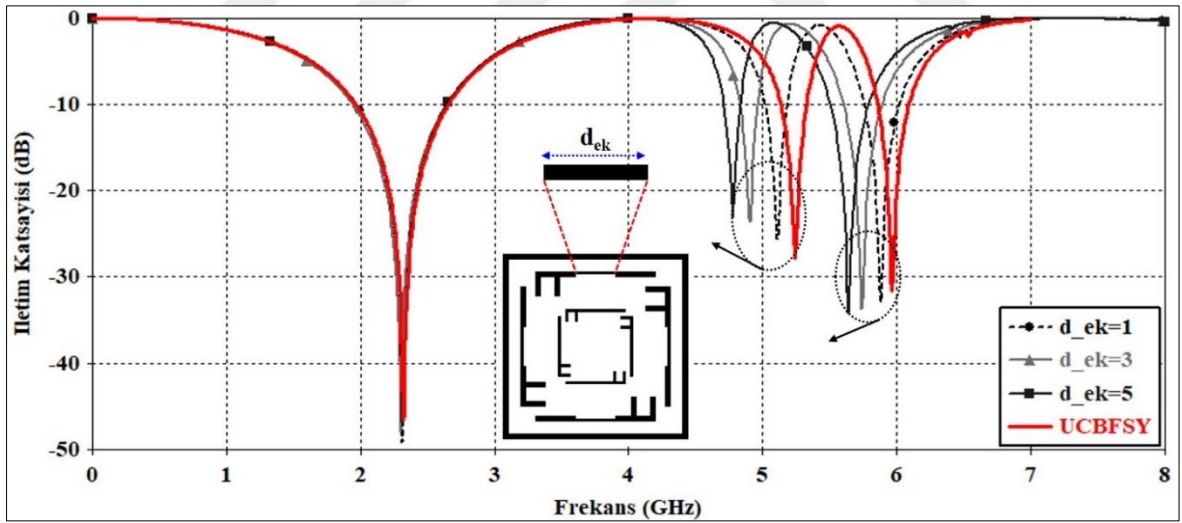
Şekil 3.84. FTR'ye eklenen iletken boyunun (d_{ek}) UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

UÇBFSY'nin bant durduran ikinci ve üçüncü rezonans frekanslarını değiştirmek için ilk olarak FTR'ye $d_{ek} \times w_F$ boyutlarında iletken eleman eklenmiştir. Yüzey normaline paralel olarak ($\theta=0^\circ$) gelen dalgayla indüklenen yeni UÇBFSY yapısının benzetim sonucunda elde edilen S-parametre grafikleri Şekil 3.84'te verilmiştir. İletken boyunun (d_{ek}) 1, 3 ve 5 mm olarak değiştiği üç farklı durum incelendiğinde, iletken eklenmesiyle birlikte f_{z2} ile f_{z3} 'ün arttığı ve bu artışın d_{ek} ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. İletken boyu 5 mm olduğunda; f_{z2} 5,55 GHz'de oluşurken iletim katsayısı -32 dB'ye düşmekte, f_{z3} 5,9 GHz'den 6,3 GHz'e kayarken iletim katsayısı -26,1 dB'ye yükselmektedir. FTR'ye iletken eklenmesi

durumu Eş. 3.15 ve 3.16 dikkate alınarak değerlendirildiğinde toplam indüktif ve kapasitif değerlerin iletken boyutlarının değişmesiyle birlikte azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.85. FTR'ye eklenen iletken kalınlığının (w_{ek}) UCBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

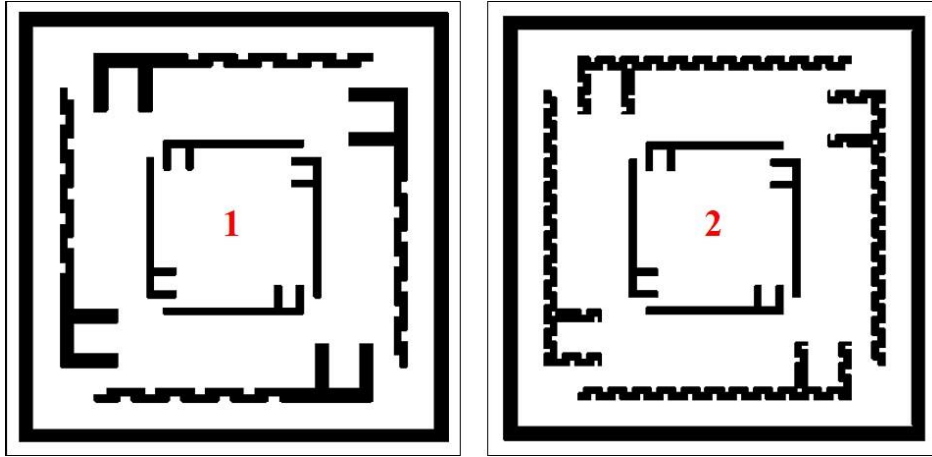


Şekil 3.86. FTR'den çıkarılan iletken boyunun (d_{ek}) UCBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

FTR'ye eklenen iletken boyunun sabit tutulup ($d_{ek} = 5$ mm) kalınlığının (w_{ek}) 0,2, 0,5 ve 0,7 mm olduğu durumlar incelendiğinde f_{z2} ve f_{z3} rezonans frekanslarının tıpkı iletken boyundaki artışta olduğu gibi değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 3.85'te S-parametre grafiği verilen bu durumda; birinci rezonans frekansı artarken frekansın iletim katsayısı da artmaktadır, ancak ikinci rezonans frekansı artarken frekansın iletim katsayısı düşmektedir.

İletken kalınlığı 0,2 mm iken f_{z2} 5,4 GHz'e ve f_{z3} 6,1 GHz'e kaymakta, iletim katsayıları sırasıyla -30,5 ve -29,7 dB olmaktadır. İletken kalınlığı 0,7 mm olduğunda ise rezonans frekansları sırasıyla 5,55 ve 6,3 GHz'e oluşurken f_{z2} 'nin İK'sı -31,6 dB'ye düşerken, f_{z3} 'ünki -26,4 dB'ye yükselmektedir.

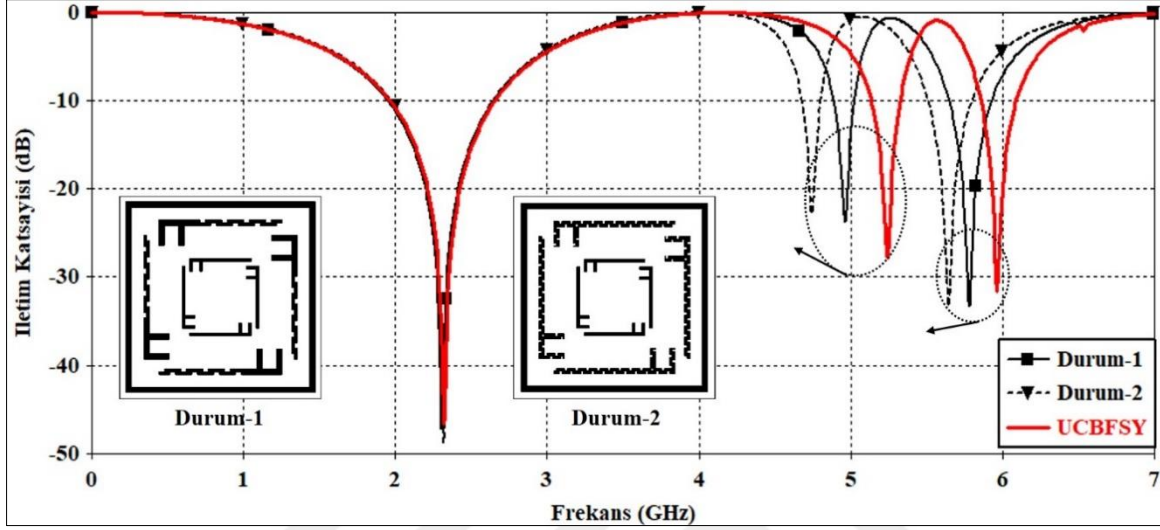
İkinci olarak Şekil 3.83'te verilen FTR'den iletken parça çıkarma (girinti) durumunun önerilen yapının rezonans frekansları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Girintinin eni FTR kalınlığının yarısı kadar ($w_{ek} = w_F/2$) alınmış ve boyu (d_{ek}) 1, 3 ve 5 mm olacak şekilde değiştirilmiştir. Şekil 3.86'da verilen S-parametre grafiğine göre yüzey normaline paralel olarak ($\theta=0^\circ$) gelen EM dalgayla indüklenmiş UÇBFSY'nin ikinci ve üçüncü rezonans frekanslarının FTR üzerinde oluşturulan girintiyle azaldığı ve bu azalmanın iletken boyu ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. İletken boyu 1 mm iken f_{z2} değerleri 5,10 GHz ve -26,1 dB, f_{z3} değerleri 5,84 GHz ve -33,1 dB; d_{ek} 5 mm iken f_{z2} değerleri 4,77 GHz ve -22,7 dB; f_{z3} değerleri 5,63 GHz ve -34,5 dB olmaktadır. Kısacası iletken boyu artarken f_{z2} 'nin iletim katsayısı artmakta, f_{z3} 'ünki azalmaktadır. Ayrıca Eş. 3.15 ve 3.16 dikkate alındığında toplam indüktif ve kapasitif değerlerin iletken boyutlarının artmasıyla birlikte azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.87. FTR üzerindeki girinti (oyuk) sayısı artırılarak elde edilen iki yeni yapı

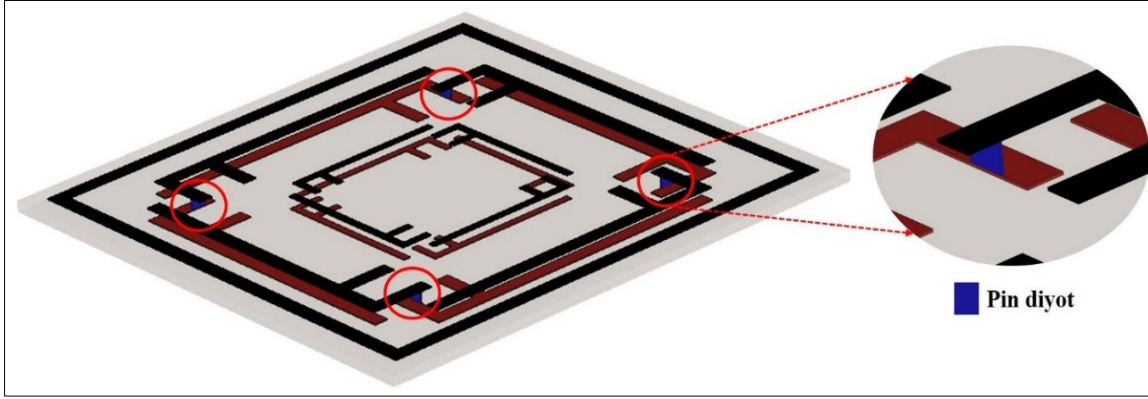
FTR'ler üzerindeki oyukların boyutları küçültülüp sayıları artırıldığında önerilen yapının karakteristik özelliklerinin nasıl değişeceğini görmek amacıyla Şekil 3.87'de verilen iki farklı yapı tasarlanmıştır. Birinci yapıda oyukların boyutları 0,7 x 0,35 mm'dir ve aralarında 2,1 mm mesafe olacak şekilde dış FTR'nin UKF'si üzerine her iki yöne yerleştirilmiştir. UKF'nin her iki yönündeki sırt sırta bakan oyuklar birbirleriyle temas etmemekte ve

aralarında 0,7 mm'lik boşluk bulunmaktadır. İkinci yapıda girintilerin boyu küçültülerek 0,35 x 0,35 mm boyutlarında oyuklar kullanılmıştır. Birinci yapıdakine benzer bir dizilim şekliyle dış FTR'lerin her uzantısına 1,05 mm'lik eşit aralıklarla uygulanmıştır. Sırt sırta gelen oyuklar arasındaki mesafe 0,35 mm'dir.



Şekil 3.88. FTR üzerinde oluşturulan oyukların etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

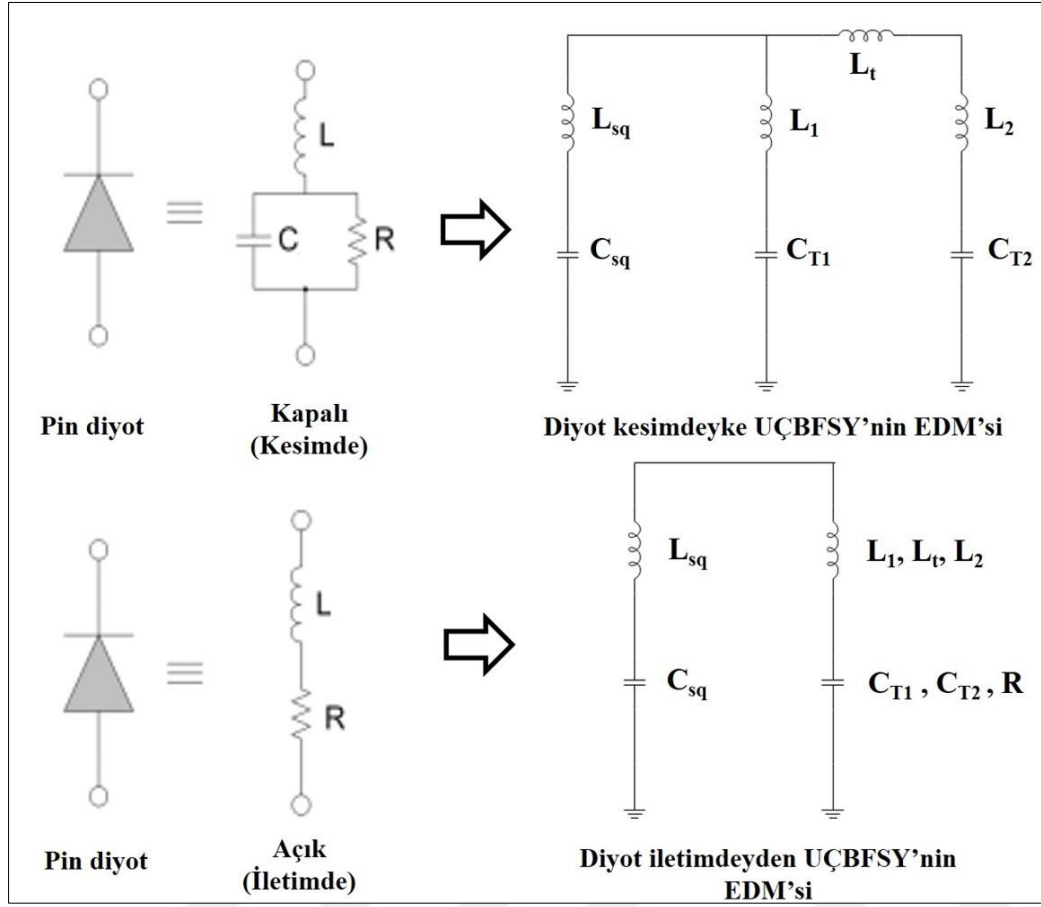
FTR üzerindeki oyuk sayısı artırılarak elde edilen iki yeni yapının UCBFSY üzerindeki etkisini gösteren S-parametre grafiği Şekil 3.88'de verilmiştir. Tek oyuklu yapıya (Şekil 3.86) benzer şekilde, çok oyuklu her iki durumda da ikinci ve üçüncü rezonans frekansları azalmaktadır. Durum-1'de f_{z2} 0,25 GHz kayarak 4,95 GHz'de oluşurken iletim katsayısı -23,6 dB'ye yükselmekte, f_{z3} ise 0,15 GHz kayarak 5,75 GHz'de oluşurken iletim katsayısı -33,2 dB'ye düşmektedir. Birinci durumda FTR üzerinde 8 oyuk bulunmaktadır ve oyukların toplam uzunluğu yaklaşık 5,4 mm'dir. Şekil 3.86'daki yapı ile kıyaslandığında oyuk uzunlukları birbirine çok yakın, derinlikleri ise aynıdır ancak gösterdikleri karakteristik özelliklerde birbirinden farklıdır. Bu durum oyukların rezonans frekansları üzerindeki etkisinin FTR'nin üzerinde açıldığı konuma da bağlı olduğunu göstermektedir. Durum-2'de toplam uzunlukları 9,8 mm olan 28 oyuk bulunmaktadır ve rezonans frekansları sırasıyla 4,74 GHz ve 5,63 GHz'de meydana gelmektedir. Sonuç olarak önerilen yapının rezonans frekansının iletken yapı üzerindeki eklentiler ve/veya oyuklar ile değiştirilebileceği anlaşılmaktadır. Bu değişimin oyuk veya eklentilerin konum ve boyutlarıyla doğrudan bağlantılı olduğu görülmektedir.



Şekil 3.89. PIN diyotlarla rezonans frekansı ayarlanabilen aktif FSY tasarımı

Literatürde rezonans frekansını değiştirmek için kullanılan diğer bir yöntem ise aktif yapılardır. Aktif FSY’de karakteristik özelliklerin (rezonans frekansı, polarizasyon vb.) anlık değişimi, pasif yapıya aktif elemanların eklenmesi ile mümkündür. En yaygın kullanılan aktif elemanlar açma/kapama anahtarları, kapasitörler; PIN, varaktör, varikap ve Schottky diyotlardır.

UÇBFSY yapısında ikinci ve üçüncü rezonans frekanslarının belirleyici unsuru üst ve alt yüzeyde bulunan FTR’lerdir. Üst yüzeydeki dış FTR’lerin DKF’si ile alt yüzeydeki komşu FTR’nin DKF’si arasında oluşan kapasitif etki (C_8) bu iki rezonans frekansının oluşumunda doğrudan rol oynamaktadır (Bkz. Şekil 3.79). Bundan dolayı önerilen yapının ikinci ve üçüncü rezonans frekanslarını değiştirmek için alt ve üst yüzeydeki DKF’ler arasında Şekil 3.89’daki gibi PIN diyot yerleştirilmiştir. Anahtar olarak kullanılacak PIN diyotların dışardan gerilim verilerek besleneceği düşünülmüştür. Eğer PIN diyotlara dışarıdan gerilim verilmezse üzerinde bir kutuplanma gerçekleşmeyecek ve diyotlar kesimde (kapalı) olacaktır. Bu durumda UÇBFSY’nin her iki yüzeyi arasında iletken bağlantı oluşmayacağından kapasitif etki devam edecek ve eşdeğer devre modeli aynı kalacaktır. Gerilim verilip kutuplanma sağlanırsa diyotlar iletimde (açık) olacak ve üst yüzeydeki FTR’lerle alt yüzeydeki FTR’ler arasında iletken bir bağlantı oluşacaktır. Oluşacak bağlantı, kapasitif etkinin (C_8) ortadan kalkmasını ve diyotun bir direnç olarak eşdeğer devreye eklenmesini sağlayacaktır (Şekil 3.90). Ayrıca UÇBFSY’deki dış FTR’lerin kesikli kare döngü yapısı da diyotların ilettime geçmesiyle ortadan kalkacak ve tam bağlantılı kare döngü benzeri yapıya dönüşecektir. Şekil 3.90’da gösterildiği gibi üst yüzeydeki FTR’ler ile alt yüzeydeki FTR’lerin eşdeğer devreleri (sırasıyla L_1 , C_{T1} ve L_2 , C_{T2}) birbirlerine seri bağlanacaktır. Böylece BDF özelliği gösteren üç rezonans frekansından birisi kaybolacaktır.

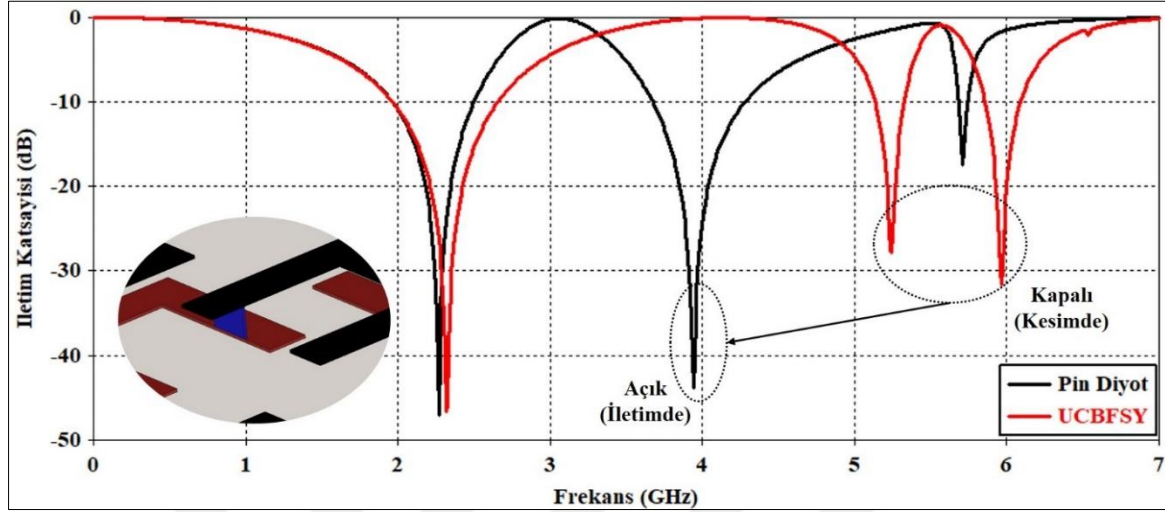


Şekil 3.90. Kesimde ve iletimde olan PIN diyotların önerilen yapının eşdeğer devre modeline etkisi

UÇBFSY yapısı ile PIN diyotların iletimde olduğu durum benzetim ortamında karşılaştırılmış ve ortaya çıkan S-parametre grafiği Şekil 3.91'de sunulmuştur. Yukarıda da bahsedildiği üzere PIN diyot dışarıdan verilen gerilimle iletime geçtiğinde önerilen yapının 5,2 ve 5,9 GHz'de oluşan ikinci ve üçüncü rezonans frekansları kaybolarak yerine 3,9 GHz'de -44 dB derinliğinde ve 0,7 GHz bant genişliğinde yeni bir rezonans frekansı oluşmaktadır. Ayrıca 5,7 GHz'de 0,05 GHz bant genişliğine sahip istenmeyen bir dalgalanma meydana gelmektedir, ancak bu rezonansın yapının üzerinde yapılacak parametresel eniyilemeyle giderilebileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak PIN diyot eklenerek elde edilen aktif antipodal F-tipi FSY yapısı diyot kesimde iken 5-6 GHz aralığında iki farklı frekans bandında gelen EM dalgayı durdururken diyot iletime geçtiğinde bu bant aralığında gelen EM dalga FSY'nin diğer tarafına geçebilmektedir. Bunun yanında diyot kesimdeyken BGF özelliği gösteren 3,7-4,55 GHz aralığındaki ilk çalışma bandı diyot iletime geçtiğinde yok olarak 3,65-4,35 GHz aralığında

bant durduran bir filtreye dönüşmektedir. Haberleşme teknolojisinde kullanılabileceği değerlendirilen UÇBFSY, aktif yapısı sayesinde çok daha fonksiyonel hale dönüşmektedir.



Şekil 3.91. PIN diyotların UÇBFSY üzerindeki etkisini gösteren TE modda ve $\theta=0^\circ$ 'deki S-parametre grafiği

3.3.6. UÇBFSY'nin literatürdeki benzerleri ile karşılaştırılması

Frekans seçici yüzeylerin işlevsel özellikleri, farklı açılarla gelen elektromanyetik dalgalar için değişmekte ve bozulmaktadır. Literatürde FSY'lerle ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde; önerilen yapının sağlaması gereken en önemli kriterlerden birisi belirli bir θ açısına kadar karakteristik özelliklerini koruması, bir başka deyişle açısal kararlı olmasıdır. Çok bantlı karakteristiğe sahip AFTFSY'nin tasarımı esnasında belirlenen isterlerde ise, yapının gelen EM dalga açısı 0° ile 60° arasında iken açısal kararlılığa sahip ve iletim/yansıma frekanslarındaki bozulma oranının en fazla %2 olması beklendiği belirtilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmada (Bölüm 3.3.3) UÇBFSY'nin TE polarizeli dalgaya karşı geliş açısı 60° 'e kadar göstermiş olduğu performans incelenmiş ve S-parametre grafiği Şekil 3.69'da verilmiştir. Buna göre yapının BDF özelliği sergileyen rezonans frekanslarındaki (f_{z1} , f_{z2} ve f_{z3}) bozulma (RFB) sırasıyla %1,6, %0,38 ve %0,17'dir. UÇBFSY'nin BGF özelliği gösteren çalışma frekanslarındaki (f_{p1} ve f_{p2}) bozulma ise sırasıyla %0,12 ve %0,3'dür. Ayrıca yapının rezonans frekanslarında, geliş açısının artmasıyla birlikte (60° 'ye kadar) 0,05 GHz'den daha küçük değişimler gözlemlense de UÇBFSY'nin çalışma bandı aralığında kayda değer bir değişim olmadığı, BDF/BGF özelliğini kaybetmediği ve 60° 'ye kadar kararlı bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir.

UÇBFSY yapısının eğik açıyla gelen bir EM dalgaya karşı göstermiş olduğu performansın önerilen yapıya bir üstünlük sağlayıp sağlamadığını göstermek maksadıyla literatürdeki benzer çok bantlı FSY tasarımlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan yapıların boyutları ve dielektrik alttaşı malzeme özellikleri, BDF ve BGF özelliğindeki rezonans frekansları ve iletim katsayıları (atenüasyon değeri – AD), karakteristik kararlılığını koruduğu en yüksek geliş açısındaki RFB değerleri ve bu RFB değerlerindeki ortalama bozulma (ORFB) değeri incelenmiştir. Önerilen yapıya ve literatürdeki benzer yapılara ait ayrıntılı analiz sonuçları (verileri) Çizelge 3.13'te listelenmiştir. Bu çizelgedeki veriler, incelenen yayımlardaki açıkça verilen değerlerden alınmış veya bu yayımlarda sunulan sonuçlardan ve/veya grafiklerden hesaplanarak çıkarılmıştır.

İlk çalışmada [68], FSY yapısı alttaşı malzemenin üst yüzeyine yerleştirilmiş iç içe kesikli iletken halka döngülerden oluşmaktadır. Yapının çalışma frekansı aralığı 27-37 GHz arasında olup BDF özelliğinde üç, BGF özelliğinde iki rezonans frekansı bulunmaktadır. Yapı açisal kararlılığını $\theta=30^\circ$ 'ye kadar korumakta ve bu açıdaki ortalama RFB değeri %0,98'dir. İkinci çalışmada [69], FSY yapısı dielektrik alttaşın her iki yüzeyine yerleştirilmiş kare döngü ve kare yama iletken elemanlardan oluşmaktadır. 2-12 GHz çalışma frekansı aralığında iki bant durduran ve iki bant geçiren rezonans frekansına sahip yapının $\theta=45^\circ$ 'deki ORFB değeri %2,25 olup RFB değeri özellikle f_z 'lerde daha yüksektir. Üçüncü çalışmada [70] aralarında hava boşluğu bulunan üç katlı kaskad bir FSY yapısı kullanılmıştır. Çalışma frekansı aralığı 1-18 GHz olan yapının BGF özelliği gösteren ve aralarında 14 GHz fark bulunan iki rezonans frekansı bulunmaktadır. Ancak $\theta=45^\circ$ 'deki ORFB değeri %5,9 olup EM dalgaının geliş açısı arttıkça yapının kararlılığı azalmaktadır. Çalışma [71]'de FSY metalik bir yüzey üzerine birim elemanların kesilerek işlenmesiyle yerleştirilmiş, elemanlar arasında kalan boşluklar dielektrik malzeme olarak kullanılmıştır. Bu FSY 7-13 GHz çalışma frekansı aralığında iki bant durduran ve iki bant geçiren rezonans frekansına sahiptir. Yapının $\theta=45^\circ$ 'deki ORFB değeri % 1,57 olup bu değer BDF özelliğindeki rezonans frekanslarında daha yüksektir. Çalışma [72]'de sunulan yapı, 1-6 GHz frekans aralığında iki bant durduran ve bir bant geçiren rezonans frekansına sahiptir. Çalışmadaki FSY yapısı dielektrik malzemenin üst yüzeyine yerleştirilmiş birbiriyle bağlantılı sekiz adet yarı-halka döngü iletken elemandan oluşmaktadır. $\theta=60^\circ$ 'de yapının BDF özelliği gösteren ikinci rezonans frekansındaki bozulma oranı %5,4 gibi yüksek bir değer olup ORFB değeri %2,5'dir. Diğer bir çalışma olan [73]'de dielektrik alttaşın her iki yüzeyine yerleştirilen farklı şekillerdeki iletken yamalar ve bunların arasına konulmuş

iletken bağlantı köprülerinden oluşan farklı bir FSY yapısı sunulmuştur. Tez çalışmasında önerilen yapıya benzer şekilde 1-7 GHz çalışma frekans aralığına sahip FSY'nin bant geçiren üç, bant durduran iki rezonans frekansı bulunmaktadır. EM dalganın geliş açısı 60° oluncaya kadar kararlı bir performans gösteren yapının ORFB değeri (%0,96) şuana kadar incelenen diğer benzer yapılardan daha düşüktür. [74]'deki FSY dielektrik alttaşın üst yüzeyine iç içe ve birbirine temas etmeyecek şekilde yerleştirilmiş sırasıyla iletken kare, halka ve kare döngü yapıdan oluşmaktadır. Basit bir yapıya sahip çok bantlı FSY'nin 1-8 GHz çalışma frekansı aralığında BDF özelliği gösteren üç ve BGF özelliğinde iki rezonans frekansı bulunmaktadır. Gelen EM dalganın yüzey normaliyle yaptığı açı arttıkça yapının kararlılığı azalmakta, geliş açısı 60° olduğunda ortalama bozulma değer %7,38 gibi yüksek bir orana ulaşmaktadır. İncelenen son çalışmada FSY kaskad bir yapıya sahiptir [75]. Çalışma frekansı aralığı 1-7 GHz olan yapının üç bant durduran ve iki bant geçiren rezonans frekansı bulunmakta ve bu frekansların $\theta=60^\circ$ 'deki ORFB değerleri %1,68'dir.

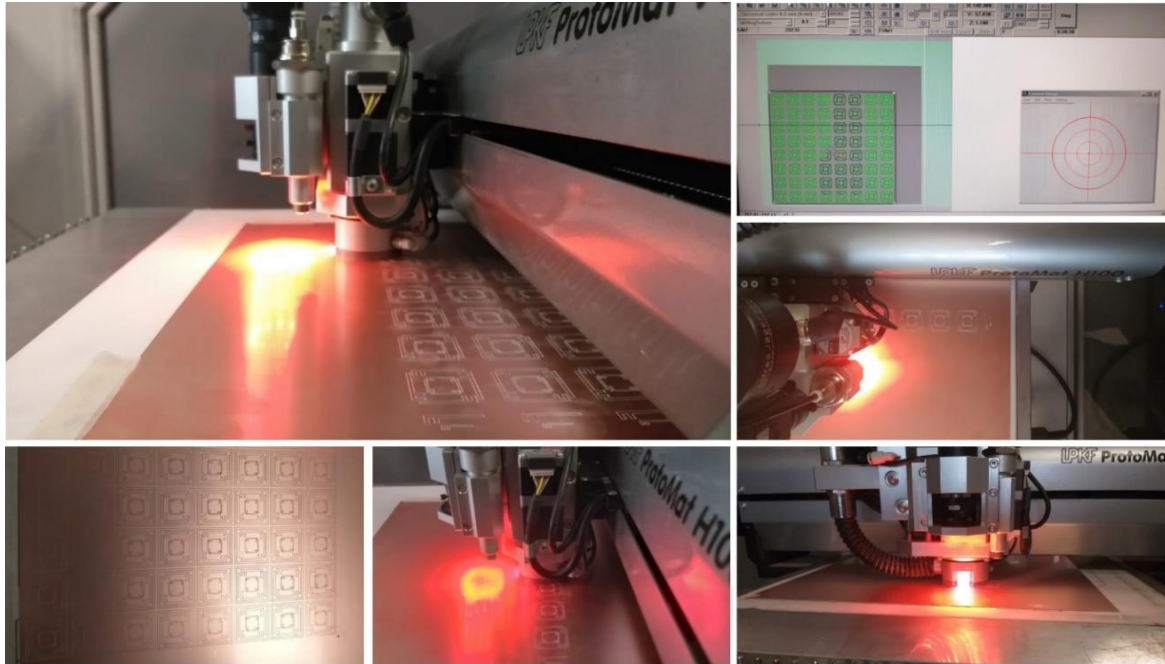
Çizelge 3.13'teki veriler incelendiğinde ilk beş çalışma arasında en düşük ORFB değerinin $\theta=30^\circ$ ve $\theta=45^\circ$ 'de sırasıyla %0,98 ve %1,57 olduğu görülmektedir. Ancak gelen EM dalganın yüzey normaliyle yaptığı açı arttıkça rezonans frekanslarındaki bozulmanın da artacağı göz ardı edilmemelidir. Öte yandan son üç makalede tıpkı bu tez çalışmasında önerilen yapıdaki gibi en yüksek geliş açısı 60° iken en düşük ORFB değeri %0,96'dır [73]. Çizelge 3.13'deki incelenen yapılarla kıyaslandığında UÇBFSY'nin RFB değerlerinin hem bant geçiren hem de bant durduran rezonans frekanslarında çok daha düşük (iyi) olduğu ve $\theta=60^\circ$ iken önerilen yapının ORFB değerinin, en düşük emsal değerine kıyasla, %62 daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.13. UÇBFSY'nin literatürdeki benzer çok bantlı FSY'lerle karşılaştırılması

FSY Yapısı		Boyutları ($\lambda x \lambda$)			Rezonans Frekansındaki Bozulma (RFB-%)						
			θ		TE-Mod						ORFB (%)
					Bant durdurun			Bant geçiren			
		Alttaş Özellikleri			f_{z1}	f_{z2}	f_{z3}	f_{p1}	f_{p2}	f_{p3}	
1	[68]	$0,375 \lambda$	Fr. (GHz)	30°	27,7	31,7	36,2	32,1	34,8	-	0,98
			AD* (dB)		-25	-27	-23	-20	-18	-	
		$\epsilon_r=3,68$ $Th=0,20$ mm	RFB-%		1,4	1,5	1,3	0,3	0,4	NA	
2	[69]	$0,11 \lambda$	Fr. (GHz)	45°	6	9,5	-	4	8	-	2,25
			AD (dB)		-50	-50	-	NA ⁺	NA ⁺	-	
		$\epsilon_r=2,65$ $Th=0,5$ mm	RFB-%		3,4	3,2	NA	1,2	1,2	NA	
3	[70]	$0,03 \lambda$	Fr. (GHz)	45°	-	-	-	1	14,9	-	5,9
			AD (dB)		-	-	-	-40	-30	-	
		$\epsilon_r=2,2$ $Th=0,5$ mm	RFB-%		NA	NA	NA	5,1	6,7	NA	
4	[71]	$0,376 \lambda$	Fr. (GHz)	45°	9,4	11,2	-	9,9	12,15	-	1,57
			AD (dB)		-28	-35	-	-22	-25	-	
		Bakır $Th=0,1$ mm	RFB-%		2,0	2,5	NA	1	0,9	NA	
5	[72]	$0,185 \lambda$	Fr. (GHz)	45°	2,4	5,3	-	4	-	-	2,5
			AD (dB)		-32	-18	-	NA ⁺	-	-	
		$\epsilon_r=4,4$ $Th=1,5$ mm	RFB-%		1,25	5,4	NA	0,9	NA	NA	
6	[73]	$0,075 \lambda$	Fr. (GHz)	60°	2,8	4,1	-	2,5	3,5	5	0,96
			AD (dB)		-13	-27	-	NA ⁺	NA ⁺	NA ⁺	
		$\epsilon_r=3,55$ $Th=0,2$ mm	RFB-%		1,8	0,5	NA	1,8	0,4	0,3	
7	[74]	$0,18 \lambda$	Fr. (GHz)	60°	2,4	3,5	5,5	3	4,2	-	7,38
			AD (dB)		-60	-50	-60	NA ⁺	NA ⁺	-	
		$\epsilon_r=2,1$ $Th=1,6$ mm	RFB-%		16,7	8,6	2,7	6,6	2,3	NA	
8	[75]	$0,10 \lambda$	Fr. (GHz)	60°	2,4	3,7	5,2	3,1	4,5	-	1,68
			AD (dB)		-35	-22	-27	NA ⁺	NA ⁺	-	
		$\epsilon_r=3$ $Th=0,76$ mm	RFB-%		3,3	1,4	1,0	1,6	1,1	NA	
UÇBFSY		$0,20 \lambda$	Fr. (GHz)	60°	2,4	5,2	5,9	4,1	5,5	-	0,59
			AD (dB)		-44	-27	-33	-27	-22	-	
		$\epsilon_r=3,38$ $Th=0,5$ mm	RFB-%		1,6	0,38	0,17	0,12	0,18	NA	

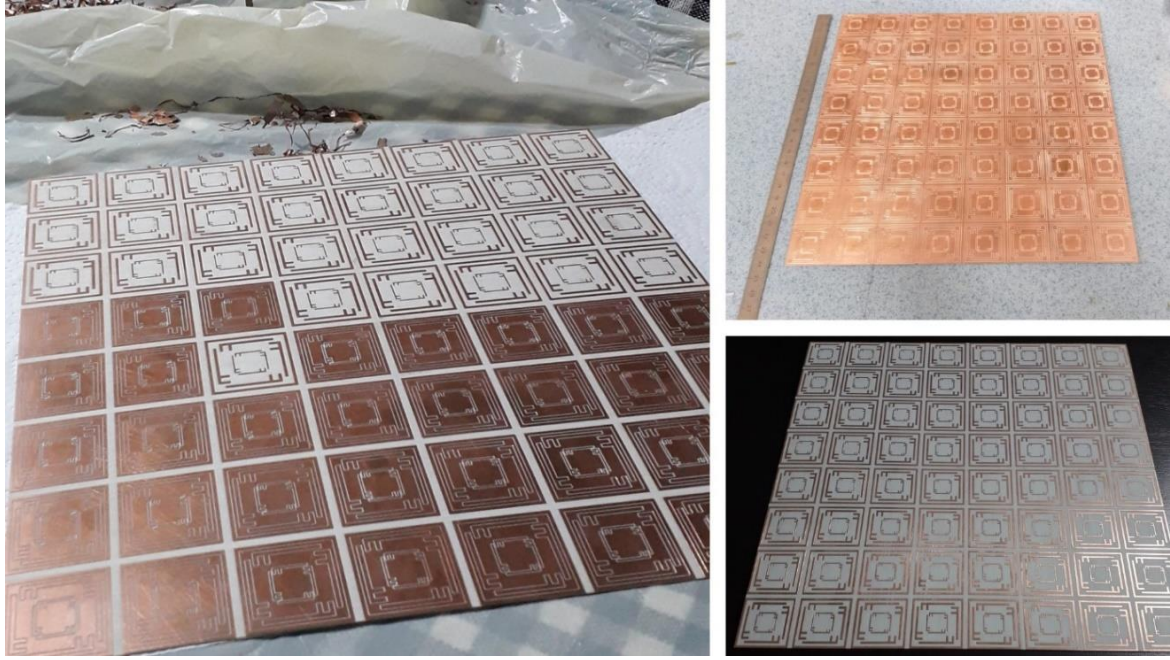
3.3.7. UÇBFSY'nin üretimi ve deney düzeneği

UÇBFSY'nin üretim aşamasında dielektrik alttaş malzeme (baskı devre kartı – PCB) olarak detaylı özellikleri bölüm 3.3.2'de verilen Rogers 4003C kullanılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen yapı her iki yüzeyi bakırla kaplı bu dielektrik alttaş malzeme üzerine kazıma ve soyma yönetimiyle işlenmiştir. Üretim için kimyasal kullanmadan kazıma yöntemi (freze) ile yüzey desenleri oluşturan, delme ve kesme işlemi yapabilen LPKF Promat H100 baskı devre kazıma cihazı kullanılmıştır. Sonsuza yakın periyodik bir FSY dizisini modelleyebilmek için, kazıma cihazının uygulama alanındaki boyut kısıtlaması da dikkate alınarak, CST MWS programıyla $20,2 \times 20,2 \text{ cm}^2$ boyutlarında 64 elemanlı (8 x 8) düzlemsel UÇBFSY dizisi oluşturulmuştur. Benzetim ortamında oluşturulan bu yapının alt ve üst yüzeyleri iki boyutlu vektör resim dosyası biçiminde (gerber) hazırlanmıştır. LPKF BoardMaster programı vasıtasıyla hazırlanan gerber dosyaları üretim için düzenlenerek kazıma cihazına aktarılmıştır. Ardından LPKF Promat H100 cihazı ile UÇBFSY yapısının PCB üzerine genel hatları kazınarak çizilmiştir. Önerilen çok bantlı yapının yukarıda bahsedilen baskı devre kazıma cihazı ile üretiminin aşamaları Şekil 3.92'de detaylı olarak sunulmuştur.



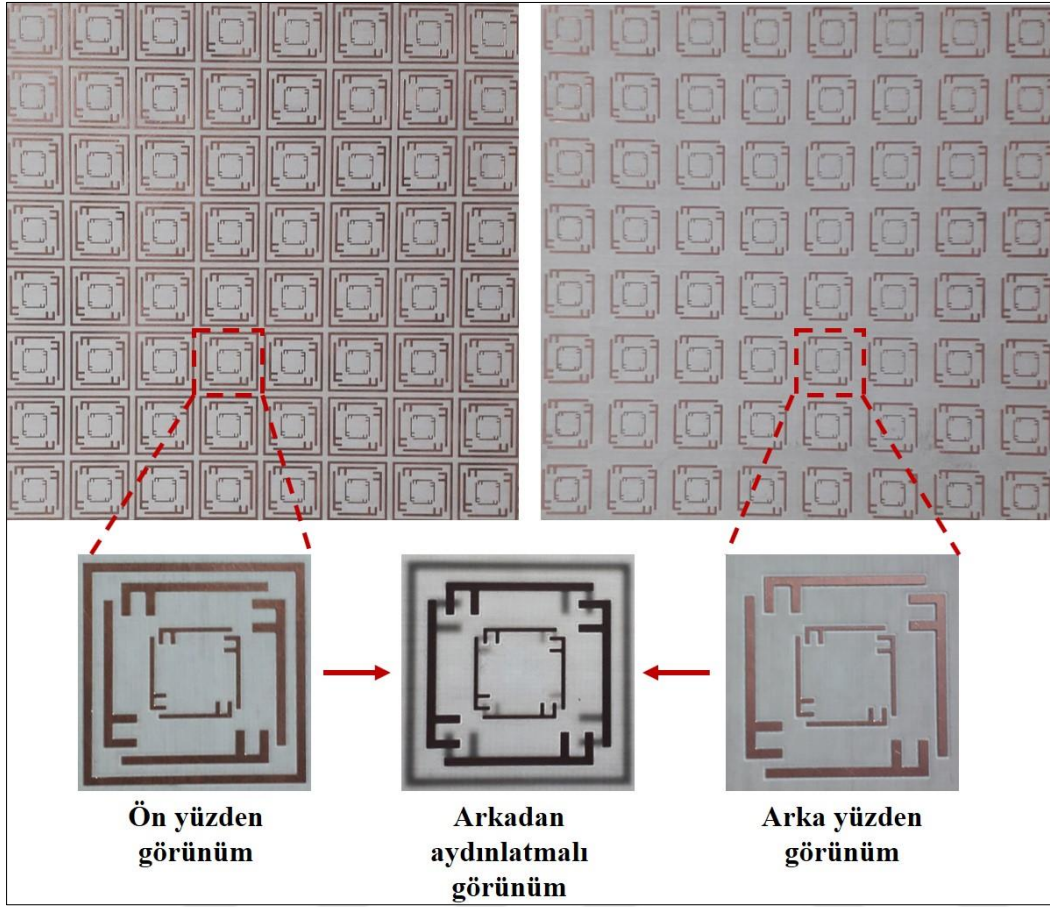
Şekil 3.92. UÇBFSY'nin baskı devre kazıma cihazı ile üretimi

Kazıma yöntemi ile Rogers 4003C PCB'si üzerine genel hatları işlenen UÇBFSY'nin son hali Şekil 3.93'te sağ üst köşede gösterilmiştir. Kazıma alanı dışında kalan iletken kısımların baskı devre kazıma cihazıyla ayıklanması maliyetli ve uzun zaman alan bir yöntemdir. Bundan dolayı maket bıçağı yardımıyla kalan bakır kısımlar Şekil 3.93'teki gibi soyularak UÇBFSY hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.93. UÇBFSY'nin iletken soyma yöntemi ile hazırlanışı

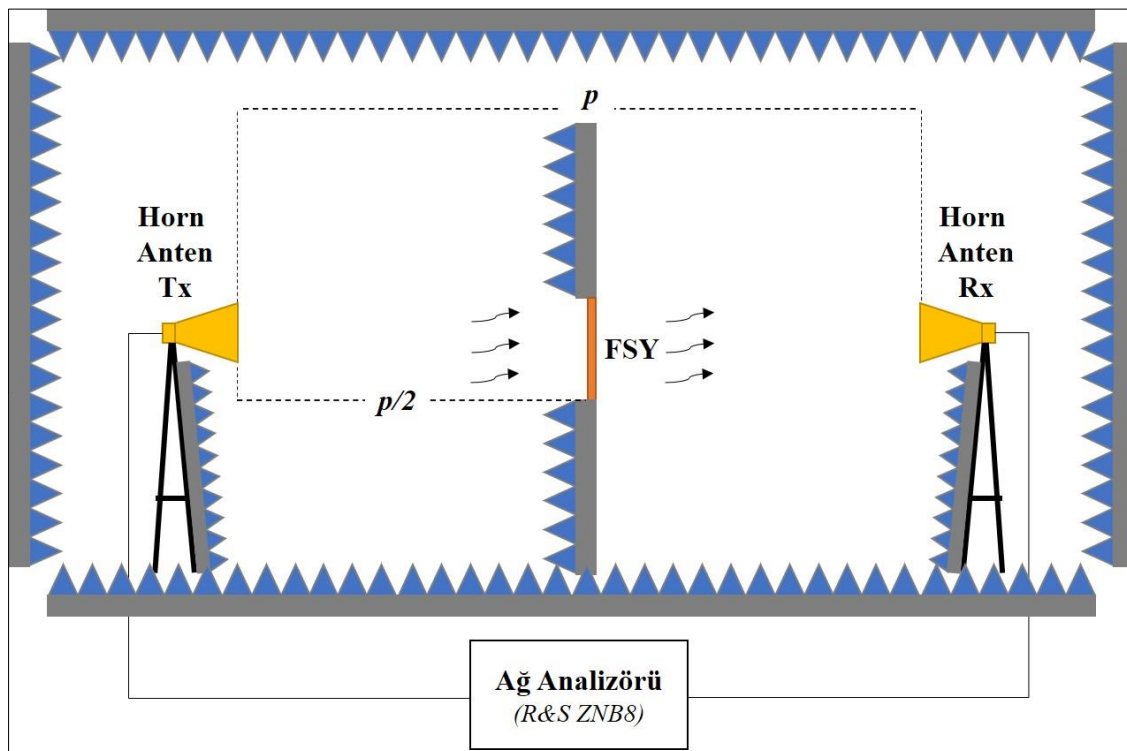
Üretimi tamamlanan uygulanabilir çok bantlı karakteristiğe sahip antipodal F-tipi FSY'nin (UÇBFSY) detaylı görünümü Şekil 3.94'te verilmiştir. 8 x 8 düzlemsel dizilime sahip UÇBFSY'nin ön yüzünde çerçeve eleman olarak kare döngü yapı ve aralarında 90° olacak şekilde dört yöne simetrik olarak yerleştirilmiş iç içe FTR'ler (dış ve iç FTR'ler), arka yüzünde ise öndeki iç içe FTR'lerin ters simetrikleri (antipodali) bulunmaktadır. İletkenlerin arasında ise dielektrik alttaş malzeme (beyaz renkli) yer almaktadır. UÇBFSY birim eleman yapısını daha iyi anlayabilmek ve iletkenler arasındaki ters simetrikliği gösterebilmek için FSY'nin arka yüzeyinden aydınlatılmış görünümü Şekil 3.94'te sunulmuştur.



Şekil 3.94. Üretimi tamamlanan UÇBFSY'nin detaylı görünümü

Önerilen yapının ölçümü için, tüm yüzeyleri ferrit üzerine yapıştırılmış karbon içeren konik yapıları frekans emici sünger malzemelerle kaplı ve boyutları 6.73x2.85x2.60 m olan bir mikrodalga yankısız oda kullanılmıştır. Bu odanın iki ucuna birbirlerine doğru bakacak şekilde 0.7-8 GHz çalışma frekans aralığına sahip birisi alıcı diğeri verici özellikte empedansı 50 Ohm olan iki geniş bantlı boynuz (horn) anten (GBHA) yerleştirilmiştir. Antenler düşük elektromanyetik saçılma özelliğine sahip ayarlanabilir üç-ayak (tripod) üzerine konulmuş, ayrıca ayakların etrafı EM saçılmayı en aza indirmek amacıyla ilave emici süngerle kapatılmıştır (Şekil 3.95). Ölçüm için kullanılan iki GBHA; çalışma frekans aralığı 9 kHz - 8,5 GHz olan, iki portlu, S_{11} , S_{12} , S_{21} ve S_{22} ölçümleri yapabilen ve yankısız odanın dışarısında konumlandırılmış Rohde & Schwarz - ZNB8-B10 / B14 vektör ağ analizörüne (VNA) bağlanmıştır. GBHA'lar arasındaki mesafe (p) 3,6 m olacak şekilde ayarlanmıştır. UÇBFSY tam ortaya ($p/2=1.8$ m) iki antene eşit mesafede olacak şekilde ve ön yüzü alıcıya, arka yüzü verici antene bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Dielektrik alttaş kalınlığı antenlere olan mesafeye kıyasla çok çok küçük ($P \gg \text{Sub}_h$) olduğu için ihmal edilmiştir. Yapının kenarlarında oluşacak istenmeyen EM saçılmayı (kenar etkisi) azaltmak

için önerilen FSY'nin etrafı emici süngerlerle çevrelenmiştir (Şekil 3.95). UÇBFSY'nin ölçümü için kurulan deney düzeneği ve yankısız oda düzeni Şekil 3.95 ve 3.96'da verilmiştir. Deneyin doğruluğunu artırmak için; birinci adımda FSY yapısı olmadan iki GBHA ile ortamın iletim katsayısı ölçülmüştür, ikinci adımda UÇBFSY deney düzeneğine yerleştirilerek tekrar iletim katsayıları elde edilmiş ve son adımda elde edilen iki ölçüm sonucu birbiriyle kalibre edilmiştir.

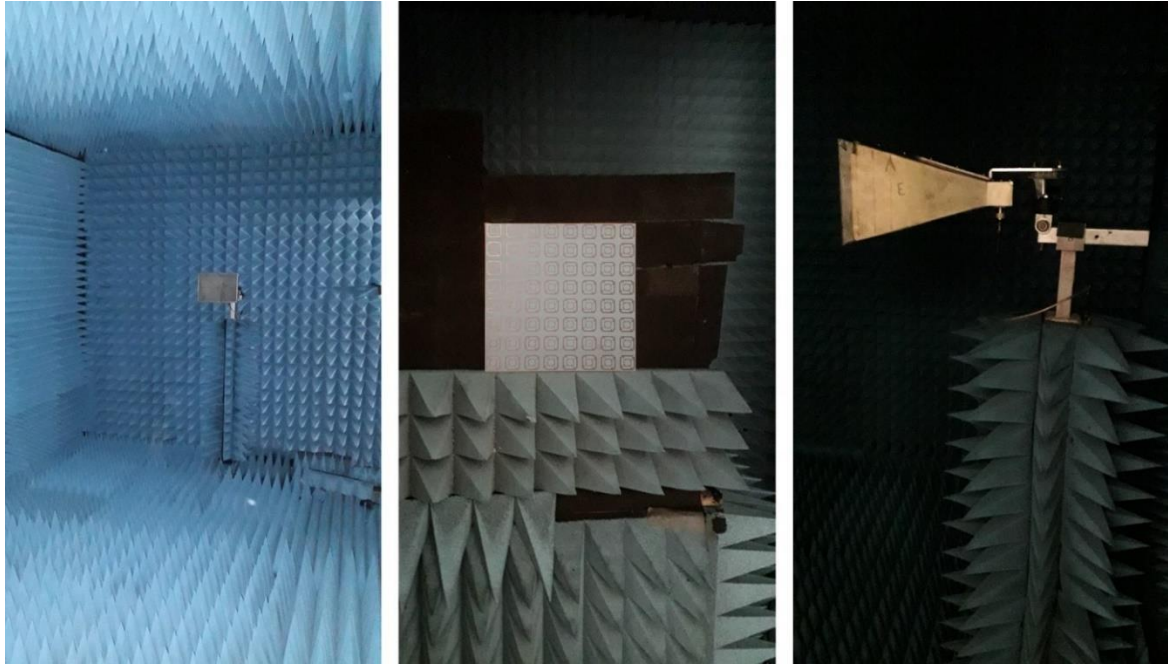


Şekil 3.95. UÇBFSY'nin ölçümü için kurulan deney düzeneği

3.3.8. UÇBFSY'nin benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Üretimi yapılan UÇBFSY'nin karakteristik özelliklerini belirlemek ve performans analizini değerlendirmek için bölüm 3.3.6'da detayları verilen laboratuvar koşullarında ölçümü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilen ölçüm sonuçları (Şekil 3.97) incelendiğinde, TE modda yüzey normaline paralel olarak ($\theta=0^\circ$) gelen dalgayla indüklenen çok bantlı yapının, benzetim sonuçlarında olduğu gibi, BDF özelliği gösteren üç farklı frekansta rezonans olduğu görülmektedir. Üretimi gerçekleştirilen UÇBFSY'nin birinci rezonans frekansı 2,39 GHz'de, ikinci rezonans frekansı 5,24 GHz'de ve sonuncusu ise 5,9 GHz'de oluşmaktadır. Rezonans frekanslarının -10 dB'deki bant genişlikleri ise sırasıyla 1,96-2,71 GHz

aralığında 0,75 GHz; 5,03-5,32 GHz aralığında 0,29 GHz ve 5,78-6,25 GHz aralığında 0,47 GHz genişliğindedir. UÇBFSY'nin benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen verilerin uyum içerisinde olduğu, üretimi gerçekleştirilen yapıda Wi-Fi, WiMAX ve WLAN bantlarında en az -32 dB'lik bir zayıflamanın elde edildiği görülmektedir. Ayrıca C-Bant uydu haberleşme sistemlerinde kullanılabilecek BGF özelliğindeki iki frekans bandına da sahip olduğu Şekil 3.97'deki iletim karakteristiklerinden anlaşılmaktadır.



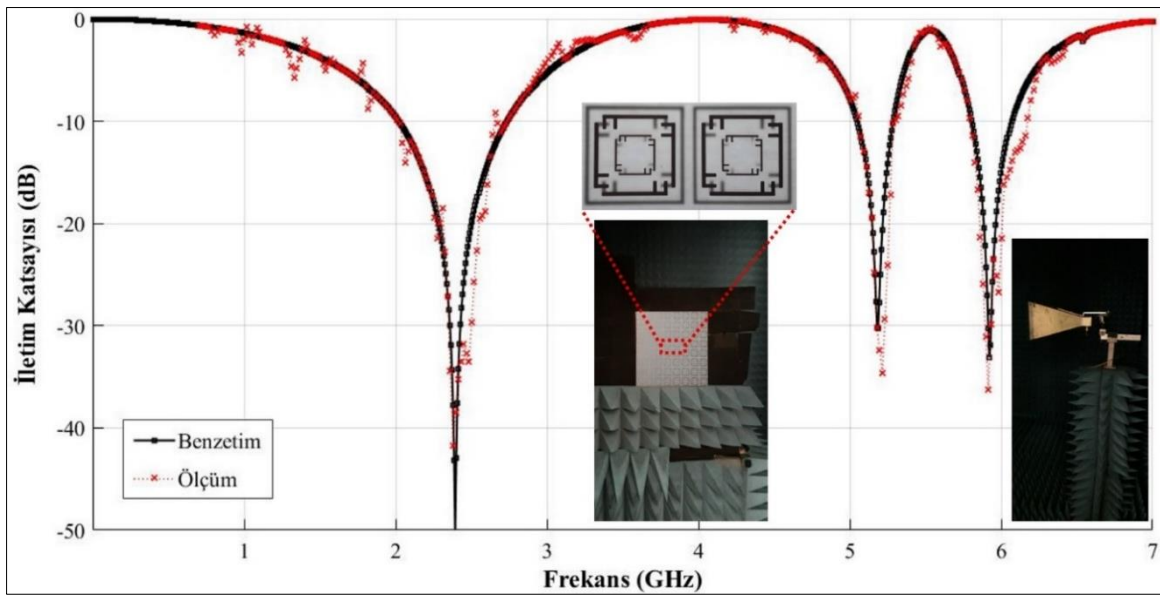
Şekil 3.96. UÇBFSY'nin ölçümü için kullanılan yankısız oda

Benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçları arasında oluşan farklara ve ölçüm sonuçlarındaki düzensiz dalgalanmalara neden olabilecek etmenler aşağıda sıralanmıştır.

Bilgisayara dayalı benzetim ortamlarında bir FSY yapısının sonsuza yakın bir eleman dizisinden oluştuğu değerlendirilmekte ve bundan dolayı floquet harmonikleriyle ifade edilmektedir. Ancak üretim aşamasında sonsuza yakın bir FSY dizisi gerçekleştirmek ve ölçümünü yapmak neredeyse imkânsızdır. Benzetim ve ölçüm sonuçları arasında oluşabilecek farkı en aza indirmek için FSY'nin en az 15 x 15'lik bir dizi elemandan oluşması gerekmektedir [76]. Kullanılan LPKF Promat H100 baskı devre kazıma cihazının üretim alanının yetersiz olması ($30 \times 30 \text{ cm}^2$) ve üretim maliyeti nedeniyle bu tez çalışmasında 8x8'lik bir yapı hazırlanabilmiştir.

FSY'nin üretimi esnasında kullanılan baskı devre kazıma cihazıyla yapılan kazıma ve elle yapılan soyma yöntemi neticesinde çok küçük boyutlarda da olsa üretim hataları oluşabilmektedir. Benzetim ortamında kusursuz bir tasarımı olan FSY ile üretim hatalarına sahip FSY kıyaslandığında sonuçların birbiriyle aynı olamayacağı açıktır

Son olarak benzetim ortamındaki varsayılan ölçüm alanı ile gerçek ortamdaki ölçüm alanı arasında sıcaklık, nem, saçınım miktarı, sınır şartları gibi farklılıklar ölçüm sonuçları üzerinde etkili olmaktadır.



Şekil 3.97. UÇBFSY'nin $\theta=0^\circ$ 'de, TE moddaki benzetim ve ölçüm sonuçları

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında FSY'lerle ilgili literatür taraması yapılarak sık kullanılan geometrilere sahip yapıların karakteristik davranışları incelenmiş ve tek bir rezonans frekansında bant durduran filtre özelliği gösteren 10 farklı tasarım gerçekleştirilmiştir. Her bir yapı; rezonans frekansı, bant genişliği, iletim katsayısı ve 45° açıyla gelen EM dalgaya karşı rezonans frekansındaki bozulma oranı açısından karşılaştırılarak yapıların üstünlük ve zayıflıkları belirtilmiştir.

Yapılan çalışmalardan elde edilen bilgi birikimiyle dielektrik alttaş üzerine dört yöne 90° simetrik olarak yerleştirilmiş iletken F-tipi rezonatörlerden (FTR) oluşan tek bantlı FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın simetrik yapısını bozmadan ve boyutlarını değiştirmeden rezonans frekansını azaltmak için ölçeklendirilmiş FTR'ler dış çerçeveyi oluşturan iletken yapının iç kısmına konumlandırılmıştır. Önerilen tek bantlı F-tipi FSY yapısının iki farklı çalışma bandında BDF özelliğini sergileyebilmesi için yapının ön yüzünde bulunan dıştaki ve içteki FTR'lerin antipodali (ters simetriği) alınarak dielektrik alttaşın arka yüzüne yerleştirilmiştir. Böylelikle iletken elemanlar arasındaki simetriklik uyumu korunarak AFTFSY tasarımının açısız kararlı bir yapıya sahip olması sağlanmıştır. Ayrıca AFTFSY'nin parametreleri frekans eğrileri, yüzey akım grafikleri üzerinden analizler edilerek yapının eniyilemesi gerçekleştirilmiş ve boyutları değişen bileşenlerin yapının performansına etkisi incelenmiştir.

AFTFSY'nin üzerinde yüzey akım dağılımının yoğunlaştığı bölgelere delikler açmak, iletken yamalar eklemek ve mevcut parametreleri değiştirmek suretiyle BDF özelliğinde ultra geniş bantlı bir yapı elde etmek için çalışmalar yapılmıştır. Özellikle iletken kalınlığı artırılarak yapılan parametresel değişim yöntemiyle -10 dB'deki bant genişliği 3,2 GHz ve kesirli bant genişliği % 21,05 olan yeni bir yapı elde edilmiş ve yapının UGB sınıfında bir tasarıma sahip olduğunu gösterilmiştir.

FSY yapılarının kullanıldığı yüzeylerin her zaman düzlemsel olması beklenmemektedir. Bundan dolayı AFTFSY'nin eğik yapılı yüzeylere (konformal) uygulandığında, gelen elektromanyetik (EM) dalganın da açısına bağlı olarak, iletim ve yansıma karakteristiklerindeki değişim benzetim ortamında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 1 m'den büyük çaplı yüzeylere uygulandığında yapıdaki bükülme oranı azalacağından

AFTFSY'nin karakteristik özelliklerindeki bozulmanın da azalacağı, 1 m'den küçük çaplı yüzeylere uygulandığında ise özellikle yapının birinci çalışma bandındaki bozulmanın yüzey çapının azalmasıyla ters orantılı olarak artacağı anlaşılmıştır.

Tez çalışmasının temel amacı olan çok bantlı karakteristiğe sahip antipodal F-tipi yapıyı içeren bir FSY elde edebilmek için tasarımda iki farklı yöntem kullanılmıştır. Birincisi çok katmanlı (kaskad) yapılar, ikincisi ise iç içe (çerçeve eleman) yapılarıdır. Kaskad yöntemiyle üç farklı tasarım gerçekleştirilmiştir. Her bir tasarım sonucunda bant sayısı artırılarak en az üç farklı frekans bandı aralığında BDF özelliği gösteren yapılar elde edilmiştir. Ancak gelen EM dalga açısı 45° iken yapıların açisal kararlılıklarının bozulduğu, çalışma bantları arasında istenmeyen rezonans frekanslarının oluştuğu ve bundan dolayı BGF özelliğindeki iletim bantlarının kaybolduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu yapıların üretiminin zor ve düşük frekans bantlarında yüksek bant genişliğine sahip çalışma bantları elde etmenin güç olması nedeniyle tez çalışmasının devamında diğer bir tasarım yöntemi iç içe yapılar kullanılmıştır.

AFTFSY yapısının karesel biçimde olması nedeniyle çerçeve eleman olarak kare döngü iletken seçilmiş ve AFTFSY'nin üst yüzeyindeki FTR'lerin etrafını çevreleyecek şekilde sadece alttaşın üst yüzeyine eklenmiştir. Alt yüzeydeki AFTFSY yapısı aynen korunmuştur. Uygulanabilir çok bantlı karakteristiğe sahip FSY (UÇBFSY) tasarımında dielektrik alttaş olarak bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 3,38, kayıp tanjant değeri ($\tan \delta$) 0,0027 ve kalınlığı (sub_n) 0,5 mm olan Rogers 4003C kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre UÇBFSY yapısının üç farklı frekans bandında BDF ve iki farklı çalışma bandında BGF özelliğini sergilediği görülmüştür. UÇBFSY'nin ilk rezonans frekansı 2.4 GHz'de oluşurken, 0,78 GHz BG'si ile 2.4 GHz Wi-Fi ve 2,5 GHz frekansında çalışan WiMAX sistemlerinin istenmeyen sinyalleri engelleyebileceği anlaşılmıştır. Yapının ikinci ve üçüncü rezonans frekansı sırasıyla 5,2 GHz ve 5,9 GHz'de meydana gelirken 5,8 GHz'de çalışan WiMAX ve 5.9 GHz frekansında çalışan WLAN sistemlerinden yayılan sinyalleri durdurabileceği görülmüştür. 4.1 GHz ve 5,5 GHz'de oluşan geçirme frekanslarıyla ise C-Bant uydu haberleşme sistemlerinden yayılan EM dalgaları iletebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca geliş açısının artmasıyla birlikte (60° 'ye kadar) UÇBFSY'nin rezonans frekanslarında 0,05 GHz'den daha küçük değişimler gözlemlense de çalışma bandı aralığında kayda değer bir değişim olmadığı, BDF/BGF özelliğini kaybetmediği ve 60° 'ye kadar kararlı bir yapıya sahip olduğu saptanmıştır.

Bilgisayara dayalı benzetim programıyla (CST MWS) yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin doğruluğunu kanıtlamak için UÇBFSY'nin eşdeğer devre modeli (EDM) çıkarılmış ve eşdeğer analizi (EDA) yapılmıştır. CST ve EDA sonuçları karşılaştırıldığında f_{z1} 'de herhangi bir sapma meydana gelmezken, f_{z2} 'de %0,19'luk (0,01 GHz) ve f_{z3} 'te %0,68'lik (0,04 GHz) bir frekans sapması olduğu görülmüştür. Ayrıca literatürdeki benzerleri ile karşılaştırıldığında UÇBFSY'nin RFB değerlerinin hem bant geçiren hem de bant durduran rezonans frekanslarında çok daha düşük (iyi) olduğu ve $\theta=60^\circ$ iken önerilen yapının ORFB değerinin, en düşük emsal değerine kıyasla, % 62 daha iyi olduğu anlaşılmıştır.

UÇBFSY'nin üretimi için LPKF Promat H100 baskı devre kazıma cihazı kullanılmıştır. $20,2 \times 20,2 \text{ cm}^2$ boyutlarında 64 elemanlı (8 x 8) düzlemsel bir dizinin üretimi yapılarak yankısız oda içerisinde hazırlanan deney düzeneğinde karakteristik özelliklerini belirlemek için ölçümü gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen UÇBFSY'nin birinci rezonans frekansı 2,39 GHz'de, ikincisi 5,24 GHz'de ve sonuncusu ise 5,9 GHz'de olduğu görülmüştür. UÇBFSY'nin benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen verilerin uyum içerisinde olduğu, üretimi gerçekleştirilen yapıda Wi-Fi, WiMAX ve WLAN bantlarında en az -32 dB'lik bir zayıflamanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca C-Bant uydu haberleşme sistemlerinde kullanılabilecek BGF özelliğindeki iki frekans bandına da sahip olduğu iletim karakteristiklerinden anlaşılmıştır.

Bu tez çalışmasında prototip üretimi yapılan UÇBFSY'nin askeri ve sivil haberleşme sistemlerinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Çalışmanın bir sonraki safhasında aktif UÇBFSY üretimi gerçekleştirilerek çok daha fonksiyonel hale dönüştürülmesi sağlanabilir.



KAYNAKLAR

1. Shukla, V. (2019). Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advance*, 1 (5), 1640-1671.
2. Munk, B.A. (2000). *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. New York: Wiley, 12-268.
3. Anwar, R.S., Mao, L., and Ning, H. (2018). Frequency selective surfaces: A review. *Applied Sciences*, 8 (9), 1-47.
4. Hopkinson, F., and Rittenhouse, D. (1786). An optical problem, proposed by mr. Hopkinson, and solved by mr. Rittenhouse. *Transactions of the American Philosophical Society*, 2, 201-206.
5. Marconi, G. C., and Franklin, S. (1919). *Reflector for use in wireless telegraphy and telephony*, US Patent No. 1301473A.
6. Munk, B.A. (1974). *Periodic Surface For Large Scan Angles*, US Patent No. 3789404A.
7. Munk, B.A. (1975). *Periodic Antenna Surface of Tripole Slot Elements*, US Patent No. 3975738A.
8. Yee, J.S. (1993). *Frequency Selective Surface (FSS)*, US Patent No. 5208603A.
9. Peterson, A.F., Ray, S.L., and Mittra, R. (1997). *Computational Methods for Electromagnetics*. New York: Universities Press, 11-76.
10. Wang, D.S., Qu, S.W., and Chan, C.H. (2016). Frequency selective surfaces. *Handbook of Antenna Technologies*, 1, 471-525.
11. Wu, T.K. (1995). *Frequency Selective Surface and Grid Array*. New York: Wiley, 81-342.
12. Langley, R.J., and Parker, E.A. (1982). Equivalent circuit model for arrays of square loops. *IET Electronics Letters*, 18 (7), 294.
13. Lee, C.K.B., Sc, R.J., and Langley, E.E. (1985). Equivalent-circuit models for frequency selective surfaces at oblique angles of incidence. *IEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation*, 132 (6), 395-399.
14. Sung, H.H. (2006). *Frequency selective wallpaper for mitigating indoor wireless interference*. New Zeland: The University of Auckland Press, 18-81.
15. Callaghan, P., Parker, E. A., and Langley, R. J. (1991). Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces. *IEE Proceedings H: Microwaves, Antennas and Propagation*, 138, 448-454.

16. Lima, A.E.C., Parker, E.A., and Langley, R.J. (1994). Tunable frequency selective surface using liquid substrates. *IET Electronics Letters*, 30 (4), 281-282.
17. Hooberman, B. (2005). *Everything You Ever Wanted to Know About Frequency Selective Surface Filters but Were Afraid to Ask*. Illinois: University of Illinois Press, 25-38.
18. Zienkiewicz, O., Taylor, R., and Zhu, J. Z. (2013). *The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals (7th Ed.)*. Amsterdam: Elsevier, 86-197.
19. Gedney, S. (1994). The finite element method in electromagnetics [Book Review]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 36 (3), 75-76.
20. Bardi, I., Remski, R., Perry, D., and Cendes, Z. (2002). Plane wave scattering from frequency-selective surfaces by the finite-element method. *IEEE Transactions on Magnetism*, 38 (2), 641-644.
21. Vouvakis, M.N., Zhao, K., and Lee, J. (2006). Finite-element analysis of infinite periodic structures with nonmatching triangulations. *IEEE Transactions on Magnetism*, 42 (4), 691-694.
22. Gibson, W.C. (2007). *The Method of Moments in Electromagnetics (2nd Ed.)*. New York: CRC Press, 86-97.
23. Wang, X., and Werner, D.H. (2010). Improved model-based parameter estimation approach for accelerated periodic method of moments solutions with application to the analysis of convoluted frequency selected surfaces and metamaterials. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58 (1), 122-131.
24. Blackburn, J., and Arnaut, L.R. (2005). Numerical convergence in periodic method of moments analysis of frequency-selective surfaces based on wire elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53 (10), 3308-3315.
25. Schneider, J.B. (2020). *Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method*. Washington: The Washington State University Press, 20-46.
26. Ji, J., and Ma, Y. (2019). Tunability study of plasma frequency selective surface based on FDTD. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47 (3), 1500-1504.
27. Guo, Y., Zhang, T., Yin, W.Y., and Wang, X.H. (2015). Improved hybrid FDTD method for studying tunable graphene frequency-selective surfaces (GFSS) for THz-wave applications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 5 (3), 358-367.
28. Katsikadelis, J. T. (2002). *Boundary Elements: Theory and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 32-98.
29. Cheng, A.H.D., and Cheng, D.T. (2005). *Engineering Analysis with Boundary Elements*. Amsterdam: Elsevier, 127-187.

30. Zhang, L., Contopanagos, H., Alexopoulos, N.G., and Yablonovitch E. (1998). *Analysis of frequency selective layers via a combined finite-element integral-equation method*. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1998 Digest Antennas Gateways to Global Network (398-401). Atlanta, CA: IEEE.
31. Chun, Y., and Lu, C. (2003). *Analysis of curved frequency selective surfaces using the hybrid volume-surface integral equation approach*. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium held conjunction with North American Radio Science Meeting (809-812). Columbus, TN: IEEE.
32. Marcuvitz, N. (1951). *Waveguide Handbook*. New York: IET, 226–387.
33. Dubrovka, R., Vazquez, J., Parini, C., and Moore, D. (2006). Equivalent circuit method for analysis and synthesis of frequency selective surfaces. *IEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation*, 153 (3), 213-220.
34. Costa, F., Monorchio, A., and Manara, G. (2014). An overview of equivalent circuit modeling techniques of frequency selective surfaces and metasurfaces. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 29 (12), 960-976.
35. Nauman, M., Saleem, R., Rashid, A.K., and Shafique, M.F. (2016). A miniaturized flexible frequency selective surface for X-band applications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58 (2), 419-428.
36. Zheng, S., Yin, Y., Fan, J., Yang, X., Li, B., and Liu, W. (2012). Analysis of miniature frequency selective surfaces based on fractal antenna–filter–antenna arrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 240–243.
37. Rashid, A.K., Li, B., and Shen, Z. (2014). An overview of three-dimensional frequency-selective structures. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 56 (4), 202-204.
38. Alonso-Gonzalez, L., Ver-Hoeye, S., Fernandez-Garcia, M., and Las-Heras Andres, F. (2018). Broadband flexible fully textile-integrated bandstop frequency selective surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(10), 5291-5299.
39. Ferreira, D., Caldeirinha, R.F. da S., Cuiñas, I., and Fernandes, T.R. (2017). Tunable square slot frequency selective surface equivalent circuit modelling and optimisation. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 11 (5), 737-742.
40. Lorenzo, J., Lázaro, A., Villarino, R., and Girbau, D. (2016). Modulated frequency selective surfaces for wearable RFID and Sensor applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64 (10), 4447-4456.
41. Langley, R.J., Chang, T.K., and Parker, E.A. (1994). Frequency selective surfaces on biased ferrite substrates. *IET Electronics Letters*, 30 (15), 1193-1194.
42. Lorenzo, J., Lazaro, A., Villarino, R., and Girbau, D. (2017). Diversity study of a frequency selective surface transponder for wearable applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65 (5), 2701-2706.

43. Ghebrehbrhan, M., Aranda, F., Walsh, G., Ziegler, D., Giardini, S., Carlson, J., Kimball, B., Steeves, D., Xia, Z., Yu, S., Kingsley, E., Nagarajan, R., Torcedo, J., Williams, R., and Gatesman, A. (2017). Textile frequency selective surface. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27 (11), 989-991.
44. Saeidi, C., and Weide, D. (2013). Nanoparticle array based optical frequency selective surfaces: theory and design. *Optics Express*, 21(13), 16170–16180.
45. Govindaswamy, S., East, J., Terry, F., Topsakal, E., Volakla, J.L., and Haddad, G.I. (2004). Frequency-selective surface based bandpass filters in the near-infrared region. *Microwave and Optical Technology Letters*, 41, 266-269.
46. Panwar, R., and Lee, J.R. (2017). Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review. *Aerospace Science and Technology*, 66, 216-234.
47. Sievenpiper, D., Zhang, L., Jimenez Broas, R.F., Alexopolous, N.G., and Yablonovitch, E. (1999). High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47 (11), 2059-2074.
48. Narayan, S., Sangeetha, B., and Jha, R.M. (2016). *Frequency Selective Surfaces based High Performance Microstrip Antenna*. Singapore: Springer, 5-34.
49. Wu, T.K. (1994). Four-Band Frequency Selective Surface with Double-Square-Loop Patch Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 42 (12), 1659-1663.
50. Filgueiras, H.R.D., Borges, R.M., Caldano Melo, M., Brandao, T.H., and Cerqueira Sodre, A. (2019). Dual-Band wireless fronthaul using a FSS-based focal-point/Cassegrain antenna assisted by an optical midhaul. *IEEE Access*, 7, 112578-112587.
51. Ranga, Y., Matekovits, L., Esselle, K.P., and Weily, A.R. (2011). Multioctave frequency selective surface reflector for ultrawideband antennas. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10, 219-222.
52. Li, M., Xiao, S., Bai, Y., and Wang, B. (2012). An ultrathin and broadband radar absorber using resistive FSS. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 748-751.
53. Xie, D., Liu, X., Guo, H., Yang, X., Liu, C., and Zhu, L. (2017). A wideband absorber with a multiresonant gridded-square FSS for antenna RCS reduction. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 629-632.
54. Omar, A.A., Shen, Z., and Ho, S.Y. (2018). Multiband and Wideband 90° Polarization Rotators. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17 (10), 1822-1826.
55. Karahan, M., Aksoy, E., and Yavuz, Y. (2017). *A frequency selective surface design to reduce the interference effect on satellite communication*. 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies - RAST (221-223). İstanbul: IEEE.

56. Sivasamy, R., Moorthy, B., Kanagasabai, M., Samsingh, V.R., and Alsath, M.G.N. (2018). A wideband frequency tunable FSS for electromagnetic shielding applications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60 (1), 280-283.
57. Yin, W., Zhang, H., Zhong, T., and Min, X. (2018). A novel compact dual-band frequency selective surface for GSM shielding by utilizing a 2.5-dimensional structure. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60 (6), 2057-2060.
58. Omar, A.A., and Shen, Z. (2019). Thin 3-D bandpass frequency-selective structure based on folded substrate for conformal radome applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67 (1), 282-290.
59. Lazaro, A., Ramos, A., Girbau, D., and Villarino, R. (2013). A novel UWB RFID tag using active frequency selective surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61 (3), 1155-1165.
60. Mantash, M., Kesavan, A., and Denidni, T.A. (2019). Highly transparent frequency selective surface based on electrotexiles for on-chip applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18 (11), 2351-2354.
61. CST help documentation (2016). *Electromagnetic Field Computer Simulation Technology AG develops software*, 89-97.
62. Karahan, M., and Armagan Sahinkaya, D.S. (2014). *A Reduced Size Wideband Vivaldi Antenna Array Design*, Master's Thesis, Turkish Naval Academy, İstanbul, 37-44.
63. Karahan, M., Yavuz, Y., Ates, S.H., and Aksoy, E. (2018). *A dual-band frequency selective surface structure with stable performance for oblique incidence*. 10th Electrical and Electronic Engineering International Conference - ELECO (1096-1098). Bursa: IEEE.
64. Nekoogar, F. (2005). *UltraWideband Communications Fundamentals and Applications*. New York: Pearson, 7-8.
65. Campos, A.L.P.D.S., Moreira, R.C.D.O., and Trindade, J.I.A. (2009). *A comparison between the equivalent circuit model and moment method to analyze FSS*. IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference (760-765). Belem, SP: IEEE.
66. Langley, R.J., and Parker, E.A. (1983). Double-square frequency-selective surfaces and their equivalent circuit. *IET Electronics Letters*, 19 (17), 675.
67. Salehi, M., and Behdad, N. (2008). A second-order dual X-/Ka-band frequency selective surface. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 18 (12), 785-787.
68. Fabian-Gongora, H., Martynyuk, A.E., Rodriguez-Cuevas, J., and Martinez-Lopez, J.I. (2016). Closely spaced tri-band frequency selective surfaces based on split ring slots. *IET Electronics Letters*, 52, 727-729.

69. Wang, D., Che, W., Chang, Y., Chin, K.S., and Chow, Y.L. (2013). A low-profile frequency selective surface with controllable triband characteristics. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 468-471.
70. Li, D., Shen, Z., and Li, E.P. (2019). Spurious-free dual-band bandpass frequency-selective surfaces with large band ratio. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67 (2), 1065-1072.
71. Rahmati, B., and Hassani, H.R. (2015). Multiband metallic frequency selective surface with wide range of band ratio. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63 (8), 3747-3753.
72. Ferreira, D., Cuinas, I., Fernandes, T.R., and Caldeirinha, R.F.S. (2019). Multi-semicircle-based single- and dual-band frequency-selective surfaces: Achieving narrower bandwidth and improved oblique incidence angular stability. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine*, 61, (2), 32-39.
73. Zhao, P.C., Zong, Z.Y., Wu, W., Li, B., and Fang, D.G. (2017). An FSS structure based on parallel LC resonators for multiband applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65 (10), 5257-5266.
74. Garg, S., and Yadav, S. (2018). A Triple band-reject frequency selective surface for broadband applications. *Optical and Wireless Technologies*, 472, 437-446.
75. Xu, G., Hum, S.V., and Eleftheriades, G. V. (2018). A technique for designing multilayer multistopband frequency selective surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66 (2), 780-789.
76. Chen, M., Wang, S.N., Chen, R.S., and Fan, Z.H. (2009). *Electromagnetic analysis of electrically large and finite periodic frequency selective surfaces*. Asia-Pacific Microwave Conference (1-4). Hong Kong: IEEE.



GAZİ GELECEKTİR..