

AKTİF FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

DESIGN OF ACTIVE FREQUENCY SELECTIVE SURFACE

ERKAN SARIBAY

PROF. DR BİRSEN SAKA TANATAR

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2023

Aileme...



ÖZET

AKTİF FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Erkan SARIBAY

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Eylül 2023, 67 sayfa

Bu çalışmada üç farklı aktif frekans seçici yüzey tasarımı sunulmuştur. İlk tasarım 1.6 mm kalınlığında FR-4 dielektrik malzeme üzerinde tek katmanlı yapıya sahiptir. Birim hücre dairesel yapı, yama ve PIN diyotlardan oluşur ve 2.1 – 2.2 GHz bandında iletim ve yansıtma modları arasında geçiş yapabilme yeteneğine sahiptir. İkinci tasarım 1.6 mm kalınlığında FR-4 malzeme üzerinde çift katmanlı yapıya sahiptir. Birim hücre dairesel yapı ve PIN diyotlardan oluşur ve 2.3 – 2.9 GHz ve 5.4 – 6.2 GHz bantlarında birbirinden bağımsız olarak çalışabilme ve bu bantlarda iletim ve yansıtma modları arasında geçiş yapabilme yeteneğine sahiptir. Her iki tasarımda farklı polarizasyona ve belirli bir geliş açısına kadar kararlılık göstermiştir. Tasarım sürecinde eşdeğer devre modeli yönteminden faydalanılmıştır. İlk tasarım üretilmiş ve dalga kılavuzu yardımıyla ölçülmüştür. Üçüncü tasarımda, farklı PIN diyot konfigürasyonlarının frekans seçici yüzeyin yansıttığı veya ilettiği ışıma olan etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: aktif frekans seçici yüzey, PIN diyot, eşdeğer devre modeli, iletim, yansıtma, frekans kontrolü.

ABSTRACT

DESIGN OF ACTIVE FREQUENCY SELECTIVE SURFACE

Erkan SARIBAY

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birsen Saka TANATAR

September 2023, 67 pages

In this study, three different design of active frequency selective surface are presented. The first design has a single layer structure on a 1.6 mm thick FR-4 dielectric material. The unit cell consists of circular structure, patch and PIN diodes and is capable of switching between transmit and reflect modes in the 2.1 – 2.2 GHz band. The second design has a double layer structure on 1.6 mm thick FR-4 dielectric material. The unit cell consists of circular structure and PIN diodes and has the ability to operate independently of each other in the 2.3 – 2.9 GHz and 5.4 – 6.2 GHz bands and to switch between transmission and reflection modes in these bands. Both designs showed insensitivity up to different polarization and a certain angle of incidence. The equivalent circuit model method was used in the design process. The first design was manufactured and measured with the aid of a waveguide. In the third design, the effect of different PIN diode configurations on the radiation reflected or transmitted by the frequency selective surface was examined.

Keywords: active frequency selective surface, PIN diode, equivalent circuit model, transmission, reflection, frequency control.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca anlayışını ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım sayın Prof. Dr. Birsen Saka TANATAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Faydalı tartışmalarda bulunduğum meslektaşlarıma ve bu çalışma kapsamında alt yapısından yararlandığım Roketsan A.Ş.'ye teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER	4
2.1. Eşdeğer Devre Modeline Genel Bakış	4
2.1.2. Frekans Seçici Yüzeyler ve Filtre Cevapları	7
2.2. Frekans Seçici Yüzeylerin Cevabını Etkileyen Faktörler	10
2.2.1. Frekans Seçici Yüzey Şekilleri	10
2.2.2. Dielektrik Malzeme	14
2.2.3. Dalgaların Polarizasyonu ve Geliş Açısı	17
2.2.4. Birim Hücrelerin Arasındaki Mesafe	20
2.3. Aktif Frekans Seçici Yüzeyler ve İncelemeler	21
3. AKTİF FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMLARI	39
3.1. Tasarım I	39
3.1.1. Tasarım I, Benzetim ve Üretim Sonuçları	43
3.2. Tasarım II	46
3.2.1. Tasarım II, Benzetim Sonuçları	50
3.3. Tasarım III	58
3.3.1. Tasarım III, Benzetim Sonuçları	59
4. SONUÇLAR VE YORUMLAR	63
5. KAYNAKÇA	65

EKLER	68
EK 1 – Tezten Türetilmiş Bildiriler.....	68



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Frekans seçici yüzey örneği [7]	1
Şekil 1.2 Aktif FSY örneği. (a) Perspektif görüntüsü. (b) Üstten görüntüsü. (c) Yandan görüntüsü [11]	2
Şekil 2.1 Paralel gelen dalga için şerit yapının endüktif etkisi	4
Şekil 2.2 Dik gelen dalga için şerit yapının kapasitif etkisi	5
Şekil 2.3 FSY üzerinde endüktans ve kapasitans oluşumu. Burada L: yama uzunluğu, s: yamalar arasındaki mesafe, w: şerit genişliğidir [15].	5
Şekil 2.4 FSY alçak geçiren filtre cevabı	7
Şekil 2.5 FSY yüksek geçiren filtre cevabı	8
Şekil 2.6 FSY bant durduran filtre cevabı	8
Şekil 2.7 FSY bant geçiren filtre cevabı	9
Şekil 2.8 Frekans seçici yüzeylerin temel şekilleri	10
Şekil 2.9 Kare yamaya birim hücre	11
Şekil 2.10 Kare yamaya sahip FSY'nin, TE modu kırk dereceye kadar geliş açısı için frekans cevabı, kırmızı $\theta=0^\circ$, yeşil $\theta=20^\circ$, mavi $\theta=40^\circ$	11
Şekil 2.11 Kare yamaya sahip FSY'nin, TM modu kırk dereceye kadar geliş açısı için frekans cevabı, kırmızı $\theta=0^\circ$, yeşil $\theta=20^\circ$, mavi $\theta=40^\circ$	12
Şekil 2.12 Kudüs Haçı şeklinde FSY birim hücresi	12
Şekil 2.13 Kudüs Haçı şeklinde birim hücreye sahip FSY'nin, TE modu altmış dereceye kadar geliş açısı için frekans cevabı, kırmızı $\theta=0^\circ$, yeşil $\theta=20^\circ$, mavi $\theta=40^\circ$, turuncu $\theta=60^\circ$	13
Şekil 2.14 Kudüs Haçı şeklinde birim hücreye sahip FSY'nin, TM modu altmış dereceye kadar geliş açısı için frekans cevabı, kırmızı $\theta=0^\circ$, yeşil $\theta=20^\circ$, mavi $\theta=40^\circ$, turuncu $\theta=60^\circ$	13
Şekil 2.15 Dielektrik malzemenin rezonans frekansına olan etkisi (a) FSY'nin her iki yüzeyine sonsuz kalınlıktaki dielektrik malzeme uygulanmasının rezonans frekansına olan etkisi. (b) FSY'nin tek yüzeyine ve her iki yüzeyine d kalınlığında dielektrik malzeme uygulanmasının rezonans frekansına olan etkisi [1].	14
Şekil 2.16 Dairesel yapıda FSY birim hücresi	15

Şekil 2.17 Dairesel yüzeyin 1.6 mm kalınlığında farklı dielektrik malzemeler için frekans cevabı	15
Şekil 2.18 Dairesel yüzeyin 1.6 mm ve 0.8mm kalınlığında FR-4 dielektrik malzeme için frekans cevabı	16
Şekil 2.19 Dairesel belirtilen yüzeyin 1.6 mm ve 0.8mm kalınlığında Arlon AD255C dielektrik malzeme için frekans cevabı	16
Şekil 2.20 Gelen dalga polarizasyonunun FSY cevabına etkisi [19].....	17
Şekil 2.21 FSY'ye dik ve açı ile gelen dalgaların etkin mesafe üzerine etkisi [20]	18
Şekil 2.22 Açıklığa sahip kare şeklinde birim hücre	19
Şekil 2.23 Açıklığa sahip kare şeklinde birim hücrenin TE ve TM polarizasyonlarında frekans cevabı	19
Şekil 2.24 İstenmeyen yan loblar ve periyodik elemanlar arası mesafe [22]	20
Şekil 2.25 İstenmeyen yayılım oluşumu [1]	20
Şekil 2.26 PIN diyot eşdeğer devre modelleri. (a) Kesimde iken EDM. (b) İletimde iken EDM. [23]	22
Şekil 2.27 PIN diyot entegre edilmiş kare yapıda aktif FSY [24]	22
Şekil 2.28 PIN diyot entegre edilmiş kare yapıda aktif FSY'nin iletim ve yansıtma durumları [24]	22
Şekil 2.29 Varaktör diyotlar ile birlikte dört katmanlı FSY yapısı [25]	23
Şekil 2.30 Varaktör diyotun farklı kapasitans değerlerinde FSY cevabı [25]	23
Şekil 2.31 C ve X bantları arası geçiş yapabilen FSY. (a) PIN diyot entegre edilmiş FSY yapısı, PIN diyot iletimde ve kesimde iken eşdeğer devre modeli, PIN diyot simülasyon modeli. (b) Diyot iletimde ve kesimde iken kalkanlama etkinliği [3].	24
Şekil 2.32 Varaktör diyot entegre edilmiş dairesel birim hücreye sahip FSY. (a) Perspektif görüntüsü. (b) Üstten görüntüsü. (c) Yandan görüntüsü [11]	25
Şekil 2.33 Farklı ters voltaj besleme değerleri için RF kalkanlama etkinlikleri [11]	25
Şekil 2.34 Daire ve artı şeklinde pasif FSY	26
Şekil 2.35 Daire ve artı şeklindeki FSY frekans cevabı	26
Şekil 2.36 Daire ve artı şeklindeki yüzeyin PIN diyot entegre edilmiş modeli	27
Şekil 2.37 Daire ve artı şeklindeki yüzeyin PIN diyotlar iletimde ve kesimde iken frekans cevabı	27
Şekil 2.38 Daire ve artı şeklindeki yüzeyinin TE modunda yüzey akımları. (a) PIN diyotlar kesimde iken. (b) PIN diyotlar iletimde iken.	28

Şekil 2.39 Farklı rotasyonlara sahip birim hücreler. (a) Dış ve iç dairede rotasyon yok. (b) İç dairede 45° rotasyon var. (c) Dış dairede 45° rotasyon var. (d) Hem iç hem dış dairede 45° rotasyon var.....	29
Şekil 2.40 Farklı rotasyona sahip birim hücrelerin PIN diyotlar kesimde iken TE ve TM modunda frekans cevapları.....	30
Şekil 2.41 Farklı rotasyona sahip birim hücrelerin PIN diyotlar iletimde iken TE modunda frekans cevapları.....	31
Şekil 2.42 Farklı rotasyona sahip birim hücrelerin PIN diyotlar iletimde iken TM modunda frekans cevapları.....	31
Şekil 2.43 İki katmanlı ve dairesel hücreye sahip aktif FSY. (a) Perspektif görüntüsü. (b) Üstten görüntüsü	32
Şekil 2.44 PIN diyotları isimlendirilmiş iki katmanlı ve dairesel yapıya sahip FSY.....	32
Şekil 2.45 Sadece A diyotu ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen $S_{21}(\text{dB})$ ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.	33
Şekil 2.46 Sadece A ve C diyotu ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen $S_{21}(\text{dB})$ ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.	34
Şekil 2.47 Sadece B diyotu ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen $S_{21}(\text{dB})$ ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.	34
Şekil 2.48 Sadece B ve D diyotları ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen $S_{21}(\text{dB})$ ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.	35
Şekil 2.49 Sadece E diyotu ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen $S_{21}(\text{dB})$ ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.	35
Şekil 2.50 Sadece E ve G diyotları ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen $S_{21}(\text{dB})$ ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.	36
Şekil 2.51 Sadece F diyotu ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen $S_{21}(\text{dB})$ ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.	36
Şekil 2.52 Sadece F ve H diyotları ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen $S_{21}(\text{dB})$ ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.	37
Şekil 2.53 Tüm diyotlar iletimde iken farklı direnç değerleri için TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen $S_{21}(\text{dB})$ ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.	37

Şekil 3.1 Tasarım I, PIN diyotsuz eşdeğer devre modeli. (a) EDM. (b) Şematik gösterimi.	40
Şekil 3.2 Tasarım I, PIN diyotlu eşdeğer devre modeli. (a) Diyotlar açık ve kapalı durumda iken EDM. (b) Diyot entegre edilmiş FSY şematik gösterimi. (c) PIN diyotlar iletimde iken EDM. (d) PIN diyotlar kesimde iken EDM.	41
Şekil 3.3 Tasarım I, ANSYS tasarımı. (a) Üstten görüntüsü. (b) Perspektif görüntüsü. Siyah ile işaretli bölgeler PIN diyotları temsil etmektedir.	42
Şekil 3.4 Tasarım I, port atamaları. (a) Yüzey koşulu ataması 1. (b) Yüzey koşulu ataması 2. (c) Port ataması 1. (d) Port ataması 2.....	42
Şekil 3.5 Tasarım I, EDM çözümü. (a) PIN diyotlar iletimde. (b) PIN diyotlar kesimde	43
Şekil 3.6 Tasarım I, TE ve TM modunda ANSYS benzetim sonuçları.....	44
Şekil 3.7 Tasarım I, üretilmiş hali. (Siyah ve beyaz kablolar besleme hatları içindir)..	44
Şekil 3.8 Tasarım I, Dalga kılavuzu ile ölçümü	45
Şekil 3.9 Tasarım I, Üretimin ölçüm sonuçları.....	45
Şekil 3.10 Tasarım II, PIN diyotsuz EDM. (a) EDM. (b) Kuşbakışı gösterimi	47
Şekil 3.11 Tasarım II, PIN diyot entegre edilmiş EDM. (a) PIN diyot kesimde ve iletimde iken EDM. (b) PIN diyotlu kuşbakışı FSY. (c) PIN diyot iletimde iken EDM. (d) PIN diyot kesimde iken EDM.....	48
Şekil 3.12 Tasarım II, perspektif görüntüsü	49
Şekil 3.13 Tasarım II, tepeden görüntüsü	49
Şekil 3.14 Tasarım II, PIN diyotlar iletimde ve kesimde iken $\theta=[0^{\circ}-45^{\circ}]$ için FSY cevabı, TE modu	50
Şekil 3.15 Tasarım II, PIN diyotlar iletimde ve kesimde iken $\theta=[0^{\circ}-45^{\circ}]$ için FSY cevabı, TM modu	50
Şekil 3.16 Tasarım II, farklı R_s değerleri için TE modunda S_{21} parametre değişimi.....	51
Şekil 3.17 Tasarım II, farklı R_s değerleri için TM modunda S_{21} parametre değişimi.....	52
Şekil 3.18 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde iken, TE Modu, $\theta=[0^{\circ}-45^{\circ}]$	53
Şekil 3.19 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde iken, TM Modu, $\theta=[0^{\circ}-45^{\circ}]$	53
Şekil 3.20 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde iken, TE Modu, $\theta=[0^{\circ}-45^{\circ}]$	54

Şekil 3.21 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde iken, TM Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$	55
Şekil 3.22 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde ve alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotların iletimdeki dirençleri farklı iken, TE Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$	56
Şekil 3.23 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde ve alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotların iletimdeki dirençleri farklı iken, TM Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$	56
Şekil 3.24 Tasarım II, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde ve üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotların iletimdeki dirençleri farklı iken, TE Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$	57
Şekil 3.25 Tasarım II, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde ve üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotların iletimdeki dirençleri farklı iken, TM Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$	57
Şekil 3.26 Tasarım III üstten görünüm.....	58
Şekil 3.27 Tasarım III perspektif görüntüsü.....	59
Şekil 3.28 Tasarım III, PIN diyotlar iletimde iken TE ve TM modu için frekans cevabı	59
Şekil 3.29 Birinci konfigürasyon	60
Şekil 3.30 Birinci konfigürasyon toplam yayılan elektrik alan.....	60
Şekil 3.31 İkinci konfigürasyon	61
Şekil 3.32 İkinci konfigürasyon toplam yayılan elektrik alan	61
Şekil 3.33 Üçüncü konfigürasyon	62
Şekil 3.34 Üçüncü konfigürasyon toplam yayılan elektrik alan	62

ÇİZELGELER DİZİNİ



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

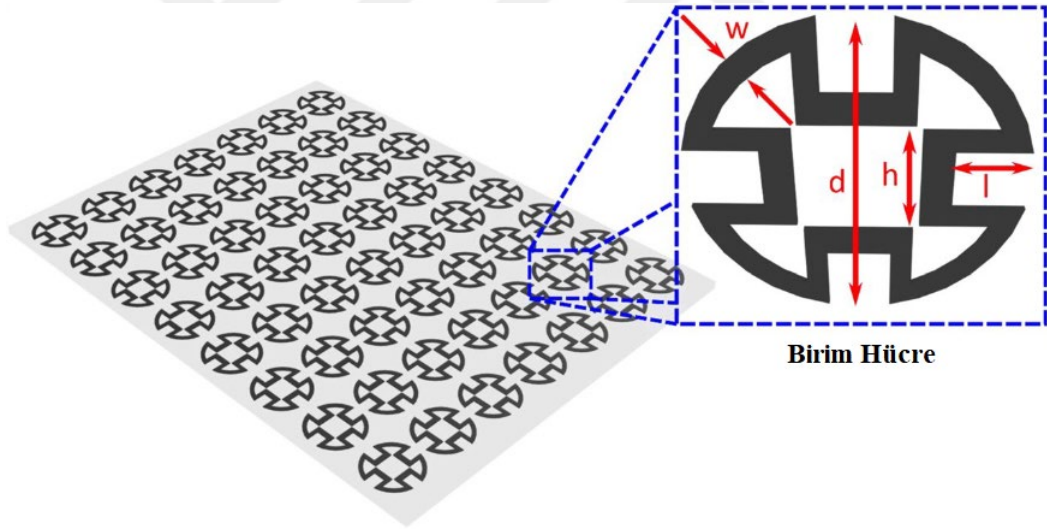
ϵ_0	Vakum elektriksel geçirgenlik değeri
ϵ_r	Bağıl elektriksel geçirgenlik değeri
ϵ_{eff}	Etkin elektriksel geçirgenlik değeri
μ_0	Vakum manyetik geçirgenlik değeri
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik değeri
λ_ϵ	Elektriksel dalga boyu
Z_{in}	Giriş empedansı
Γ	Yansımaya katsayısı
T	İletim katsayısı

Kısaltmalar

EDM	Eşdeğer devre modeli
FSY	Frekans seçici yüzey
TE	Transverse electric
TM	Transverse magnetic
MEMS	MikroElektroMekanik sistemler
RF	Radyo frekans
EM	Elektromanyetik

1. GİRİŞ

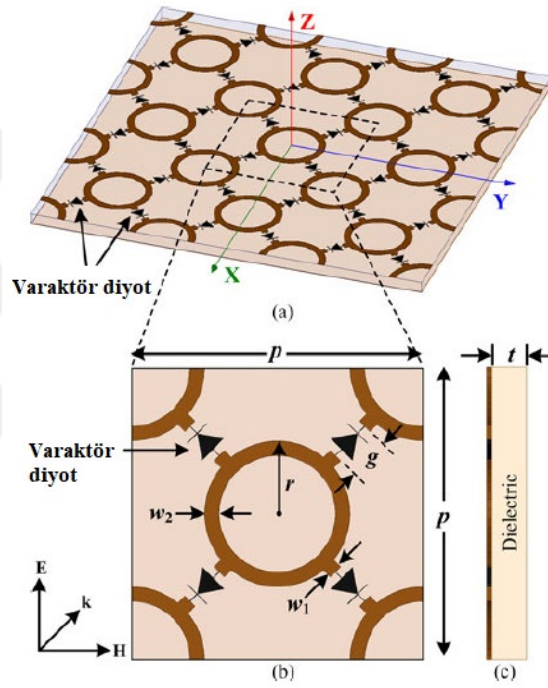
Frekans seçici yüzeyler (FSY) bir birim eleman veya birim hücre denilen yapıya sahip olan ve bu yapılardan pek çoğunun bir araya gelmesiyle periyodik bir yüzey oluşturan elektromanyetik filtrelerdir. Bu periyodik yüzey temel olarak bir veya iki boyutlu sonsuz dizide düzenlenmiş özdeş elemanların (birim eleman) birleşimidir. Dielektrik altta üzerine inşa edilen periyodik iletken yapılar veya açıklıklar elektromanyetik dalgalar için seçici bir yüzey oluşturur. Dielektrik üzerine inşa edilen bu yapılar birden çok katman içerebilirler. Frekans seçici yüzeyler farklı amaçlar için kullanılabilirler. Çevreden gelen istenmeyen girişimleri engellemek için bir elektromanyetik kalkan, farklı bantlar arasında iletim ve yansıtma görevi gören bir filtre, anten sistemlerinde bir yansıtıcı tabaka, haberleşme sistemde bir anahtarlama elemanı, adaptif radar soğurucu gibi çeşitli amaçlar için kullanılabilirler. Şekil 1.1’de bir frekans seçici yüzey örneği verilmiştir [1 - 6].



Şekil 1.1 Frekans seçici yüzey örneği [7]

Pasif frekans seçici yüzeyler PIN diyot, varaktör diyot gibi aktif elektronik elemanlar içermeyen yüzeylerdir. Bu yüzeyler yukarıdaki paragrafta da bahsedildiği gibi iletken periyodik yapılar veya açıklıklardır. Pasif frekans seçici yüzeylerin dezavantajı rezonans frekansının ayarlanabilir olmaması, iletim ve yansıtma özellikleri arasında geçiş yapamaması, elektromanyetik kalkanlama verimliliği gibi parametrelerinin değiştirilememesidir.

Aktif frekans seçici yüzeyler de periyodik iletken yapılardan veya açıklıklardan oluşur ancak pasif frekans seçici yüzeylerden farklı olarak PIN diyot, varaktör diyot ve MEMS gibi aktif elektronik elemanlar içerirler. Aktif elemanların entegrasyonu ile FSY, çalışma frekans bandını ayarlama veya izolasyon ve iletim durumları arasında geçiş yapma yeteneği kazanır. Şekil 1.2’de varaktör diyotlar kullanılarak yapılan bir aktif frekans seçici yüzey örneği gösterilmiştir [8 - 10].



Şekil 1.2 Aktif FSY örneği. (a) Perspektif görüntüsü. (b) Üstten görüntüsü. (c) Yandan görüntüsü [11]

Bu tez çalışmasında üç farklı aktif frekans seçici yüzey tasarımı sunulmuştur. İlk tasarım 1.6 mm kalınlığında FR-4 alttaş üzerinde tek katmanlı bir yapıdır. Bu tasarım 2.1 – 2.2 GHz frekans bandında çalışmaktadır. Üzerindeki PIN diyotlar sayesinde S_{21} parametresi ayarlanabilir ve bu bant üzerinde hem iletim hem yansıtma özelliklerini sağlayabilir. Diğer tasarım ise 2.3 – 2.9 GHz ve 5.4 – 6.2 GHz frekans bantlarında çalışmaktadır. Bu tasarım da 1.6 mm kalınlığında FR-4 alttaş üzerine inşa edilmiştir ve alt ile üst olmak üzere iki katmandan oluşmaktadır. Bu tasarımda diğer tasarımdan farklı olarak ayrıca PIN diyotları için besleme ağı da önerilmiştir. Üst katmandaki FSY, 2.3 – 2.9 GHz frekanslarına cevap verirken alt katmandaki FSY 5.4 – 6.2 GHz frekanslarına cevap verir. Üzerindeki PIN diyotlar sayesinde iki farklı frekans bandı birbirlerinden bağımsız olarak ve birbirlerini etkilemeden iletim ve yansıtma özelliği arasında geçiş yapabilirler ve S_{21} iletim parametresi de ayarlanabilir. Üçüncü tasarımda ise PIN diyot entegre edilmiş 16 adet dairesel yapıdan oluşan birim hücre 1.6 mm kalınlığında FR-4 üzerine yerleştirilmiştir. Farklı PIN diyot konfigürasyonlarının frekans seçici yüzeyin yansıttığı veya ilettiği ışıma olan etkisi incelenmiştir.

Tezin ikinci kısmında frekans seçici yüzeylerin çalışma, işleme mantıkları incelenecek, frekans cevabını etkileyen koşullar tartışılacak, bu tezde analiz yöntemi olarak kullanılan eşdeğer devre modeli (EDM) ile ilgili bilgiler verilecek ve tasarımlarda kullanılan elektronik eleman ile ilgili detaylı bilgiler verilecektir.

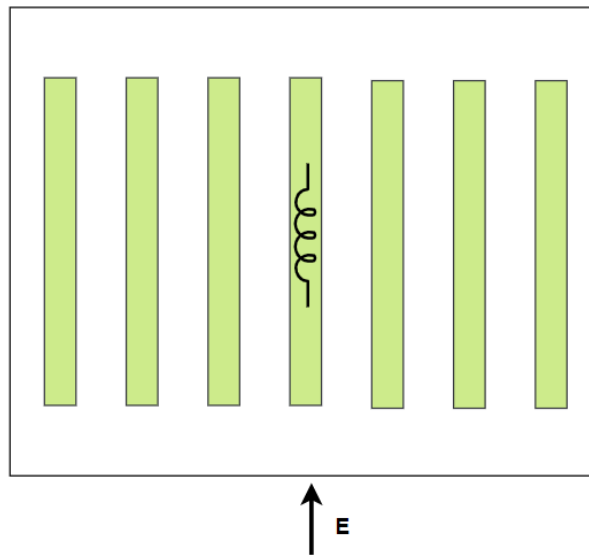
Tezin üçüncü kısmında üç farklı aktif FSY tasarımı sunulacaktır.

Tezin dördüncü kısmı ise sonuç ve tartışma için ayrılmıştır.

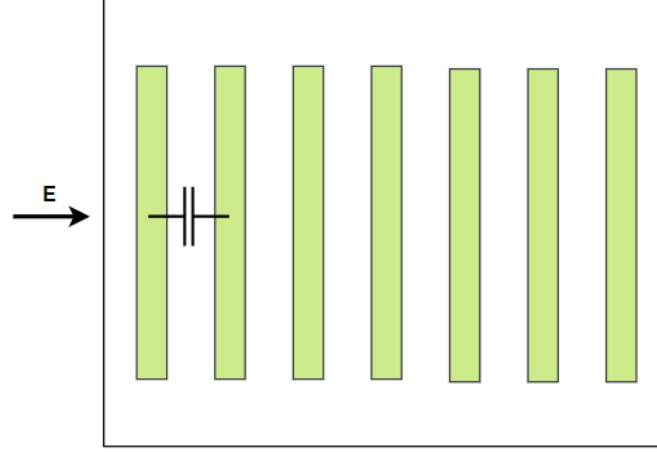
2. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER

2.1. Eşdeğer Devre Modeline Genel Bakış

Eşdeğer devre modeli (EDM), frekans seçici yüzeylerin analizinde kullanılan yöntemlerden biridir ve FSY'lerin çalışma mantığını anlamak açısından önemlidir. Bu tez kapsamında yapılan tasarımlarda da tasarımların frekans cevabını anlayabilmek için bir analiz yöntemi olarak kullanılmıştır. Eşdeğer devre modeli, frekans seçici yüzeylere ilk olarak Anderson [12] tarafından uygulanmıştır. EM dalganın TE veya TM polarize olarak gelişine göre FSY üzerinde bulunan periyodik yapılar endüktif veya kapasitif özellik gösterirler. Basit bir örnekle açıklamak gerekirse Şekil 2.1'de gösterildiği gibi iletken şerit yapılardan oluşan bir FSY'ye paralel olacak şekilde elektrik alan vektörü uygulandığı zaman FSY endüktif özellik gösterir. Aynı yapıya Şekil 2.2'de gösterildiği gibi FSY'ye dik olacak şekilde elektrik alan vektörü uygulandığı zaman ise iletken şerit yapılar arasındaki gerilim farkı ve aradaki dielektrik malzemeden dolayı şeritler arasında kapasitif etki oluşur. Bu prensipten yola çıkarak farklı ve daha karmaşık FSY'ler ECM ile analiz edilebilir ve çalışma prensipleri anlaşılabilir. Frekans seçici yüzey periyodunun rezonans dalga boyunun yarısından küçük olduğu durumlarda eşdeğer devre modeli tam dalga analizlerine benzer sonuçlar verir. Bundan dolayı bu koşulda ECM kullanılması pratik ve etkin bir çözüm sunar [12 - 14].

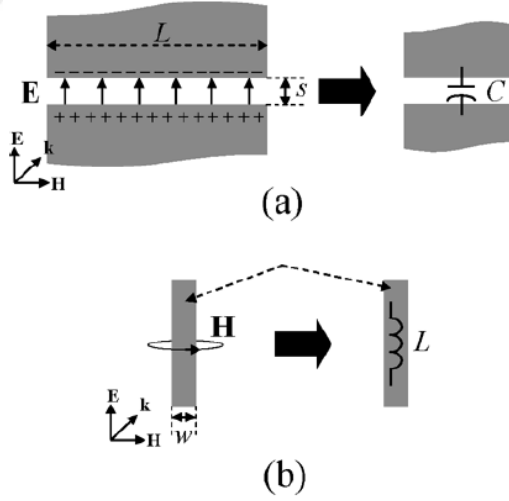


Şekil 2.1 Paralel gelen dalga için şerit yapının endüktif etkisi



Şekil 2.2 Dik gelen dalga için şerit yapının kapasitif etkisi

Şekil 2.3’de iletken yapılar üzerinde endüktans ve kapasitans oluşumu daha detaylı olarak gösterilmiştir. Şekil 2.3 (a)’da yama yapılar gösterilmiş ve elektrik alan sebebiyle kapasitans oluşumu belirtilmiştir. Şekil 2.3 (b)’de şerit yapılar ve manyetik alan sebebiyle endüktans oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 2.3 FSY üzerinde endüktans ve kapasitans oluşumu. Burada L: yama uzunluğu, s: yamalar arasındaki mesafe, w: şerit genişliğidir [15].

Yama ve şerit yapılar da oluş an endüktans ve kapasitans şu şekilde hesaplanabilir [15]:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}} \frac{2D_c}{\pi} \log \left(\frac{1}{\sin \frac{\pi s}{2D_c}} \right) \quad (2.1)$$

Burada D_c yama genişliği ve s yamalar arasındaki mesafedir.

$$L = \mu_0 \frac{D_i}{2\pi} \log \left(\frac{1}{\sin \frac{\pi w}{2D_i}} \right) \quad (2.2)$$

Burada D_i şerit uzunluğu ve w şerit genişliğidir.

Frekans seçici yüzeyin altına veya üstüne yerleştirilen dielektrik ise seri bir endüktöre paralel bağlanan kapasitans olarak modellenabilir ve bu endüktans, kapasitans değerleri şu şekilde hesaplanabilir [16]:

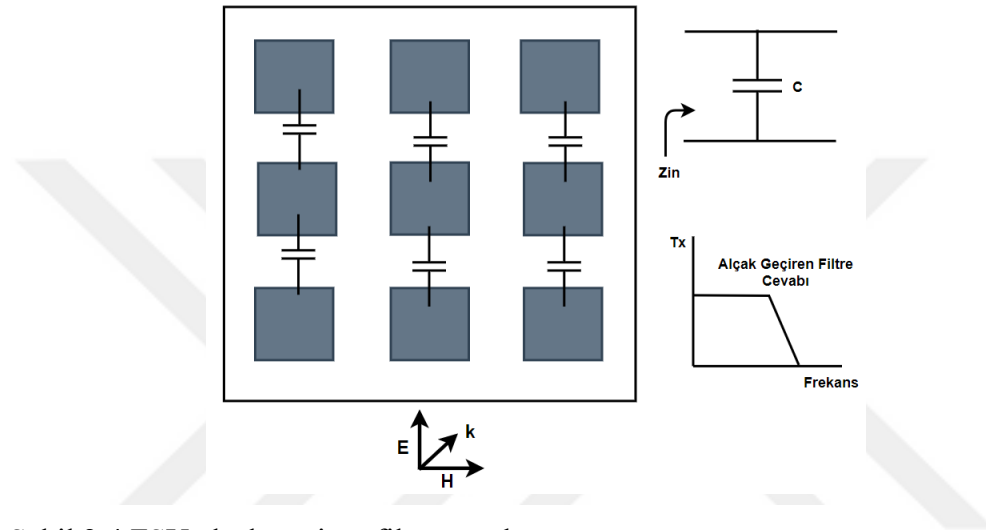
$$L_s = \mu_0 \mu_r T \quad (2.3)$$

$$C_s = \epsilon_0 \epsilon_r T \quad (2.4)$$

Yukarıdaki denklemlerde T dielektrik kalınlığı, μ_0 vakum manyetik geçirgenlik değeri, μ_r bağıl manyetik geçirgenlik değeri, ϵ_0 vakum elektriksel geçirgenlik değeri, ϵ_r bağıl elektriksel geçirgenlik değeridir.

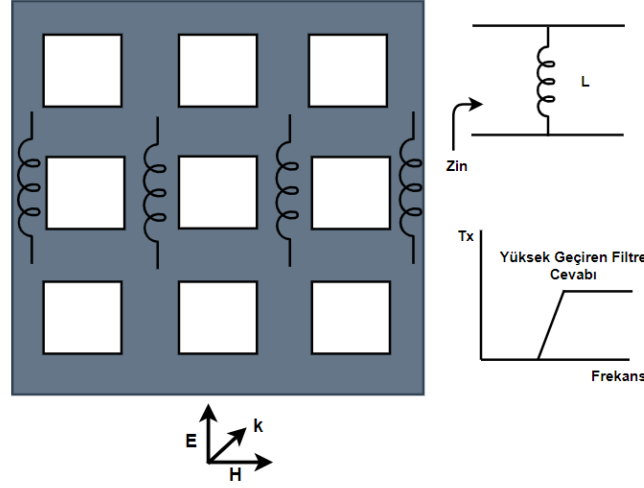
2.1.2. Frekans Seçici Yüzeyler ve Filtre Cevapları

Frekans seçici yüzeyler alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durduran filtre cevaplarına sahip olabilirler. Bu başlık altında farklı FSY'lerin nasıl farklı filtre cevapları verdiği eşdeğer devre modelinin de yardımı ile gösterilmiştir. Filtre cevaplarının incelenmesi frekans seçici yüzeylerin çalışma prensibinin anlaşılması açısından anlamlıdır.



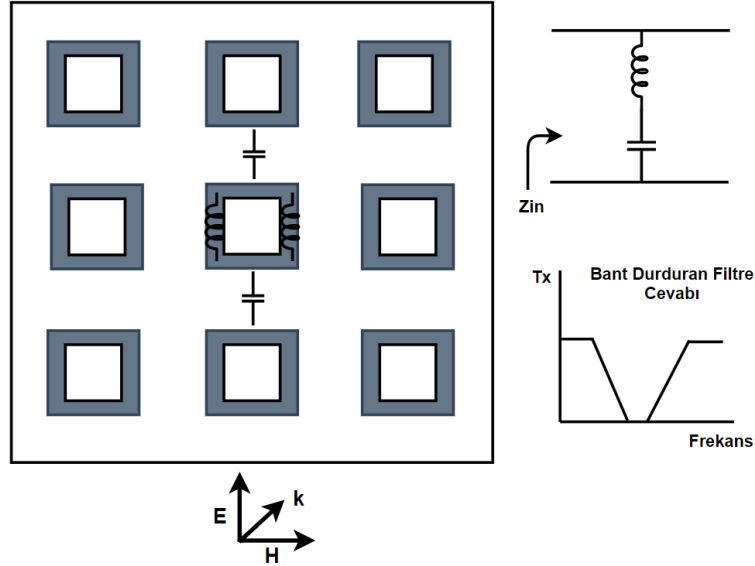
Şekil 2.4 FSY alçak geçiren filtre cevabı

Şekil 2.4’de kare yamalardan oluşan bir FSY yapısı gösterilmiştir. Bu yamalara şekilde gösterildiği gibi EM dalga uygulandığında yamalar arasında kapasitif etki oluşur. Bu frekans seçici yüzeyin eşdeğer devre modeli de şekilde belirtildiği gibidir. Frekans yükselmeye başladıkça kapasitörün empedansı azalmaya başlar. Bu sebeple FSY’ye uygulanan EM dalganın frekansı yükseldikçe FSY sanki bir kısa devre gibi davranmaya başlar ve kendisine gelen EM dalgayı geri yansıtır [17].



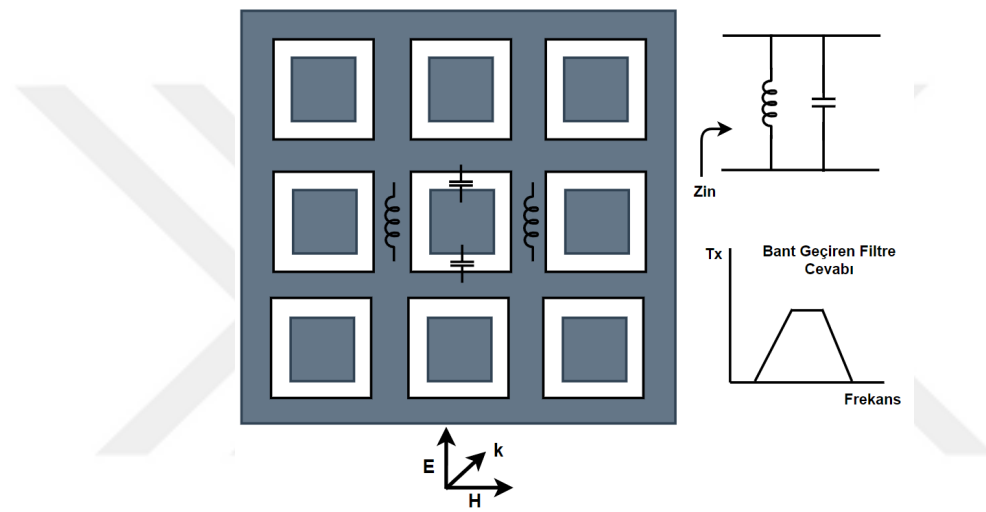
Şekil 2.5 FSY yüksek geçiren filtre cevabı

Şekil 2.5’de gösterilen beyaz kareler açıklıkları belirtir. Bu FSY’ye şekilde gösterildiği gibi EM dalga uygulandığında endüktif etki oluşur. Bu frekans seçici yüzeyin eşdeğer devre modeli de şekilde belirtildiği gibidir. Frekans yükselmeye başladıkça endüktörün empedansı artmaya başlar. Bu sebeple FSY’ye uygulanan EM dalganın frekansı yükseldikçe FSY sanki bir açık devre gibi davranmaya başlar ve kendisine gelen EM dalgayı arka tarafa iletir [17].



Şekil 2.6 FSY bant durduran filtre cevabı

Şekil 2.6’de gösterilen koyu renkli yapılar iletken malzemeyi belirtir. Bu FSY’ye şekilde gösterildiği gibi EM dalga uygulandığında birim yapılar arasında bir kapasitans ve iletken yapının sağ ve sol taraflarında endüktif etki oluşur. Sadece tek bir bölgedeki endüktans ve kapasitans oluşumu örnek olması açısından gösterilmiştir. Yüzeyin geri kalan birim hücreleri için de aynı şekilde endüktans ve kapasitans oluşumu söz konusudur. Bu frekans seçici yüzeyin eşdeğer devre modeli de şekilde belirtildiği gibidir. Rezonans frekansında endüktans ve kapasitans etkileri birbirlerini nötrler. Böylelikle L ve C ile oluşan filtre bir kısa devre gibi davranır ve üzerine gelen EM dalgayı geri yansıtır [17].



Şekil 2.7 FSY bant geçiren filtre cevabı

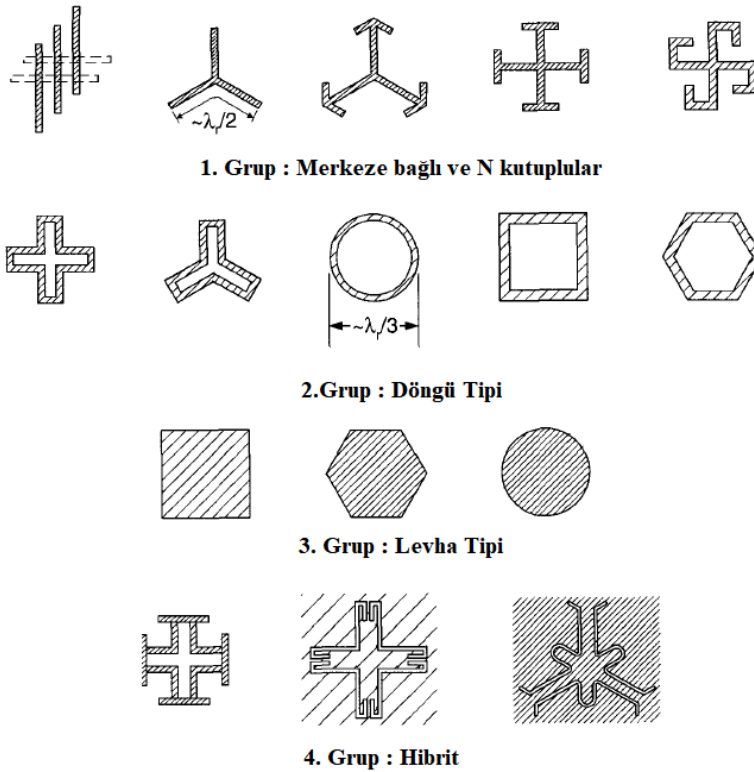
Şekil 2.7’de gösterilen beyaz bölümler açıklıkları belirtir. Bu FSY’ye şekilde gösterildiği gibi EM dalga uygulandığında yama ve çevre iletken arasında bir kapasitans ve ızgara yapısı üzerinde endüktif etki oluşur. Sadece tek bir bölgedeki endüktans ve kapasitans oluşumu örnek olması açısından gösterilmiştir. Yüzeyin geri kalan birim hücreleri için de aynı şekilde endüktans ve kapasitans oluşumu söz konusudur. Bu frekans seçici yüzeyin eşdeğer devre modeli de şekilde belirtildiği gibidir. Rezonans frekansında endüktans ve kapasitans akımı birbirlerinin tersidir. Böylelikle L ve C ile oluşan filtre bir açık devre gibi davranır ve üzerine gelen EM dalgayı arka tarafa iletir [17].

2.2. Frekans Seçici Yüzeylerin Cevabını Etkileyen Faktörler

Bu başlık altında frekans seçici yüzeylerin cevaplarını etkileyen temel faktörler tartışılmıştır.

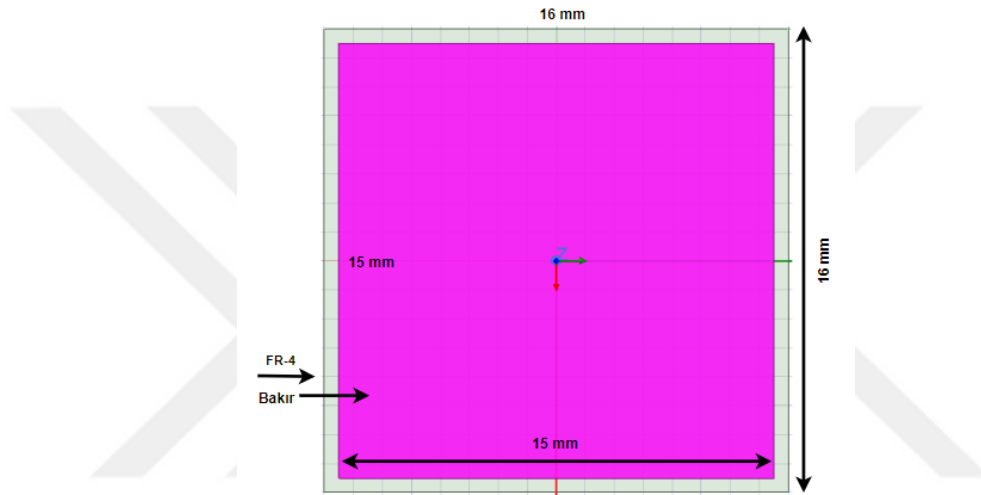
2.2.1. Frekans Seçici Yüzey Şekilleri

Bant geçiren veya bant durduran filtreler tasarlarken doğru birim eleman seçimi kritik öneme sahiptir. Seçilen birim elemanın şekline göre frekans seçici yüzeye gelen EM dalganın polarizasyonu, geliş açısına karşı olan duyarlılığı, FSY'nin bant genişliği gibi parametreler etkilenir. Munk'a [1] göre FSY hücreleri Şekil 2.8'de gösterildiği gibi dört farklı grup altında toplanabilir. Bunlar merkez bağlı veya N kutuplular, döngü tipi yapılar, plaka tipi yapılar ve farklı kombinasyonlar ile bir araya gelmiş hibrit yapılardır. Bu tez kapsamında, farklı geliş açılarında ve polarizasyondaki EM dalgalara benzer cevap verebileceği ve daha iyi bant genişliği sağlayabileceği için dairesel yapı birim hücre olarak seçilmiştir [1, 18].

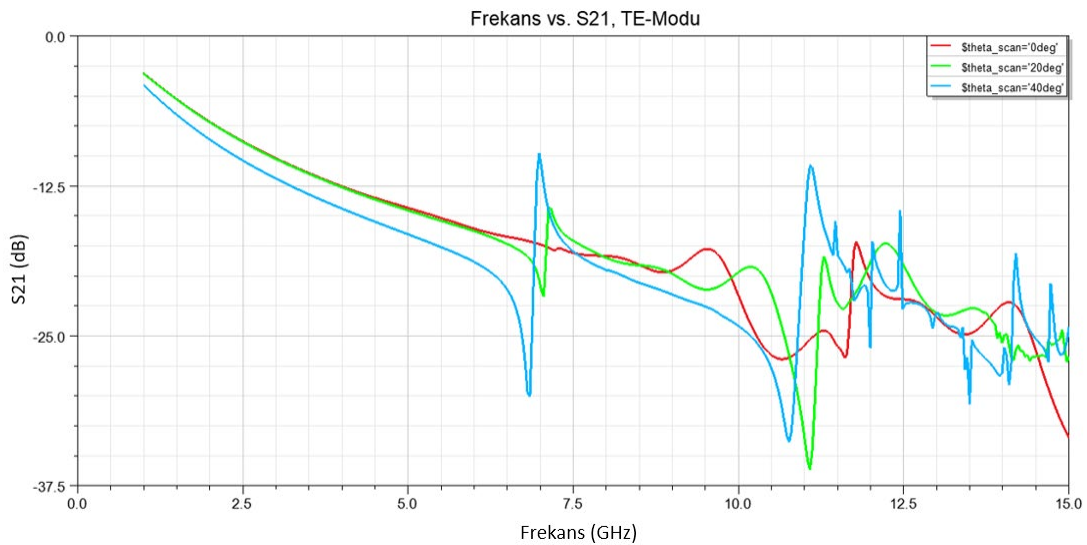


Şekil 2.8 Frekans seçici yüzeylerin temel şekilleri

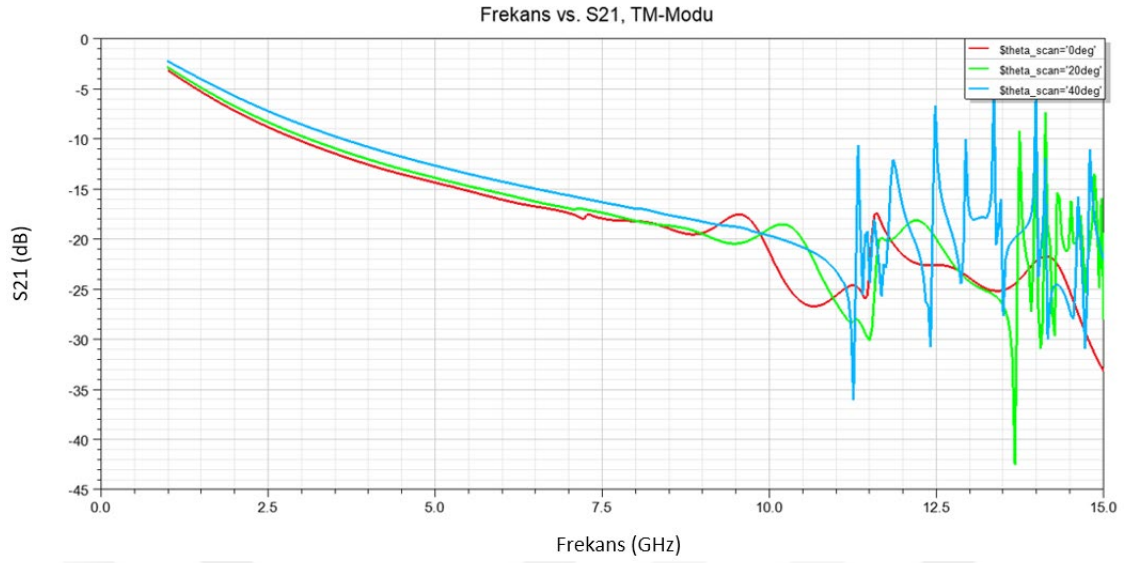
Şekil 2.8’de gösterilen temel yüzey şekillerinin gelen EM dalgaların geliş açısına ve polarizasyonuna ne kadar kararlılık gösterdiği incelenmiştir. Köşeli yüzeylere sahip olan yapılar EM dalgaların geliş açısına ve polarizasyonuna karşı, yuvarlak ve simetrik yapılara göre daha duyarlı davranmıştır. Örneğin Şekil 2.9’da karesel yamaya sahip birim hücre verilmiştir. Şekil 2.10’da ve Şekil 2.11’de ise TE ve TM modlarında farklı EM dalga geliş açısına göre frekans cevabı verilmiştir. Farklı polarizasyonlarda ve farklı geliş açılarındaki dalgalara karşı yeteri kadar kararlılık gösteremediği bu şekillerde gözlemlenebilir.



Şekil 2.9 Kare yamaya birim hücre

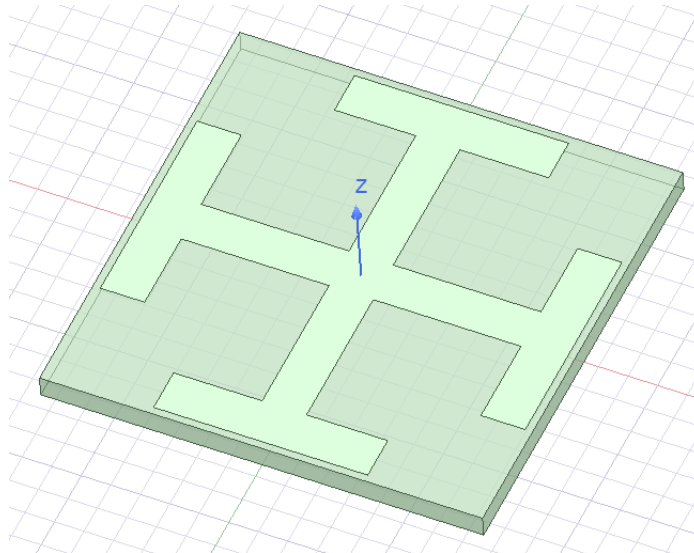


Şekil 2.10 Kare yamaya sahip FSY’nin, TE modu kırk dereceye kadar geliş açısı için frekans cevabı, kırmızı $\theta=0^\circ$, yeşil $\theta=20^\circ$, mavi $\theta=40^\circ$

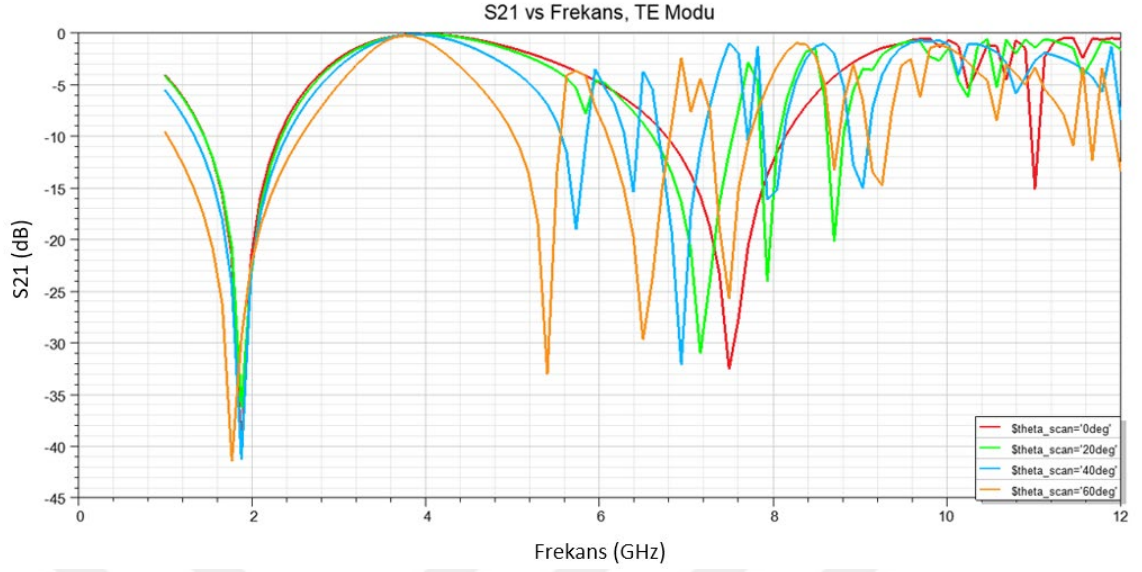


Şekil 2.11 Kare yamaya sahip FSY'nin, TM modu kırk dereceye kadar geliş açısı için frekans cevabı, kırmızı $\theta=0^\circ$, yeşil $\theta=20^\circ$, mavi $\theta=40^\circ$

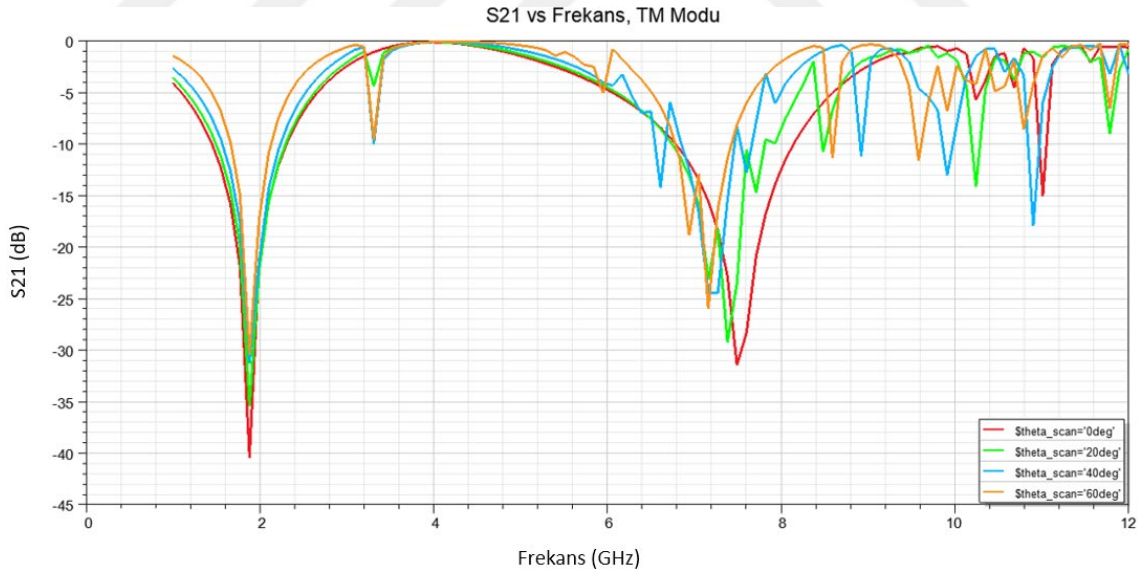
Bir başka örnek olarak Şekil 2.12'de 'Kudüs Haçı' yapısına sahip birim hücre verilmiştir. Şekil 2.13'de ve Şekil 2.14'de ise TE ve TM modlarında farklı EM dalga geliş açısına göre frekans cevabı verilmiştir. Farklı polarizasyonlarda ve farklı geliş açlarındaki dalgalara karşı yeteri kadar kararlılık gösteremediği bu şekillerde gözlemlenebilir.



Şekil 2.12 Kudüs Haçı şeklinde FSY birim hücresi



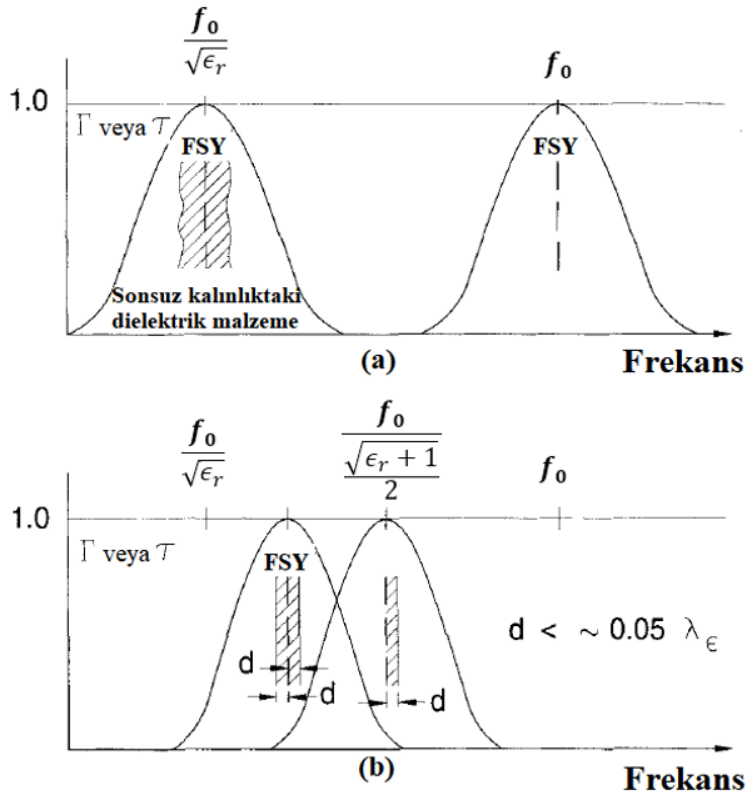
Şekil 2.13 Kudüs Haçı şeklinde birim hücreye sahip FSY'nin, TE modu altmış dereceye kadar geliş açısı için frekans cevabı, kırmızı $\theta=0^\circ$, yeşil $\theta=20^\circ$, mavi $\theta=40^\circ$, turuncu $\theta=60^\circ$



Şekil 2.14 Kudüs Haçı şeklinde birim hücreye sahip FSY'nin, TM modu altmış dereceye kadar geliş açısı için frekans cevabı, kırmızı $\theta=0^\circ$, yeşil $\theta=20^\circ$, mavi $\theta=40^\circ$, turuncu $\theta=60^\circ$

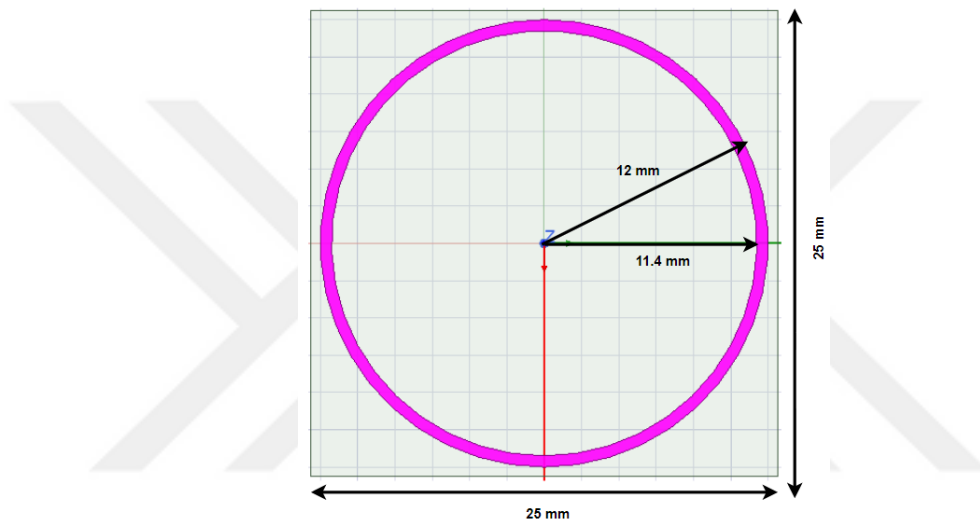
2.2.2. Dielektrik Malzeme

FSY'ler tasarlanırken mekanik sebeplerden dolayı dielektrik bir yapı eklenir. Bu dielektrik yapı frekans seçici yüzeyin tek tarafına da her iki tarafına da uygulanabilir. Her ne kadar frekans cevabında değişiklik yaratmayacağı düşünülse de eklenen dielektrik malzemenin kalınlığı, FSY'nin tek yüzeyine mi yoksa her iki yüzeyine mi uygulandığı gibi parametreler frekans cevabına etki eder ve rezonans frekansını önemli ölçüde değiştirebilir ve tasarım aşamasında bu etkiler göz önünde bulundurulmalıdır. Bağlı dielektrik sabitine (ϵ_r) sahip bir dielektrik malzemenin FSY üzerine farklı şekillerde uygulanması ile elde edilebilecek farklı frekans cevapları Şekil 2.15'de gösterilmiştir. [1]

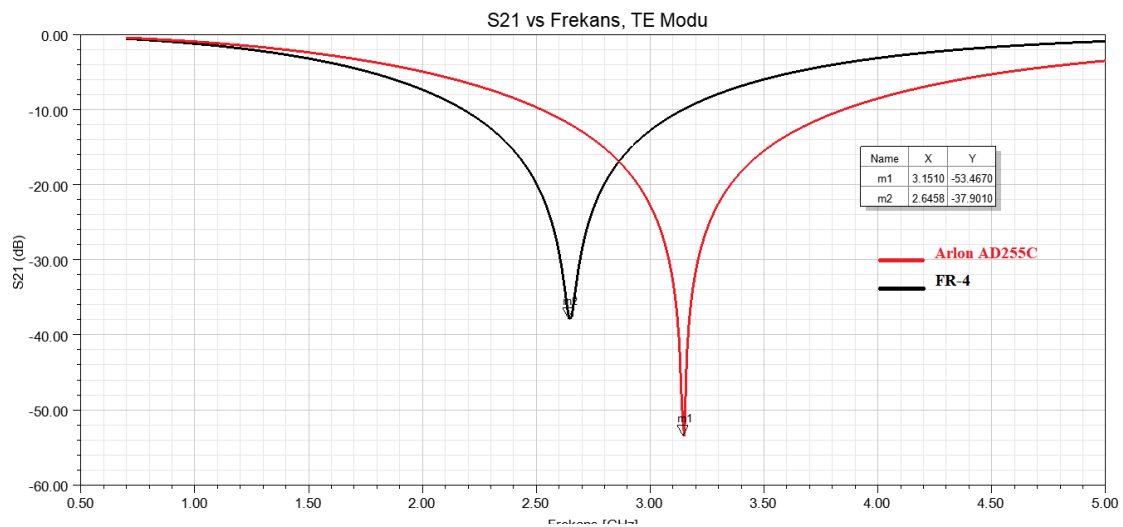


Şekil 2.15 Dielektrik malzemenin rezonans frekansına olan etkisi (a) FSY'nin her iki yüzeyine sonsuz kalınlıktaki dielektrik malzeme uygulanmasının rezonans frekansına olan etkisi. (b) FSY'nin tek yüzeyine ve her iki yüzeyine d kalınlığında dielektrik malzeme uygulanmasının rezonans frekansına olan etkisi [1].

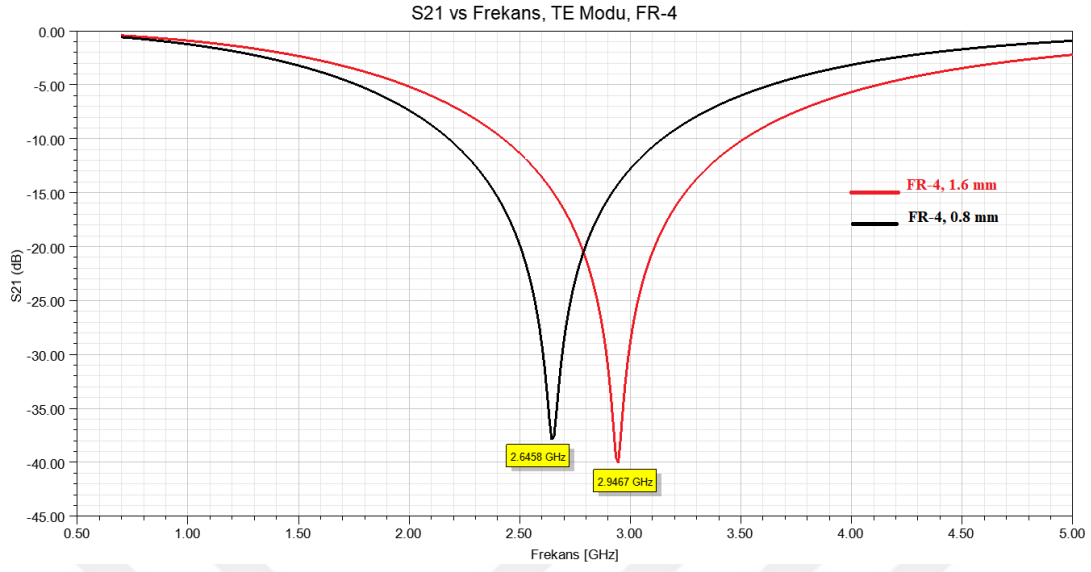
Şekil 2.16’da dairesel birim hücreden oluşan frekans seçici yüzey gösterilmiştir. Dielektrik malzemenin kalınlığının ve dielektrik sabitinin etkileri bu model üzerinde incelenmiştir. Dielektrik sabiti 4.4 olan FR-4 ve 2.55 olan Arlon AD255C malzemeleri 0.8 mm ve 1.6 mm kalınlıklarında incelenmiştir. Şekil 2.17’de 1.6 mm kalınlığı için iki farklı dielektrik malzemenin etkisi gösterilmiştir. Şekil 2.18’de 1.6 mm ve 0.8 mm kalınlıklarında FR-4 malzemenin etkisi gösterilmiştir. Şekil 2.19’da ise 1.6 mm ve 0.8mm kalınlıklarında Arlon AD255C malzemesinin etkisi gösterilmiştir. Bu etkilerden kaynaklı rezonans frekanslarındaki sapmalar bu şekillerden gözlemlenebilir.



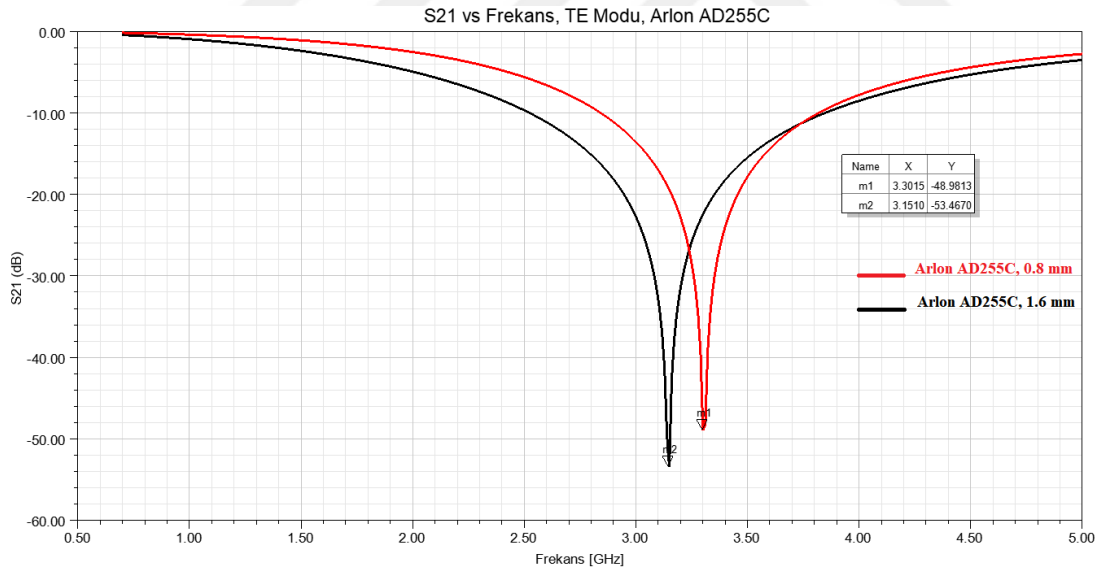
Şekil 2.16 Dairesel yapıda FSY birim hücresi



Şekil 2.17 Dairesel yüzeyin 1.6 mm kalınlığında farklı dielektrik malzemeler için frekans cevabı



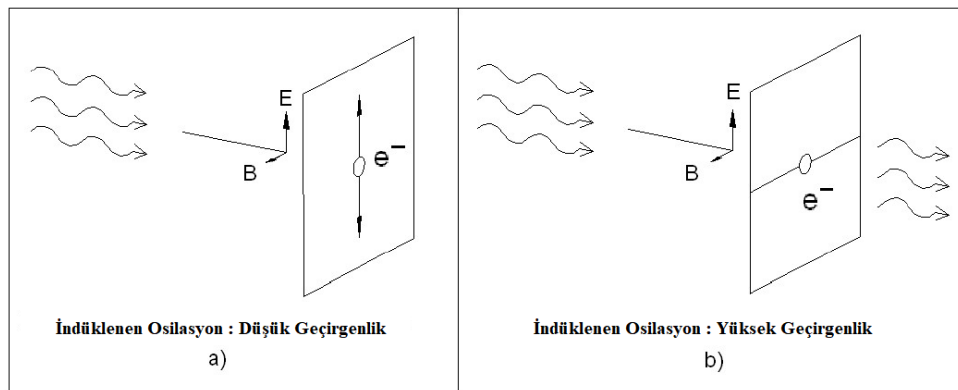
Şekil 2.18 Dairesel yüzeyin 1.6 mm ve 0.8mm kalınlığında FR-4 dielektrik malzeme için frekans cevabı



Şekil 2.19 Dairesel belirtilen yüzeyin 1.6 mm ve 0.8mm kalınlığında Arlon AD255C dielektrik malzeme için frekans cevabı

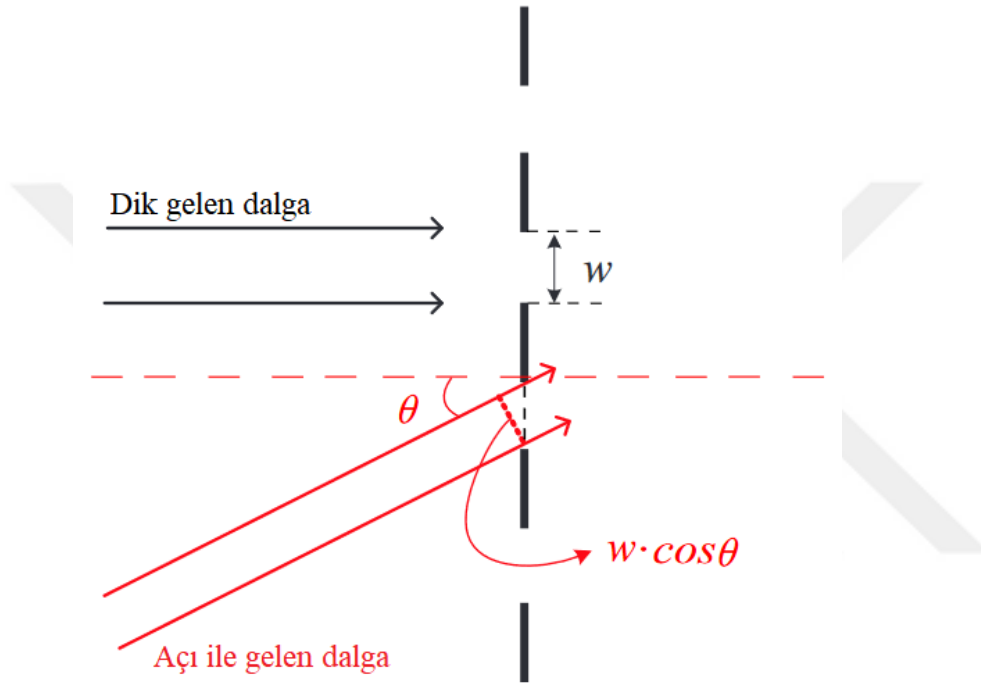
2.2.3. Dalgaların Polarizasyonu ve Geliş Açısı

Frekans seçici yüzeylerin frekans cevaplarını etkileyen faktörlerden biri de elektromanyetik dalgaların polarizasyonu ve geliş açısıdır. FSY'nin birim hücre yapısına bağlı olarak gelen polarizasyon frekans cevabına etki edebilir. Bu duruma örnek basitçe Şekil 2.20'de verilmiştir. Şekil 2.20'de a) şeklinde dikey duran metalik bir yapı olduğunu ve b) şeklinde ise yatay duran metalik bir yapı olduğunu varsayalım. Gelen dalga'nın elektrik alan vektörü eğer bu metalik yapı ile aynı düzlem üzerinde ise gelen dalga metalik yapı üzerine çarptığında buradaki elektronların salınmasına sebebiyet verecektir ve enerjinin büyükçe bir kısmı bu salınımında harcanacaktır. Dolayısıyla arka tarafa iletilen enerji miktarı da az olacaktır. Bu durumun tam tersi olarak eğer elektrik alan vektörü metalik yapıya dik olarak çarparsa bir önceki senaryoya kıyasla çok daha az salınımına sebep olacaktır ve enerjinin büyük bir kısmı yüzey üzerinde harcanmayarak arka tarafa iletebilecektir. Dalga polarizasyonunun etkisi temelde basitçe bu şekilde açıklanabilir. Burada önemli olan etken ise frekans seçici yüzeydir. Eğer FSY birim hücresi simetrik yapıda olursa dalga polarizasyonu değişse bile FSY'nin simetrik yapısından dolayı cevabının değişmesi beklenmez. Köşeli yüzeye sahip FSY'lerin farklı polarizasyondaki dalgalara verdiği cevaplara örnek olarak Şekil 2.13 ve Şekil 2.14 incelenebilir [19].



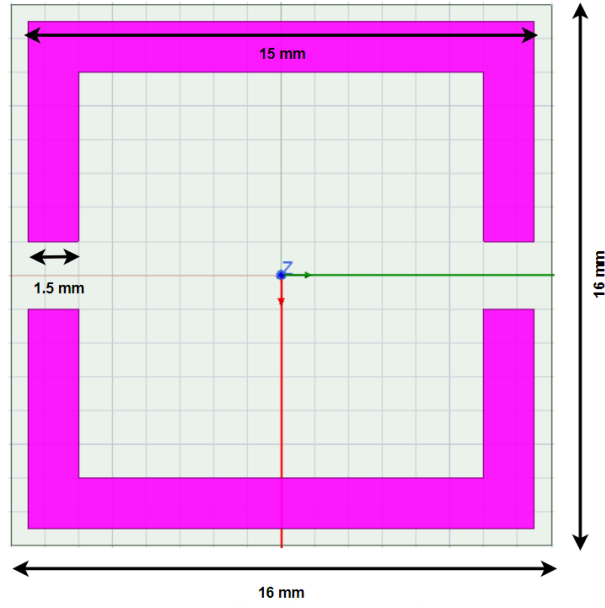
Şekil 2.20 Gelen dalga polarizasyonunun FSY cevabına etkisi [19]

FSY üzerine gelen dalgalar her zaman yüzeye dik olarak gelmezler. Belirli bir açı ile yüzeye ulaşan dalgalar frekans seçici yüzeyin frekans cevabını da etkilerler. Şekil 2.21’de iletken şeritler üzerine dik ve belirli bir açı ile gelen dalgalar gösterilmiştir. Dalga yüzeye dik gelirken şekiller arasındaki etkin mesafe w kadarken θ açısı ile geldiğinde etkin mesafe $\cos\theta$ kadar azalacaktır ve bu etki sebebiyle şeritler üzerinde endüklenen akımlarda birbirinden farklı olacaktır [20, 21].

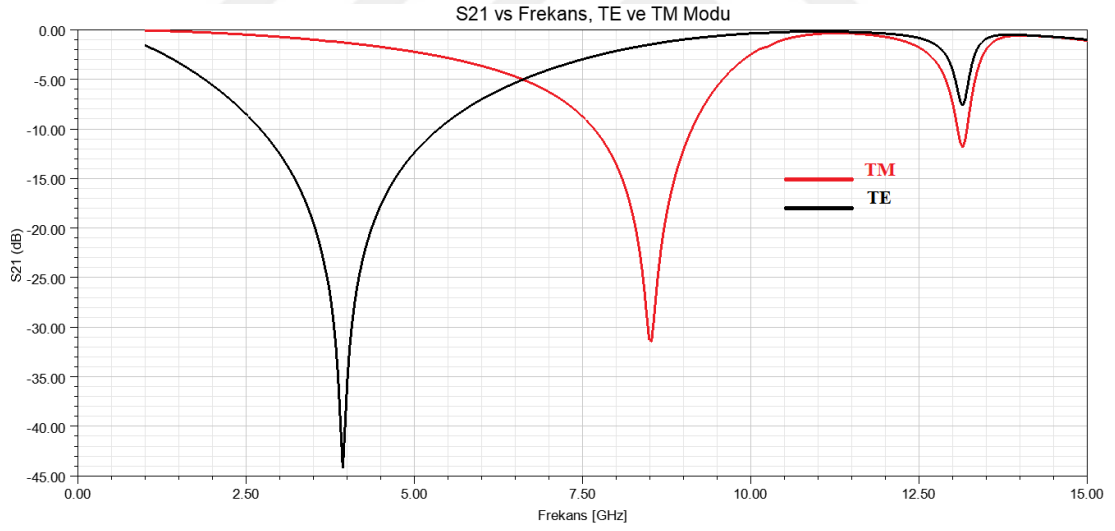


Şekil 2.21 FSY’ye dik ve açı ile gelen dalgaların etkin mesafe üzerine etkisi [20]

Önceden de bahsedildiği gibi frekans seçici yüzeyin simetrik bir yapısı yoksa gelen EM dalga polarizasyonuna bağlı olarak farklı frekans cevapları elde edilebilir. Bu duruma örnek olarak Şekil 2.22’de frekans seçici yüzey verilmiştir. Bu yüzey kare tipi yapıdan oluşur ancak yatay ekseninde iki noktada açıklığı bulunmaktadır. Bu açıklıklar dikey ekseninde oluşturulmamıştır. Yüzey 1 mm kalınlığında FR-4 malzeme üzerine inşa edilmiştir. Şekil 2.23’de bu yüzeyin TE ve TM polarizasyonlarındaki EM dalgaya verdiği cevap gösterilmiştir. Rezonans frekansındaki sapma bu şekilde rahatça gözlemlenebilir.



Şekil 2.22 Açıklığa sahip kare şeklinde birim hücre



Şekil 2.23 Açıklığa sahip kare şeklinde birim hücrenin TE ve TM polarizasyonlarında frekans cevabı

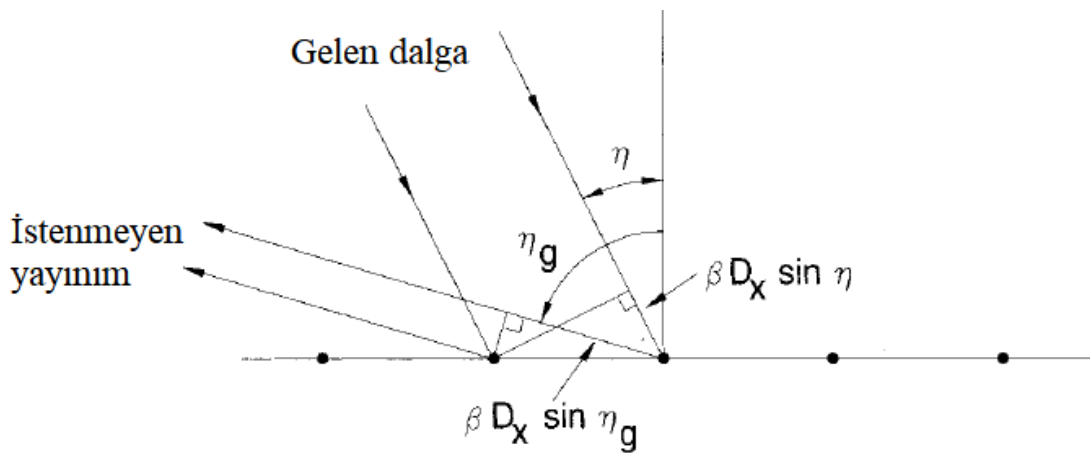
2.2.4. Birim Hücrelerin Arasındaki Mesafe

Giriş kısmında da bahsedildiği gibi frekans seçici yüzeyler periyodik birim hücrelerin bir araya gelmesiyle oluşurlar. Bu birim hücreler arasındaki mesafe frekans cevabını etkileyen başka bir faktördür. Eğer birim hücrelerin periyodu ilgili frekansın dalga boyundan büyük ise istenmeyen yönlerde yayılım oluşabilir. Bu durum Şekil 2.24’de gösterilmiştir.



Şekil 2.24 İstenmeyen yan loblar ve periyodik elemanlar arası mesafe [22]

Şekil 2.25’de birim hücrelerin periyodu D_x olarak gösterilmiştir. Bu yüzeye gelen dalgalar η açısına sahipse komşu birim hücreler arasında $\beta D_x (\sin(\eta) + \sin(\eta_g))$ kadar faz farkı oluşur. Eğer bu faz farkı 2π katlarına eşit ise istenmeyen yönlerde yayılım oluşacaktır [1].



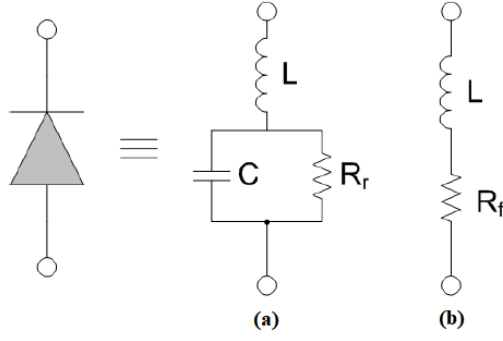
Şekil 2.25 İstenmeyen yayılım oluşumu [1]

2.3. Aktif Frekans Seçici Yüzeyler ve İncelemeler

Tezin giriş kısmında da bahsedildiği gibi aktif frekans seçici yüzeyler pasif frekans seçici yüzeylerden farklı olarak PIN diyot, varaktör diyot ve mikro elektromekanik anahtarlama (MEMS) elemanları gibi aktif elektronik elemanlar içerirler. Aktif elemanların entegrasyonu ile FSY, çalışma frekans bandını ayarlama veya izolasyon ve iletim durumları arasında geçiş yapma yeteneği kazanır [8 - 10].

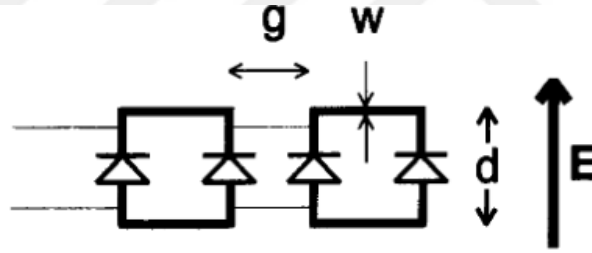
PIN diyotlar RF ve mikrodalga frekanslarında değişken direnç gibi davranan aktif devre elemanıdır. Doğru akım (DA) veya düşük frekanslarda PIN diyotlar, PN diyotlar gibi davranırlar. PN diyotlardan farklı olarak PIN diyotlar katkısız (undoped) bir içsel (intrinsic) bölge içerirler. Bu içsel bölge nispeten daha kalındır. Diyotun iletme geçmesi ile sürahi arasında bir analogi kurulabilir. Sürahinin taşıyabileceği bir su miktarı vardır. Bu miktarın üzerinde su eklenirse su taşmaya başlar. Benzer şekilde içsel bölgedeki elektron ve deliklerin (hole) sayısı birbirlerine eşitlenip dengeye ulaştığında diyot iletme geçer. P-I-N diyotun I bölgesinde biriken yüklerin ortadan kalkması ile diyot kesime girecektir. RF ve mikrodalga frekanslarındaki sinyallerin negatif döngüleri de hızlı olacağı için içsel bölgedeki bu yükler tamamen ortadan kalkması için yeterli zaman olmaz ve diyot tam olarak kesim moduna giremez ve uygulanan sinyal pozitif döngüye girdiğinde diyot tekrar iletme devam eder. Bu özelliği sayesinde PIN diyotlar RF ve mikrodalga frekanslarında akım kontrollü değişken bir direnç gibi davranırlar.

PIN diyotlar iletimde iken eşdeğer devre modeli seri endüktör ve direnç olarak, kesimde iken eşdeğer devre modeli seri endüktör ve buna paralel bağlanan direnç ve kapasitör olarak modellenenebilir. Bu durumlar Şekil 2.26'da gösterilmiştir. Şekilde gösterilen C kesimde iken oluşan kapasitans, R_r kesimdeki direnç, R_f iletimdeki direnç, L ise PIN diyotun kendisinden kaynaklı endüktanstır [23].

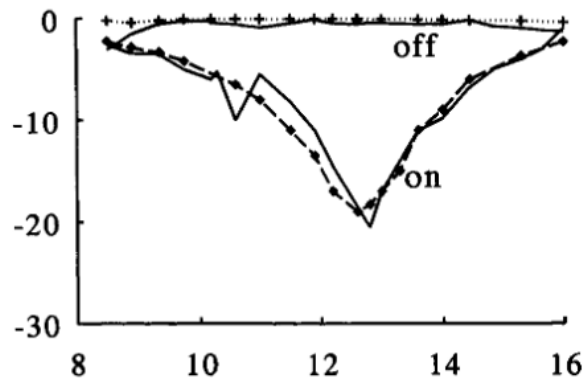


Şekil 2.26 PIN diyot eşdeğer devre modelleri. (a) Kesimde iken EDM. (b) İletimde iken EDM. [23]

Aktif frekans seçici yüzeyler ile ilgili araştırmalar otuz yılı aşındır devam etmektedir. Örneğin 1993 yılında yapılan bir çalışmada Şekil 2.27’de gösterildiği gibi PIN diyotlar kare şeklindeki birim hücrelere entegre edilerek Şekil 2.28’de gösterildiği gibi 12 GHz – 14 GHz aralığında PIN diyotlar iletimde ve kesimde iken FSY’nin iletim ve yansıtma durumları arasında geçiş yapabilen bir yapı önerilmiştir [24].

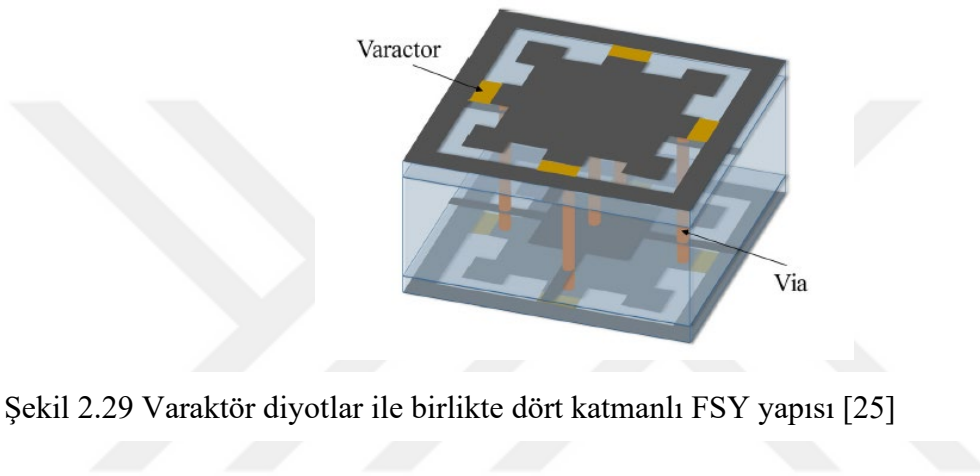


Şekil 2.27 PIN diyot entegre edilmiş kare yapıda aktif FSY [24]

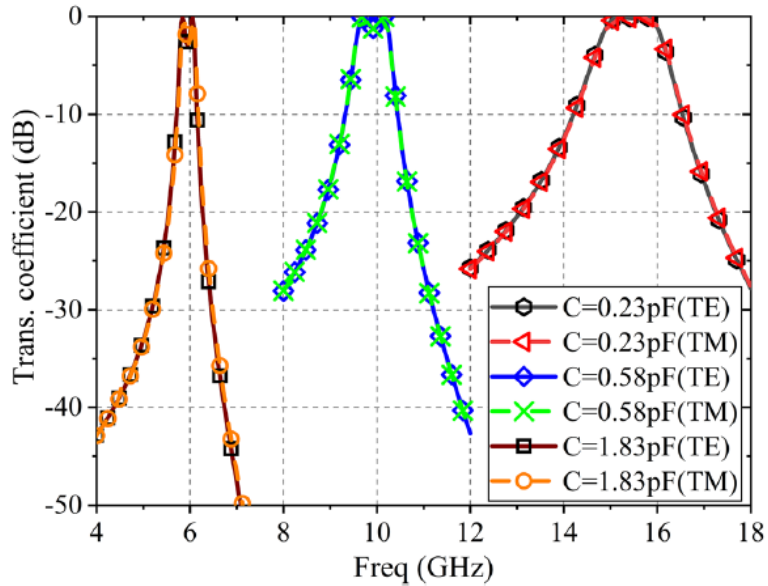


Şekil 2.28 PIN diyot entegre edilmiş kare yapıda aktif FSY’nin iletim ve yansıtma durumları [24]

Literatürde, birden çok frekans bandında çalışabilen ve merkez frekansı ayarlanabilir FSY yapıları bulunmaktadır. Örneğin bir çalışmada varaktör diyotlar sayesinde C, X ve Ku bantlarında çalışabilen aktif FSY yapısı önerilmiştir ve yapı çok katmanlıdır. Şekil 2.29'da bu FSY gösterilmiştir. Bu yapıda dört iletken katman ve üç dielektrik katmanı kullanılmıştır. En alt ve en üst katmanlarda varaktör diyot entegre edilmiştir. Şekil 2.30'de ise gösterildiği gibi varaktör diyotun farklı kapasitans değerleri için üç farklı bantta iletme geçebilen ve TE, TM polarizasyonlarında kararlı olan frekans cevabı gösterilmiştir [25].

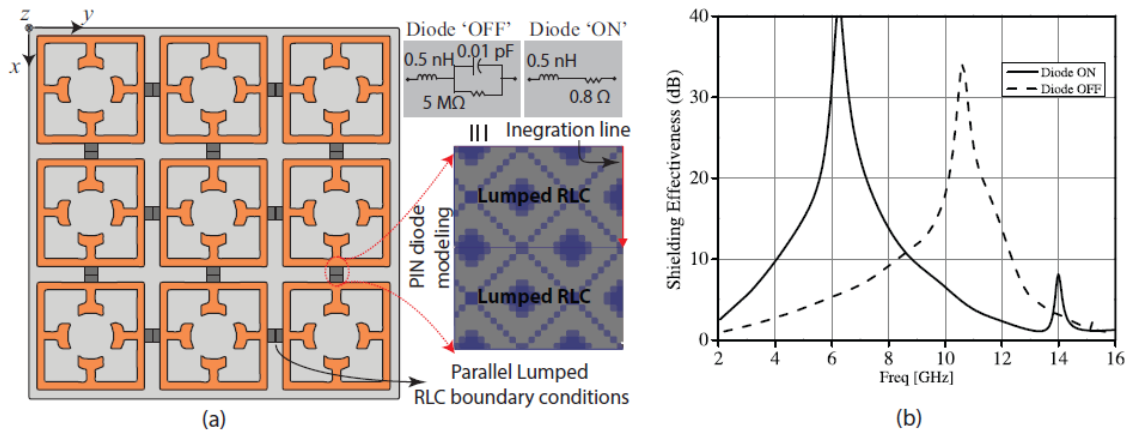


Şekil 2.29 Varaktör diyotlar ile birlikte dört katmanlı FSY yapısı [25]



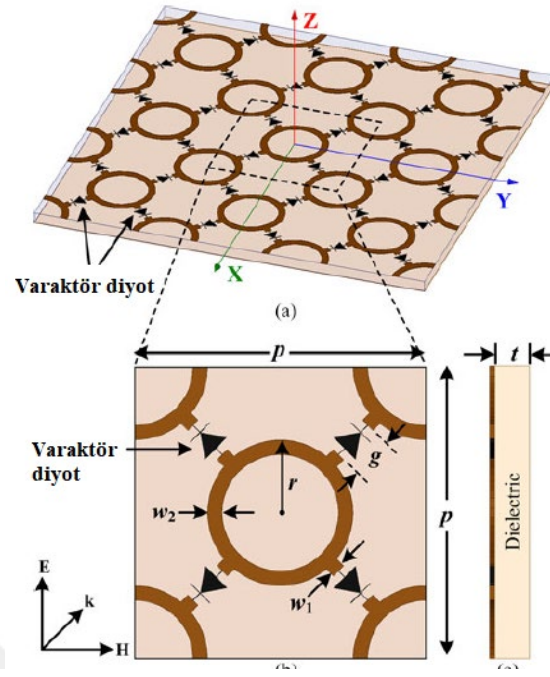
Şekil 2.30 Varaktör diyotun farklı kapasitans değerlerinde FSY cevabı [25]

Bir başka çalışmada ise PIN diyotlar kullanılarak C bandı (4-8 GHz) ve X bandı (8-12 GHz) arasında geçiş yapabilen RF kalkanlama uygulamaları için bir yapı önerilmiştir. Şekil 2.31’de bu yapı ve kalkanlama etkinliği verilmiştir. PIN diyotların iletim ve kesim durumlarındaki eşdeğer devre modelleri gösterilmiştir ve simülasyon ortamında PIN diyotlar toplu RLC elemanı olarak modellenmiştir. PIN diyotlar iletimde iken C bandında, kesimde iken X bandında RF kalkanlama yapılabildiği gösterilmiştir. İlgili tasarım tek katmanlı bir yapıya sahiptir [3].

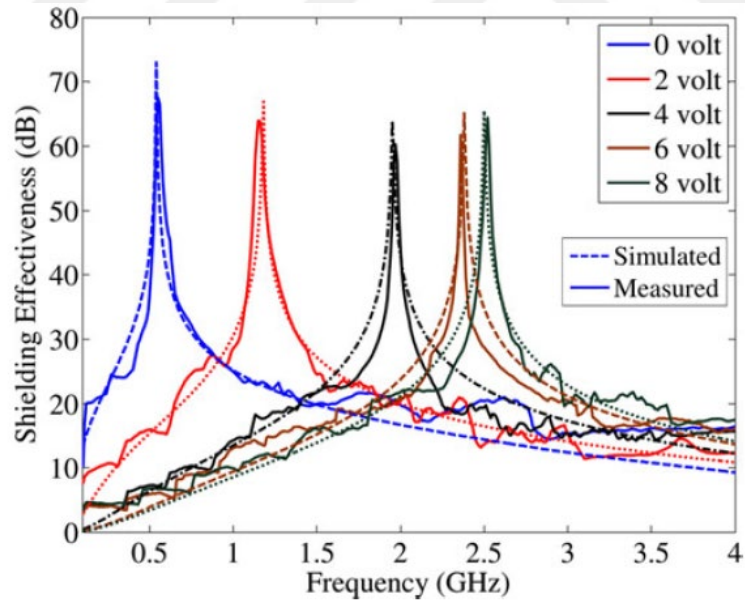


Şekil 2.31 C ve X bantları arası geçiş yapabilen FSY. (a) PIN diyot entegre edilmiş FSY yapısı, PIN diyot iletimde ve kesimde iken eşdeğer devre modeli, PIN diyot simülasyon modeli. (b) Diyot iletimde ve kesimde iken kalkanlama etkinliği [3]

Bir diğer çalışmada ise dairesel yapılara varaktör diyot entegre edilmiş ve varaktör diyotların ters voltaj beslemesinin değiştirilmesi ile kapasitans değerinin değişmesi sonucunda farklı frekans bantları arasında kalkanlama yapabilen bir FSY elde edilmiştir. Şekil 2.32’de bu FSY tasarımı verilmiştir. Şekil 2.33’de ise bu tasarımın farklı frekanslardaki RF kalkanlama etkinliği gösterilmiştir. Görüleceği üzere beş farklı frekans aralığı arasında geçiş yapılabilmektedir [11].

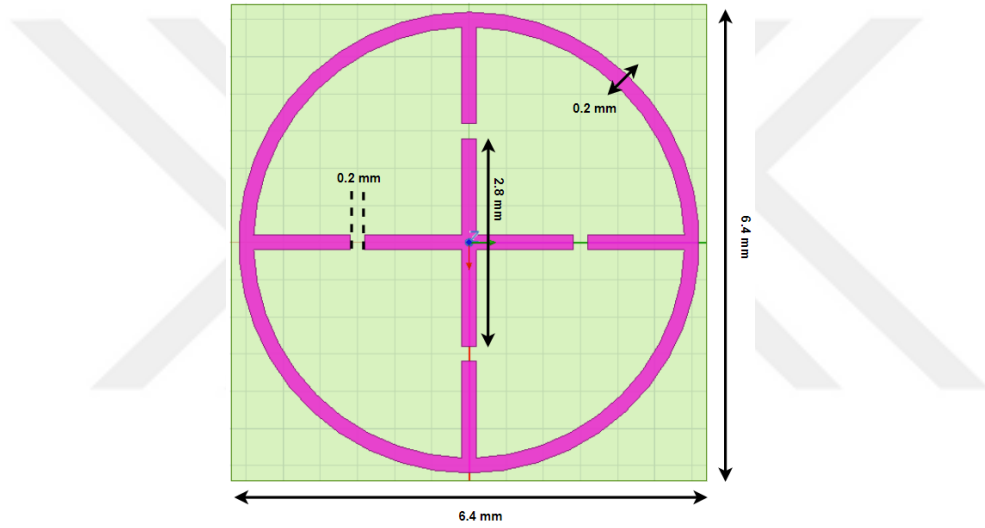


Şekil 2.32 Varaktör diyot entegre edilmiş dairesel birim hücreye sahip FSY. (a) Perspektif görüntüsü. (b) Üstten görüntüsü. (c) Yandan görüntüsü [11]

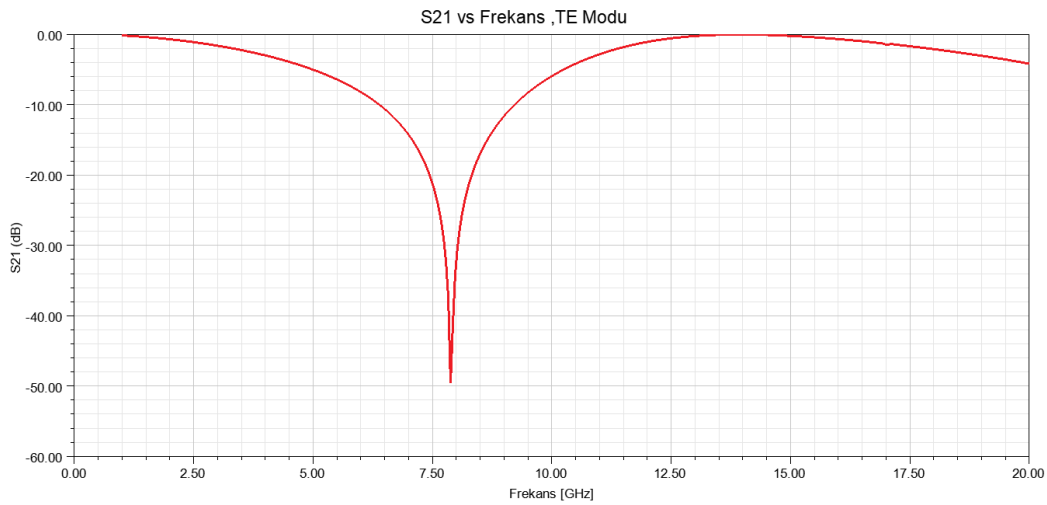


Şekil 2.33 Farklı ters voltaj besleme değerleri için RF kalkanlama etkinlikleri [11]

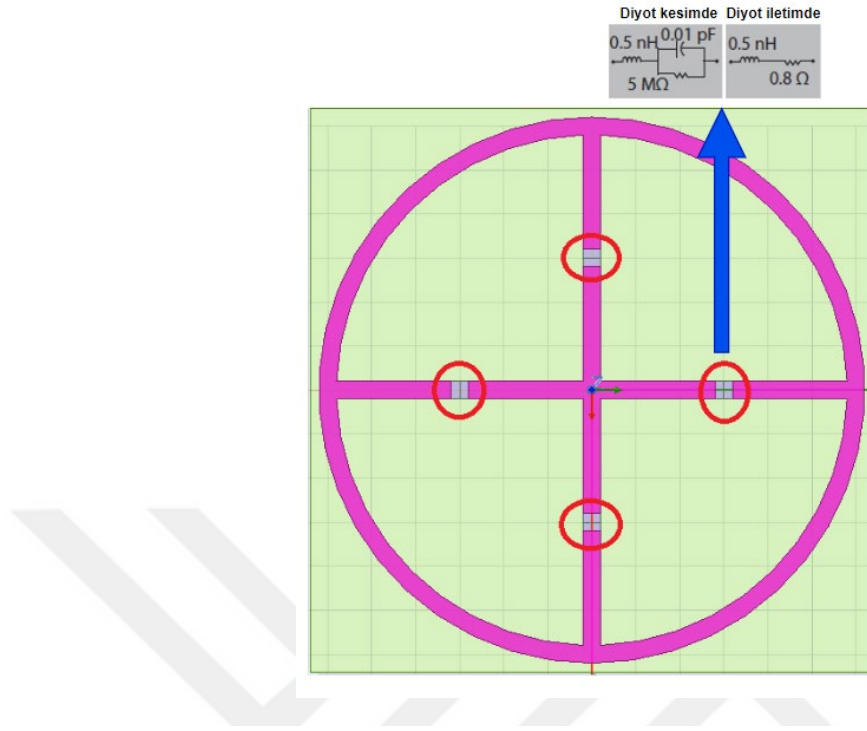
Bu tez çalışması kapsamında farklı pasif frekans seçici yüzeylere ANSYS benzetim ortamında PIN diyotlar ve varaktör diyotlar entegre edilerek çalışmalar yapılmıştır. Buna bir örnek olarak Şekil 2.34’de gösterilen dairesel ve artı şeklindeki pasif yüzeye Şekil 2.36’da gösterildiği gibi PIN diyotlar entegre edilmiştir. Pasif yüzeyin frekans cevabı Şekil 2.35’de gösterildiği gibidir. Aktif hale getirilen yüzeyin frekans cevabı Şekil 2.37’de gösterildiği gibidir. Benzetim için kullanılan bu yüzey [26] çalışmasından alınmıştır. Tıpkı [26] çalışmasında olduğu gibi dielektrik malzeme Arlon AD600 olarak kullanılmıştır ve kalınlığı 0.508 mm’dir. PIN diyot eşdeğer devre modelleri ise [3] çalışmasında gösterildiği gibi kullanılmıştır.



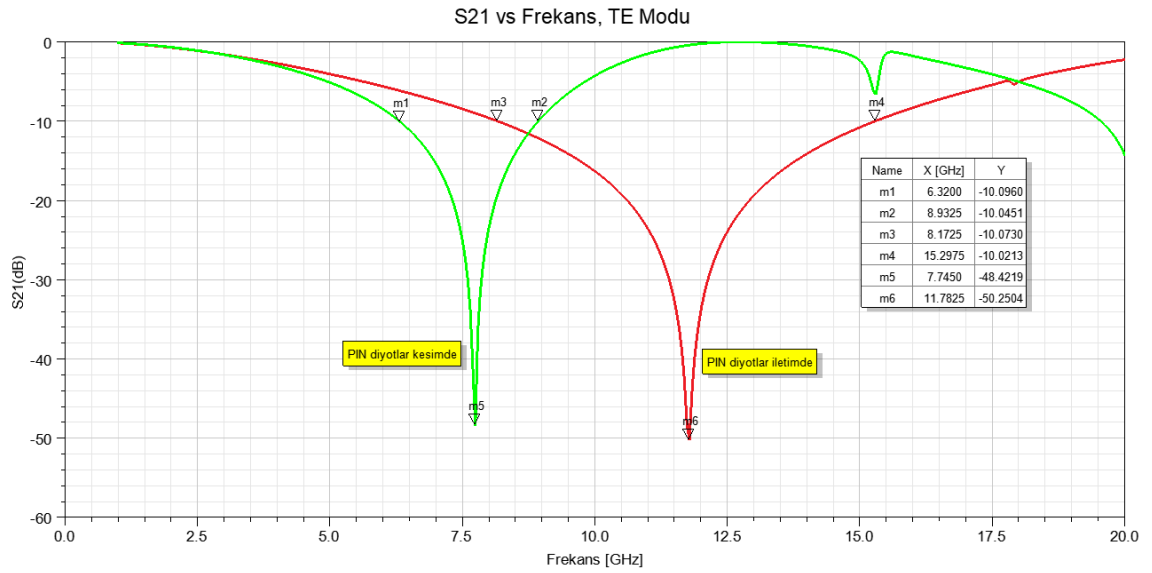
Şekil 2.34 Daire ve artı şeklinde pasif FSY



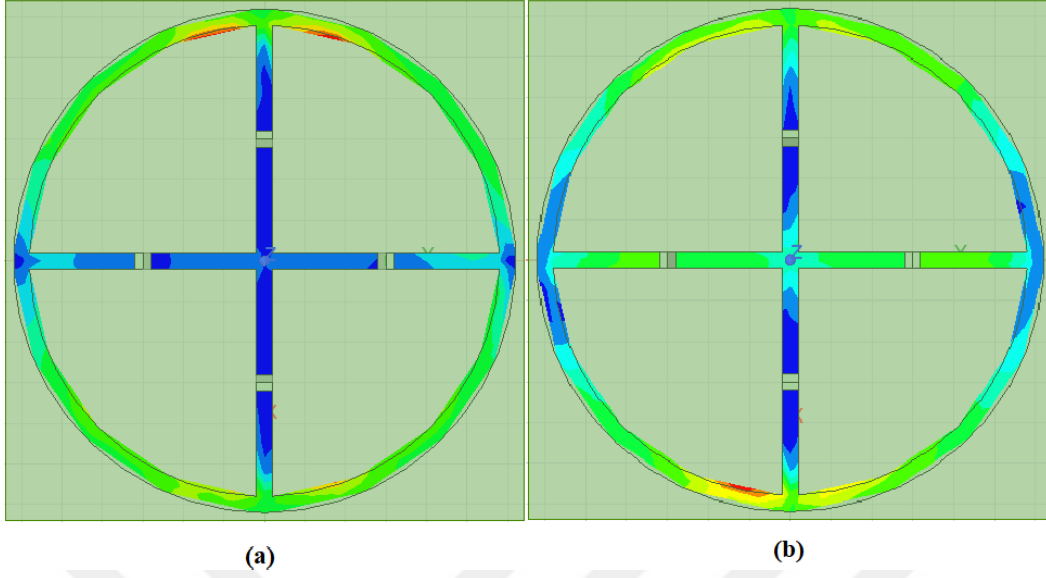
Şekil 2.35 Daire ve artı şeklindeki FSY frekans cevabı



Şekil 2.36 Daire ve artı şeklindeki yüzeyin PIN diyot entegre edilmiş modeli



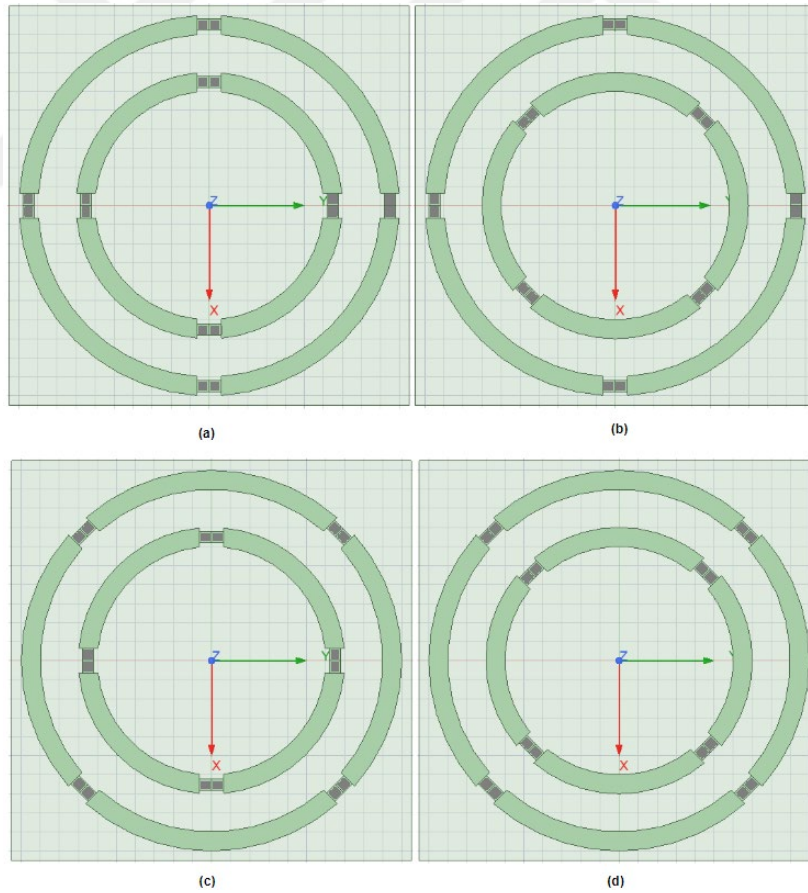
Şekil 2.37 Daire ve artı şeklindeki yüzeyin PIN diyotlar iletimde ve kesimde iken frekans cevabı.



Şekil 2.38 Daire ve artı şeklindeki yüzeyinin TE modunda yüzey akımları. (a) PIN diyotlar kesimde iken. (b) PIN diyotlar iletimde iken.

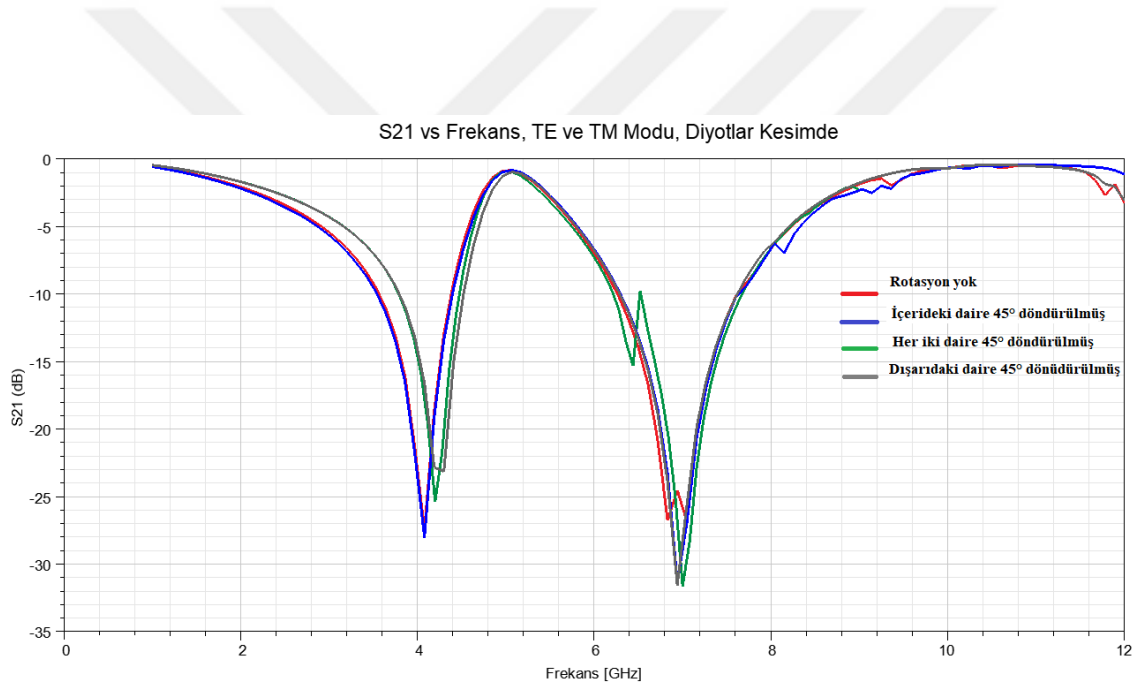
Şekil 2.38’de gösterildiği gibi PIN diyotların iletimde ve kesimde olması yüzey akımlarına etki etmektedir. Bu da frekans cevabını etkileyen bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.38 (a)’da PIN diyotlar kesimde iken yatay eksen üzerindeki akım yoğunluğu ile Şekil 2.38 (b)’de yatay eksen üzerindeki akım yoğunluğunun değişimi gözlemlenebilir. Şekil 2.37’de gösterildiği gibi PIN diyotlar kesimde iken pasif yüzeyle çok benzer frekans cevabı vermektedir ancak PIN diyotlar ilettime girdiği zaman 8 – 15 GHz bandını da yansıtabilen bir frekans seçici yüzey elde edilmiş olunur.

Tez çalışmasındaki tasarımlarda PIN diyotlar kullanılacağı için PIN diyotların FSY üzerindeki yerleşiminin frekans cevabına ne derece etki ettiği de incelenmiştir. Tasarımlarda dairesel yapılar kullanıldığı için dairesel yapılara PIN diyotlar entegre edilmiş ve bu entegre edilen PIN diyotların farklı rotasyonlarda bulunmasının frekans cevabına ne derece etki ettiği gözlemlenmiştir. Şekil 2.39'da 1.6 mm kalınlığında FR-4 malzeme üzerine tek katmana inşa edilmiş dairesel yapılar görülmektedir. Dış dairenin kalınlığı 1 mm, yarıçapı 10 mm'dir. İç dairenin kalınlığı 1 mm, yarıçapı ise 7 mm'dir. Birim hücre boyutu 21x21 mm'dir. Gri renk ile gösterilen bölgeler PIN diyotları içermektedir. PIN diyotlarının açık ve kapalı durumdaki endüktans değeri 0,7 nH civarındadır. Direnç, diyotlar iletimde iken yaklaşık 3 ohm, diyotlar kesimde iken direnç değeri 3000 ohm olarak alınmıştır ve diyotlar kesimde iken kapasitans 0.3 pF civarındadır. PIN diyotlar kesimde iken dışarıda bulunan daire yaklaşık 4 GHz frekansında rezonansa girerken, içeride bulunan daire yaklaşık 7 GHz frekansında rezonansa girer [27].

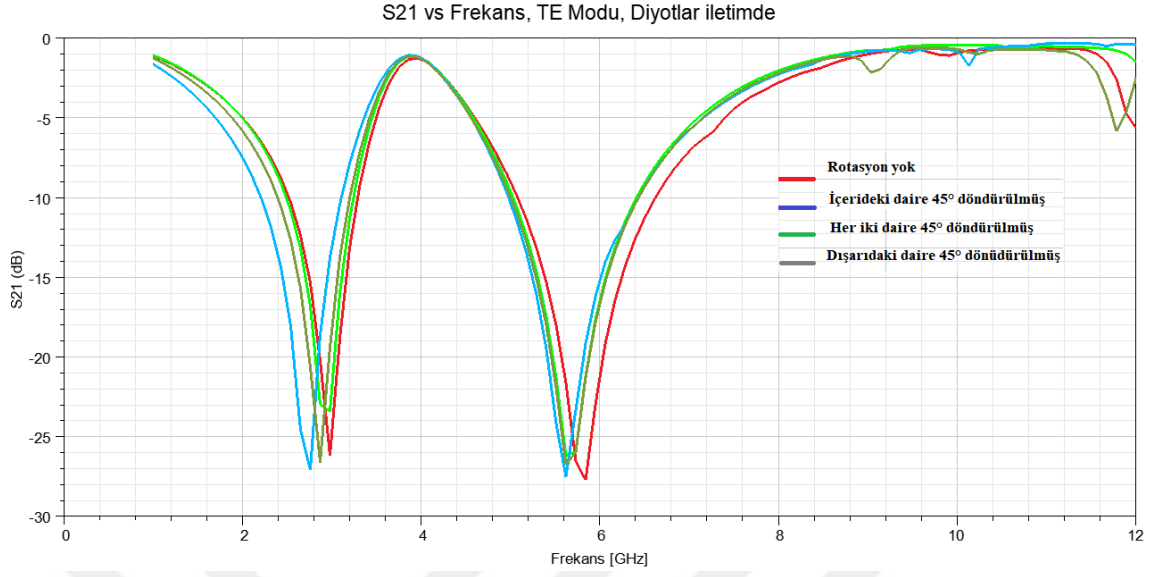


Şekil 2.39 Farklı rotasyonlara sahip birim hücreler. (a) Dış ve iç dairede rotasyon yok. (b) İç dairede 45° rotasyon var. (c) Dış dairede 45° rotasyon var. (d) Hem iç hem dış dairede 45° rotasyon var.

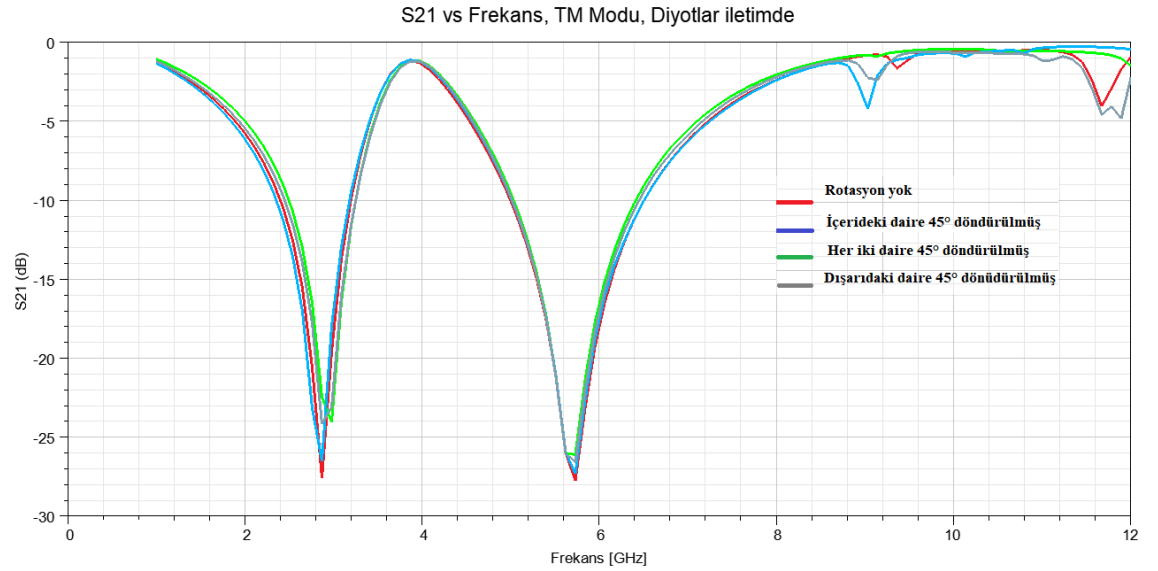
Şekil 2.39’da verilen (a), (b), (c) ve (d) konfigürasyonları için benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 2.40’da görüldüğü gibi PIN diyotlar kesimde iken farklı konfigürasyonlar için TE ve TM modunda aynı frekans cevapları elde edilmiştir ve farklı rotasyonlar için az düzeyde sapma yaşanmıştır. PIN diyotlar iletimde iken TE ve TM modlarının cevapları tamamen aynı değildir, az miktarda sapma yaşanmıştır. Şekil 2.41’de PIN diyotlar iletimde iken TE modundaki frekans cevapları verilmiştir. Şekil 2.42’de ise PIN diyotlar iletimde iken TM modundaki frekans cevapları verilmiştir. PIN diyotlar iletimde ve kesimde iken farklı rotasyonlarda TE ve TM modlarında yakın frekans cevabı vermelerinden dolayı bölüm 3.2. Tasarım II başlığı altında verilen tasarımda PIN diyotların besleme ağının rahatça kurulabilmesi adına PIN diyotlar 45° döndürülmüş şekilde kullanılmıştır.



Şekil 2.40 Farklı rotasyona sahip birim hücrelerin PIN diyotlar kesimde iken TE ve TM modunda frekans cevapları

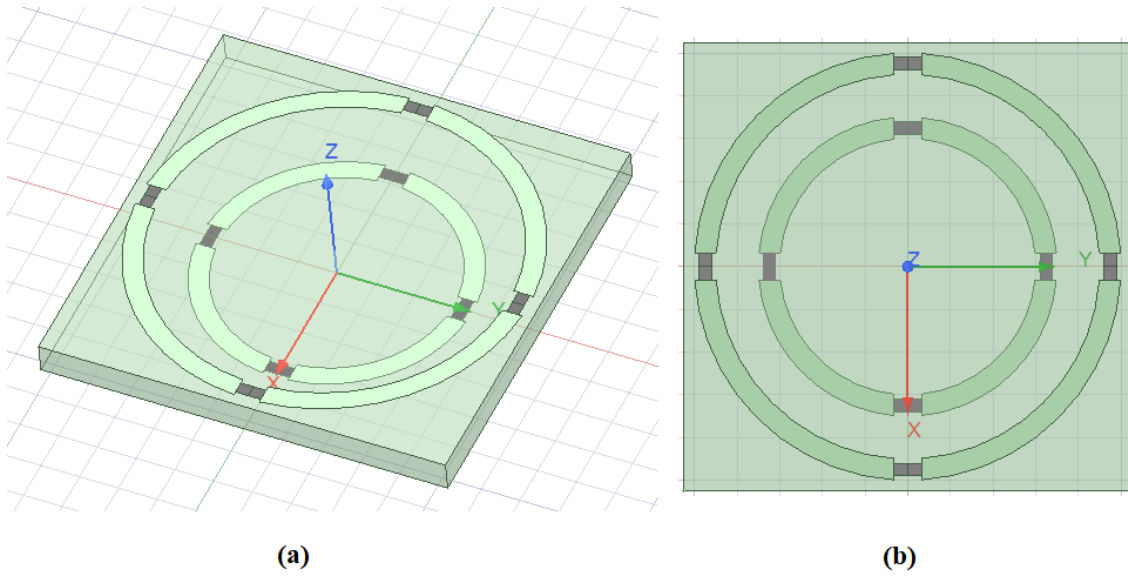


Şekil 2.41 Farklı rotasyona sahip birim hücrelerin PIN diyotlar iletimde iken TE modunda frekans cevapları

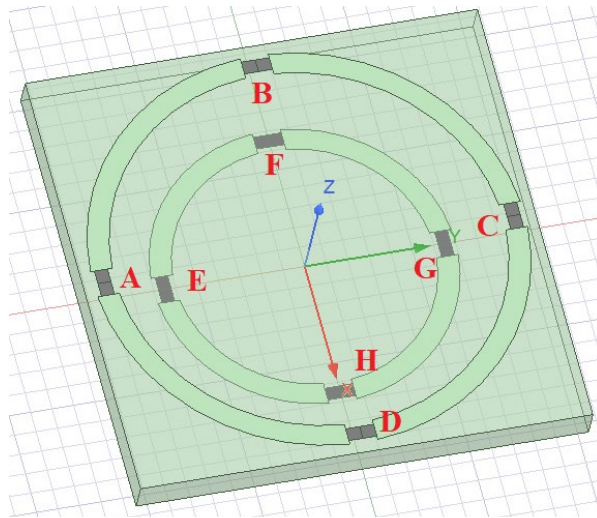


Şekil 2.42 Farklı rotasyona sahip birim hücrelerin PIN diyotlar iletimde iken TM modunda frekans cevapları

Tez çalışması kapsamında PIN diyotların iletimde iken sahip oldukları seri direnç değerinin değişmesinin, PIN diyotların tam iletim halinde ve kesim halinde olmasının iletim/yansıtma katsayısına ve faz değişimine olan etkileri de incelenmiştir. Bunun için Şekil 2.39’de belirtilen frekans seçici yüzey yapısı kullanılmıştır. Tek farkı içerideki dairenin alt katmana alınmasıdır. FR-4 malzeme üzerine iki katmanlı olacak şekilde yapı inşa edilmiştir. İlgili yüzeyin perspektif görüntüsü ve üstten görüntüsü Şekil 2.43’de verilmiştir. Bu yüzeyde bulunan PIN diyotlara Şekil 2.44’de gösterildiği gibi isim verilmiştir.



Şekil 2.43 İki katmanlı ve dairesel hücreye sahip aktif FSY. (a) Perspektif görüntüsü. (b) Üstten görüntüsü

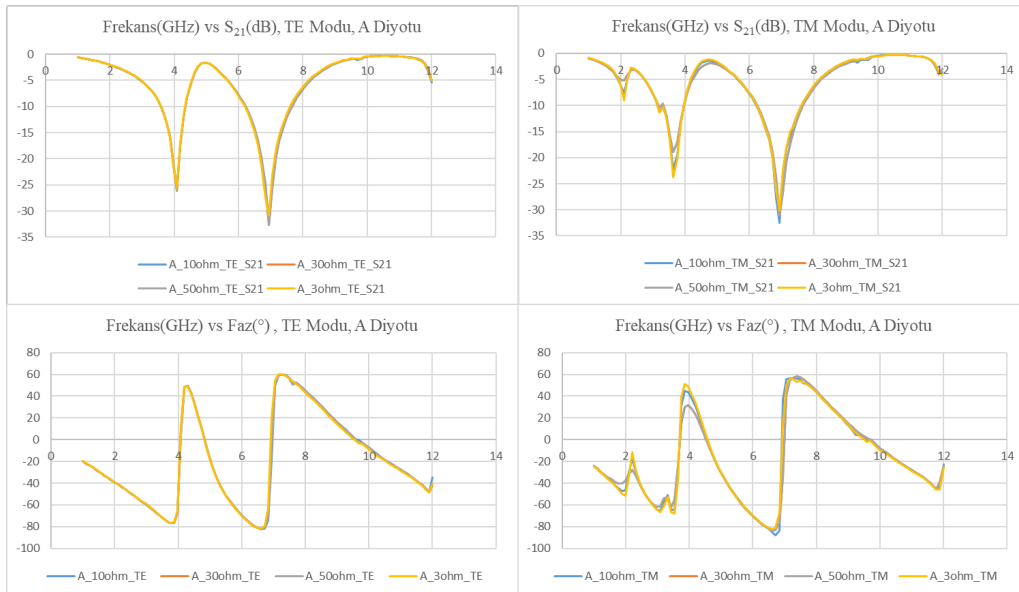


Şekil 2.44 PIN diyotları isimlendirilmiş iki katmanlı ve dairesel yapıya sahip FSY

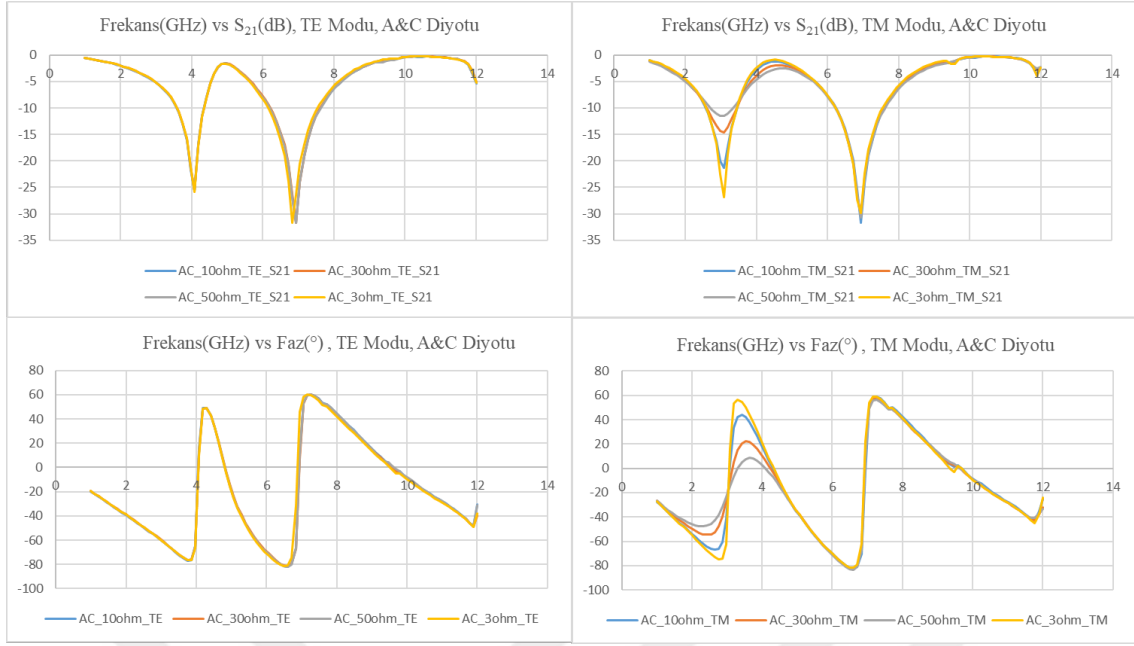
PIN diyotlar iletimde iken besleme voltajları değiştirildiğinde sahip oldukları direnç değeri de değişmeye başlar. PIN diyotların iletimde ve kesimde iken sahip oldukları eşdeğer devre modeli Şekil 2.26’da gösterildiği gibidir. Şekil 2.44’de verilen PIN diyotlar için farklı konfigürasyonlarda iletim halindeyken sahip olduğu direnç değeri $3\ \Omega$, $10\ \Omega$, $30\ \Omega$ ve $50\ \Omega$ olarak benzetim yapılmıştır. Seri endüktans değeri $0.6\ \text{nH}$ olarak alınmıştır. Son iki koşul hariç diğer PIN diyotlar kesimde iken aşağıdaki verilenler şu şekillerde yapılandırılarak FSY’nin TE ve TM modlarında iletim katsayısı ve faz değişimi incelenmiştir:

- Sadece A diyotunun seri direnç değeri değiştirilirken
- Sadece A&C diyotlarının seri direnç değeri değiştirilirken
- Sadece B diyotunun seri direnç değeri değiştirilirken
- Sadece B&D diyotlarının seri direnç değeri değiştirilirken
- Sadece E diyotunun seri direnç değeri değiştirilirken
- Sadece E&G diyotlarının seri direnç değeri değiştirilirken
- Sadece F diyotunun seri direnç değeri değiştirilirken
- Sadece F&H diyotlarının seri direnç değeri değiştirilirken
- Bütün diyotlar iletim halindeyken
- Bütün diyotlar kesim halindeyken

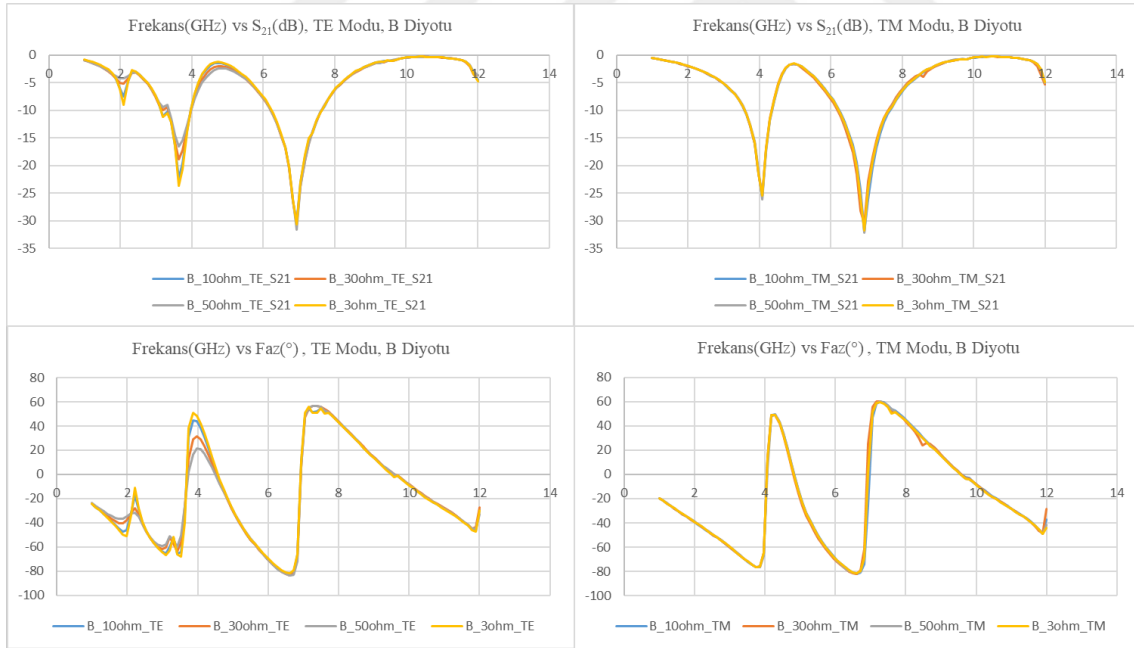
Elde edilen frekans ve S_{21} yanıtları Şekil 2.45 ile Şekil 2.53 arasında verilmiştir.



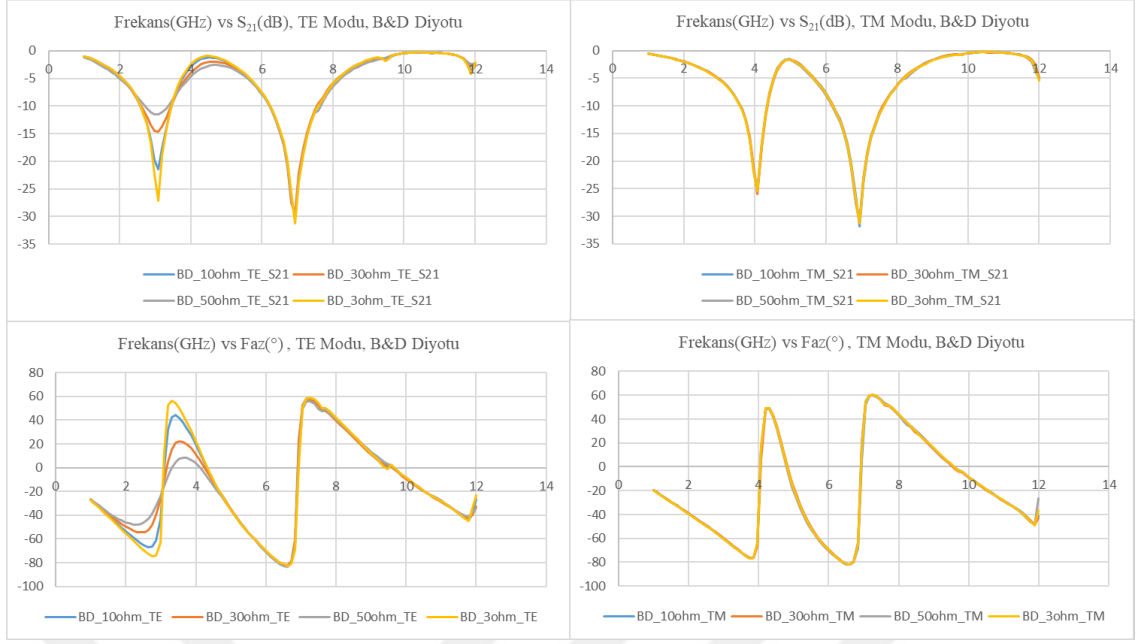
Şekil 2.45 Sadece A diyotu ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen $S_{21}(\text{dB})$ ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.



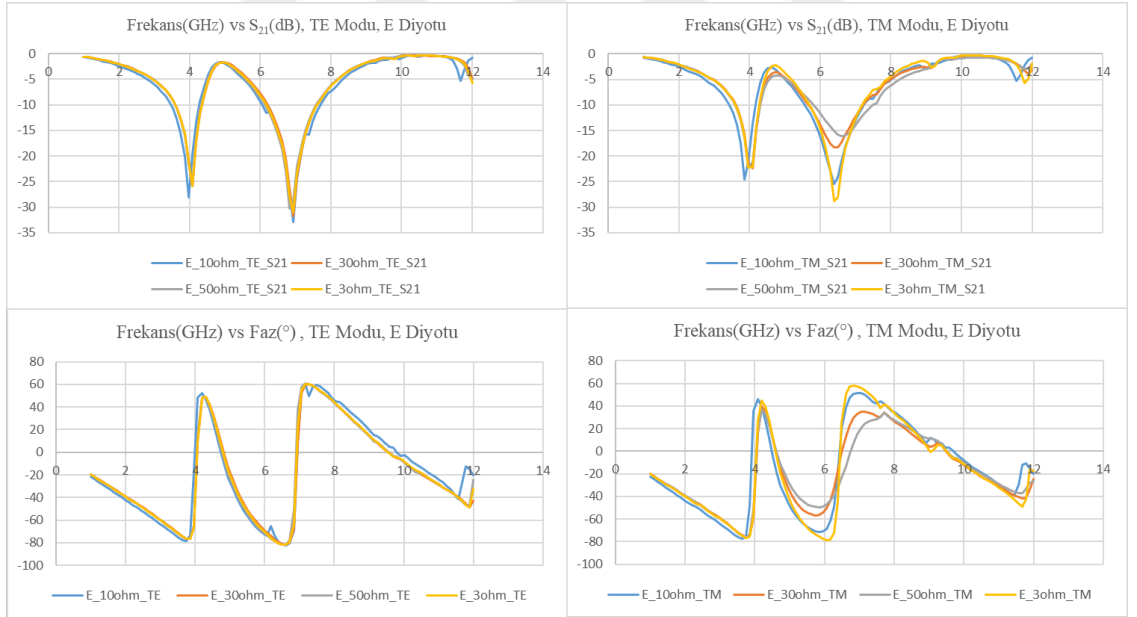
Şekil 2.46 Sadece A ve C diyotu ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen S₂₁(dB) ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.



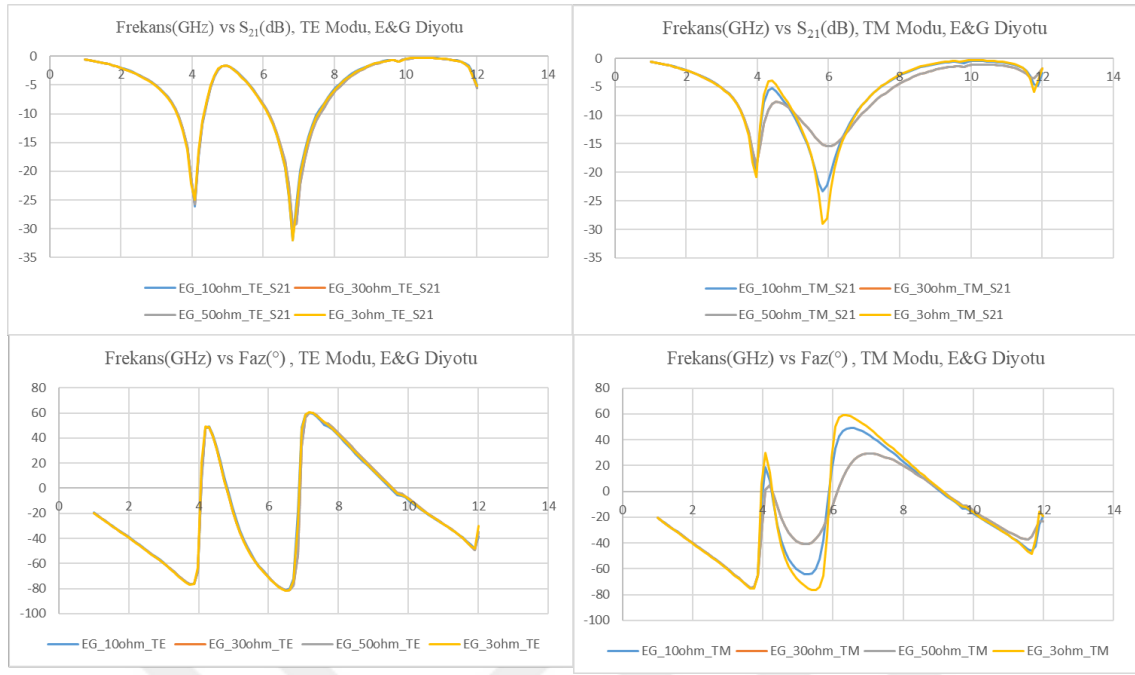
Şekil 2.47 Sadece B diyotu ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen S₂₁(dB) ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.



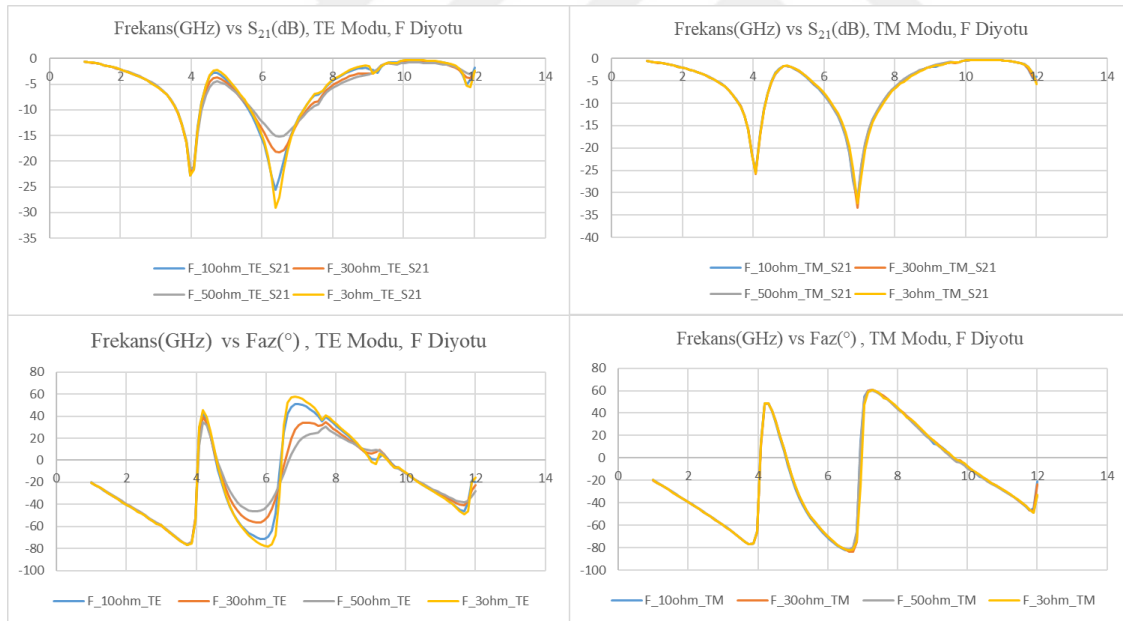
Şekil 2.48 Sadece B ve D diyotları ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen S_{21} (dB) ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.



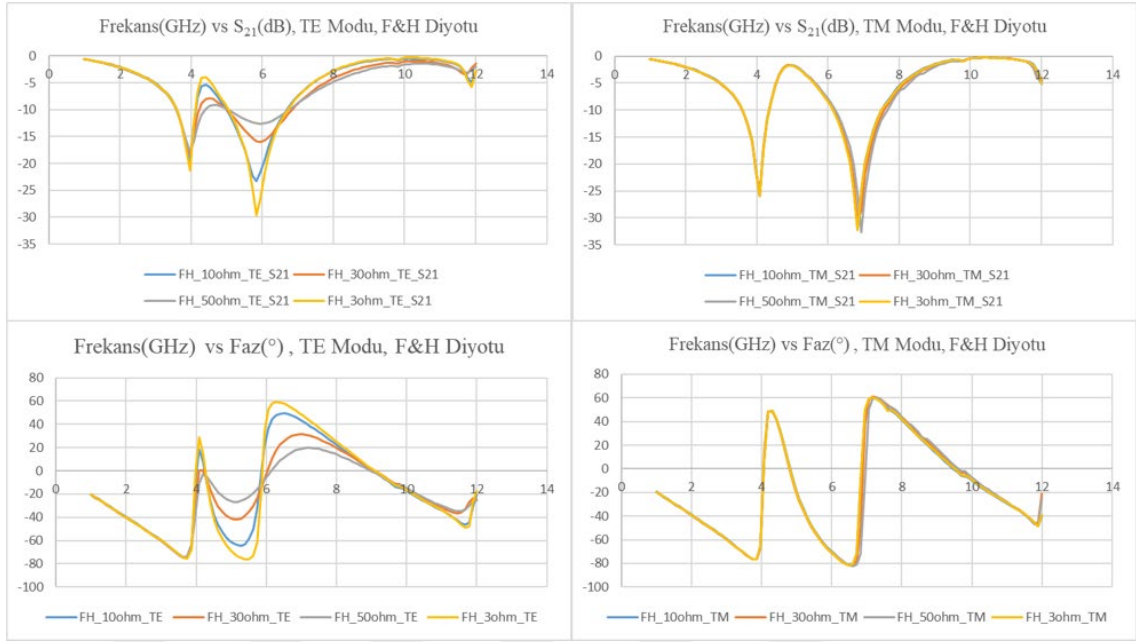
Şekil 2.49 Sadece E diyotu ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen S_{21} (dB) ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.



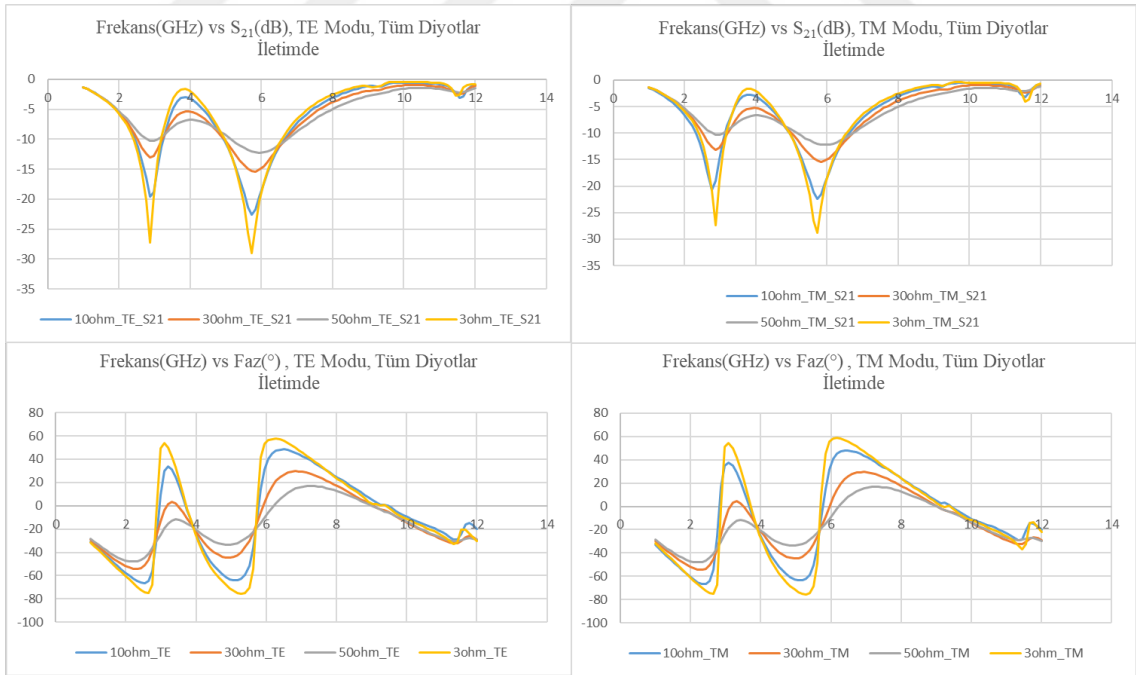
Şekil 2.50 Sadece E ve G diyotları ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen S_{21} (dB) ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.



Şekil 2.51 Sadece F diyotu ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen S_{21} (dB) ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.



Şekil 2.52 Sadece F ve H diyotları ayarlanırken TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen S_{21} (dB) ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.



Şekil 2.53 Tüm diyotlar iletimde iken farklı direnç değerleri için TE ve TM modlarında frekans ve faz cevapları, dikey eksen S_{21} (dB) ve yatay eksen frekans (GHz) belirtir.

Şekil 2.45’de görüldüğü gibi sadece A diyotunun direnç değeri değiştirildiğinde TE modundaki frekans ve faz cevapları değişmiyorken TM modunda oldukça az değişim görülmüştür. Şekil 2.46’da ise A ve C diyotlarının direnç değerleri birlikte değiştirildiğinde TM modunda S₂₁ parametresinde yaklaşık 15 dB’lik değişim ve fazında ise yaklaşık 60°’lik bir değişim yaşandığı görülebilir. Benzer durum Şekil 2.47’de gösterilen sadece B diyotu ayarlanırken ve Şekil 2.48’de gösterilen B ve D diyotları birlikte ayarlanırken görülebilir. Bir önceki durumdan farkı benzer değişimlerin TE modunda yaşanıyor olmasıdır bunun sebebi de diyotların FSY üzerindeki yerleşimleridir.

Benzer durum Şekil 2.49’da yalnızca E diyotunun ayarlandığı ve Şekil 2.50’de E ve G diyotlarının birlikte ayarlandığı senaryolarda da geçerlidir ancak bu seferki değişimler daha yüksek frekanslardaki bantta gerçekleşmektedir. Şekil 2.51 ve Şekil 2.52’de gösterilen F ve F ile H diyotlarının ayarlandığı senaryolardaki değişimler ise Şekil 2.49 ve Şekil 2.50’den farklı olarak TE modunda gerçekleşmektedir.

Şekil 2.53’de ise tüm diyotlar iletimde iken farklı direnç değerleri için faz ve frekans cevapları verilmiştir.

Bu grafiklerde de gözlemlenebileceği gibi direnç değeri değiştirilen PIN diyotların yerleşimleri TE ve TM moduna göre farklı cevaplar üretilmesine sebep olur. TE veya TM polarizasyonundaki dalgalara karşı FSY’nin iletim katsayısı ve faz cevabı kontrol edilen PIN diyot sayısına göre değişkenlik gösterir. Örneğin sadece A diyotunun direnç değerinin değiştirilmesiyle 2 – 4 GHz bandında pek değişiklik yaratmıyorken A ve C diyotlarının birlikte direnç değerlerinin değiştirilmesi Şekil 2.46’da görülebileceği gibi hem S₂₁ parametresinde hem de faz cevabında önemli değişimler yaratabilir. Öte taraftan rezonans frekanslarında farklı PIN diyotların kontrolü ile faz cevaplarındaki değişimler de gözlemlenebilir.

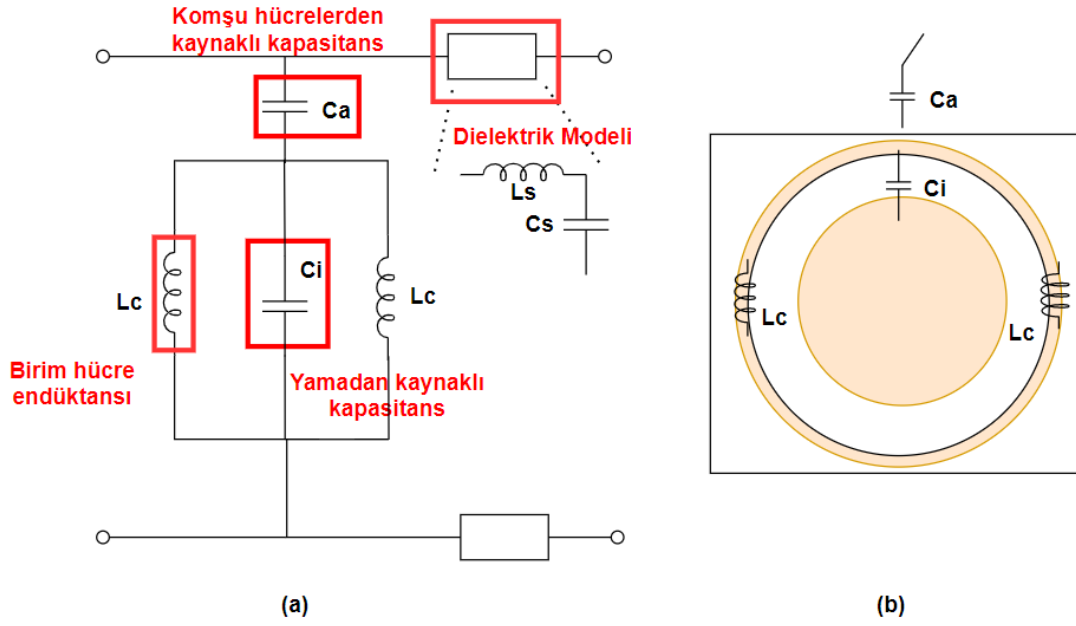
Faz değişiminin sağlanabiliyor olduğunu göstermek önemlidir zira haberleşme teknolojilerinin ilerlemesiyle birlikte akıllı yansıtıcı yüzeyler önemli bir araştırma konusu haline gelmektedir ve aktif frekans seçici yüzeyler bu alanda ön plana çıkmaktadır.

3. AKTİF FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMLARI

3.1. Tasarım I

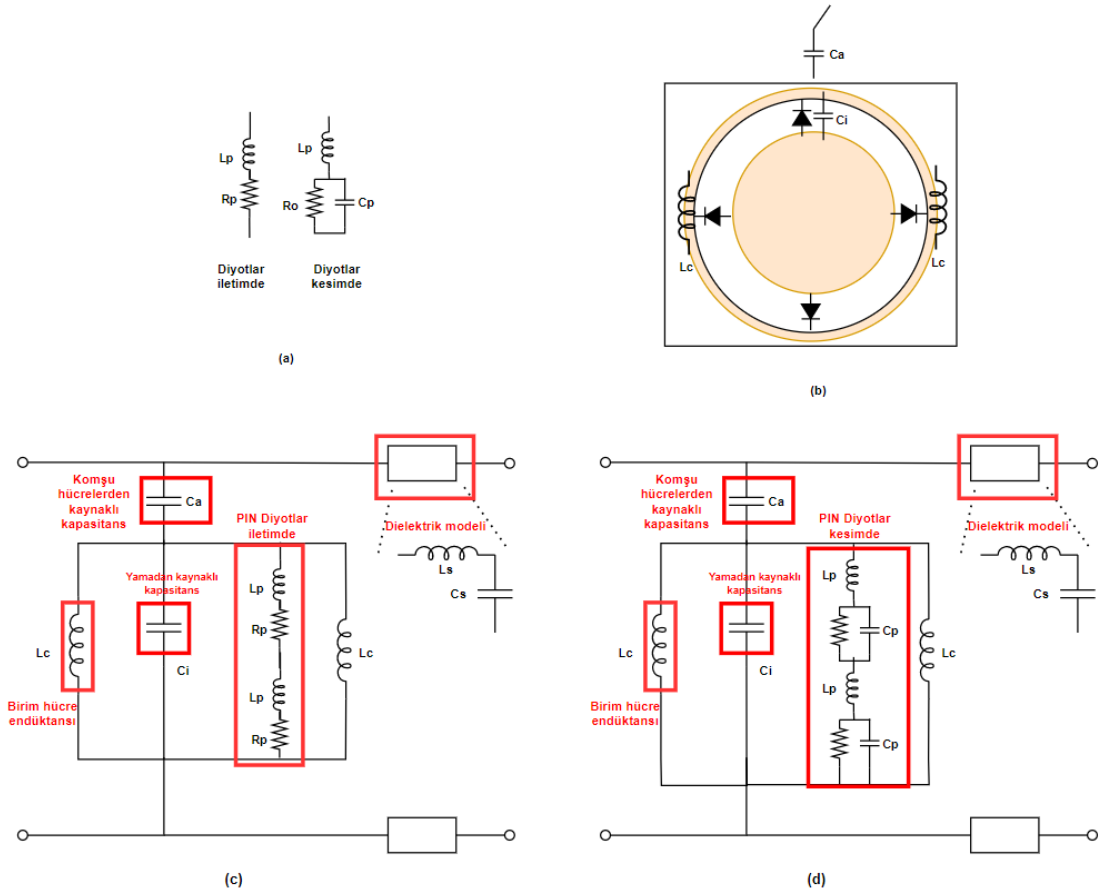
Bu tasarımda, bir FR-4 dielektrik üzerine saçılma parametresi ayarlanabilir bir FSY yapısı tasarlanmıştır. Bu FSY tek katmanlıdır. Tasarlanan FSY birim elemanı, dört PIN diyotu aracılığıyla 2.1 – 2.2 GHz'de iletim ve yansıtma durumları arasında geçiş yapabilir. Tasarım sürecinde öncelikle PIN diyotsuz birim elemanın eşdeğer devre modeli önerilmiş ve bir eşdeğer devre modeli üzerindeki eleman değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra diyotun devre modeli, açık ve kapalı durumları için eşdeğer devre modeline entegre edilmiştir. Birim elemanın sentezinden sonra FSY katmanı ANSYS elektromanyetik (EM) analiz aracı ile analiz edilmiştir. Elektromanyetik analiz yinelemeleriyle birlikte FSY tasarımı tamamlanmıştır.

PIN diyot olmadan FSY yapısı için eşdeğer devre modeli Şekil 3.1'de, PIN diyot entegre edilmiş FSY yapısı için eşdeğer devre modeli de Şekil 3.2'de önerilmiştir. İç yama ve dış daireler arasındaki kapasitif etki C_i olarak modellenmiştir. Dış daire ve komşu birim hücre arasındaki kapasitif etki C_a olarak modellenmiştir. Dış daire yarı endüktansı L_c olarak modellenmiştir. Dielektrik malzeme, endüktans L_s ve kapasitans C_s ile modellenmiştir. PIN diyot eşdeğer modeli, diyot iletimde olduğunda bir seri endüktör ve bir dirençten oluşur ve PIN kesimde iken eşdeğer devresi, paralel bağlı bir direnç ve bir kapasitöre seri endüktörden oluşur. Bu tasarımda kullanılan PIN diyotu SMP1302-079LF'dir. PIN diyotlarının açık ve kapalı durumdaki endüktans değeri 0,7 nH civarındadır. Direnç, diyotlar iletimde iken yaklaşık 3 ohm, diyotlar kesimde iken yaklaşık 700 ohm ve diyotlar kesimde iken kapasitans 0.3 pF civarındadır [23, 27].



Şekil 3.1 Tasarım I, PIN diyotsuz eşdeğer devre modeli. (a) EDM. (b) Şematik gösterimi.

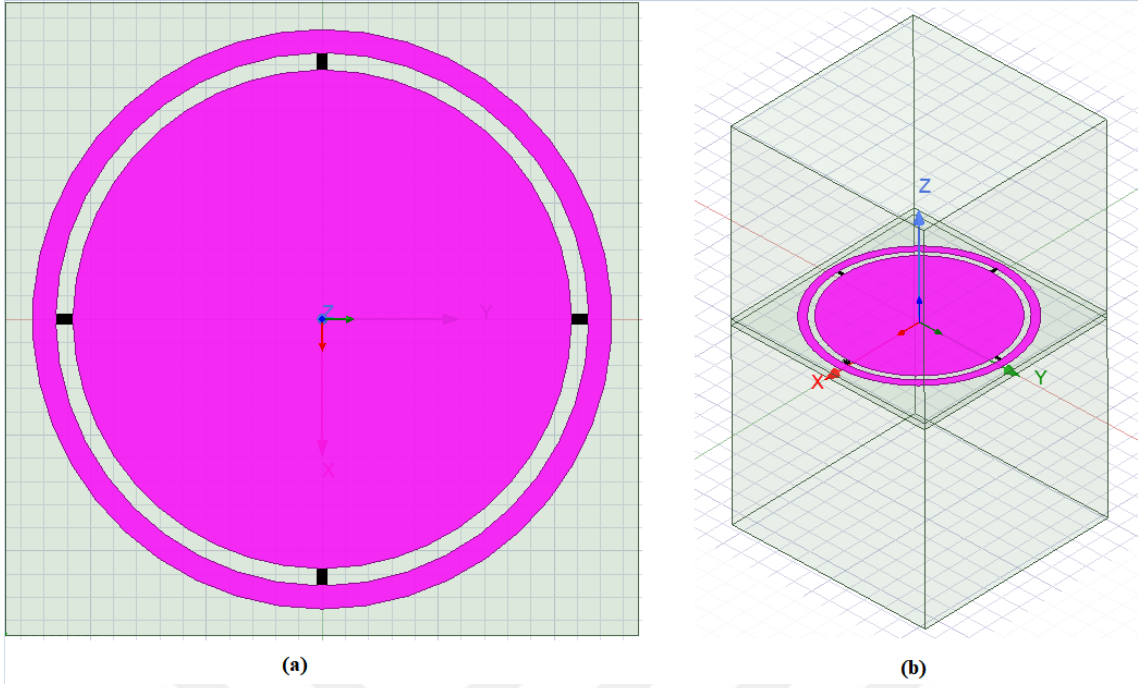
L_c değerinin hesaplanması için (2.2) denkleminde faydalanılmıştır. Bu denklemde D_i dış dairenin çevresinin yarısıdır w ise dairenin kalınlığıdır. C_a ve C_i değerlerinin hesaplanması için (2.1) denkleminde faydalanılmıştır. Bu denklemde D_c , FSY genişliğidir, s ise birim hücreler arasındaki mesafedir. Burada birim hücreler arasındaki mesafe 4.75 mm'dir ve FSY boyutları 54.61 mm x 54.61 mm'dir. L_s ve C_s değerleri hesaplanması için (2.3) ve (2.4) denklemlerinden faydalanılmıştır. Burada dielektrik malzeme olarak FR-4 kullanılmıştır ve bağıl dielektrik sabiti 4.4 olarak kullanılmıştır. Dielektrik malzeme kalınlığı ise 1.6 mm'dir. İlgili frekans aralığında bant geçiren filtre yanıtı elde etmek için iç yamanın yarıçapı, dış çemberin iç ve dış yarıçapları sırasıyla 21,5 mm, 23 mm ve 25 mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.1'deki eşdeğer devre eleman değerleri $C_a = 0.87$ pF, $C_i = 0.9$ pF, $L_c = 22$ nH, $L_s = 2$ nH ve $C_s = 62$ fF olarak bulunmuştur. Bir sonraki aşama olarak PIN diyotların iletim ve kesimde iken eşdeğer devre modelleri Şekil 3.1'deki PIN diyotsuz devre modeline entegre edilmiştir. PIN diyot entegre edilmiş devre modelleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



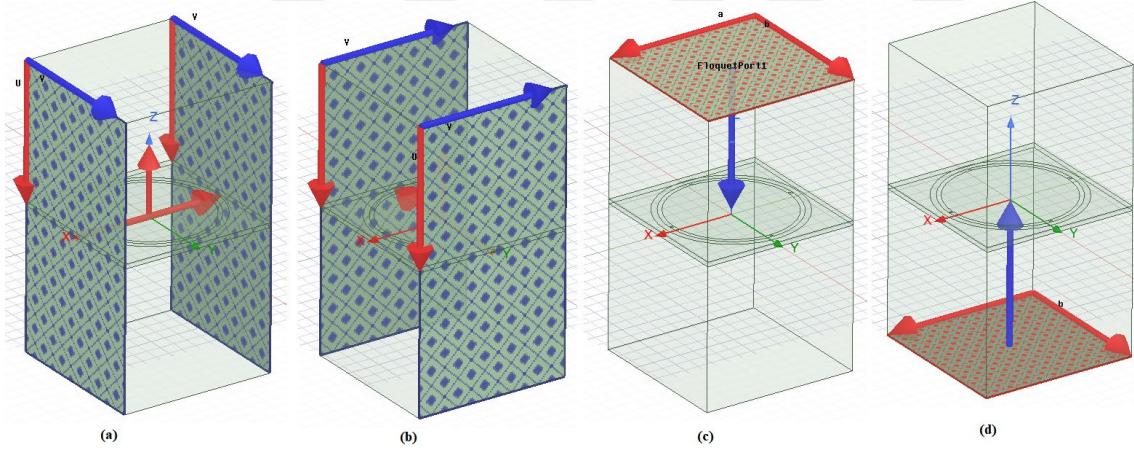
Şekil 3.2 Tasarım I, PIN diyotlu eşdeğer devre modeli. (a) Diyotlar açık ve kapalı durumda iken EDM. (b) Diyot entegre edilmiş FSY şematik gösterimi. (c) PIN diyotlar iletimde iken EDM. (d) PIN diyotlar kesimde iken EDM.

Tasarımda kullanılan diyotlar için $L_p = 0.7nH$, $R_p = 3\Omega$, $R_o = 700\Omega$, $C_p = 0.3pF$ dir [27].

Şekil 3.3’de ANSYS EM analiz programında tasarlanmış FSY görseli verilmiştir.



Şekil 3.3 Tasarım I, ANSYS tasarımı. (a) Üstten görüntüsü. (b) Perspektif görüntüsü. Siyah ile işaretli bölgeler PIN diyetleri temsil etmektedir.

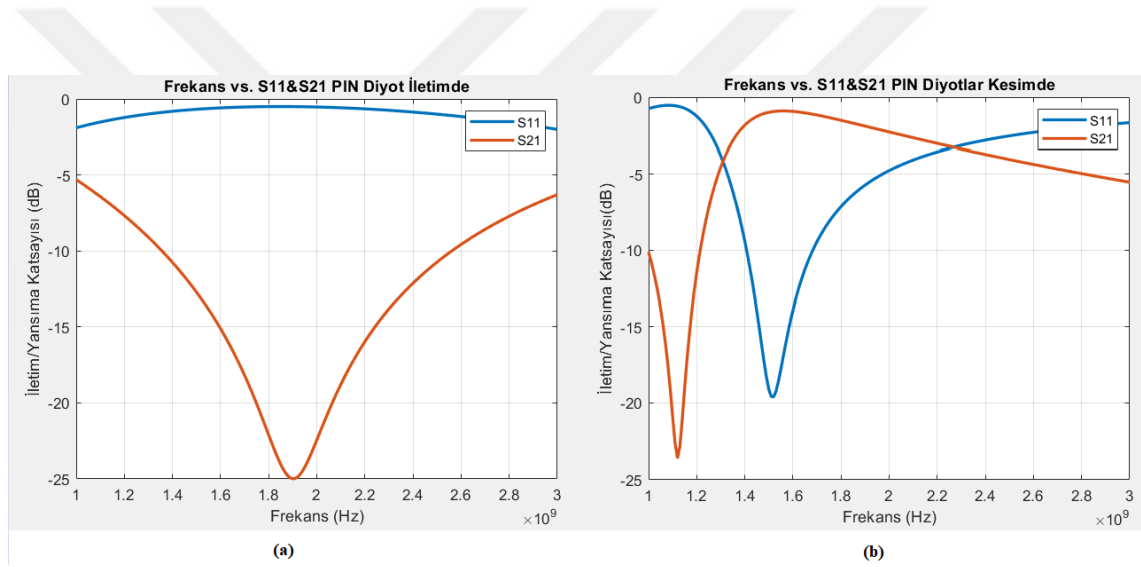


Şekil 3.4 Tasarım I, port atamaları. (a) Yüzey koşulu ataması 1. (b) Yüzey koşulu ataması 2. (c) Port ataması 1. (d) Port ataması 2.

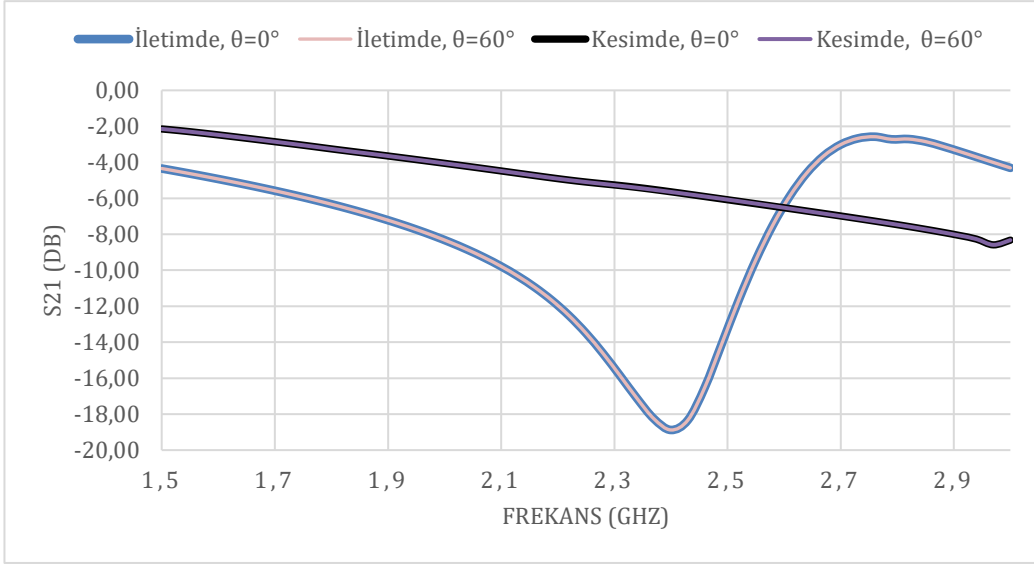
Frekans seçici yüzeyler teorik olarak sonsuz boyuttan oluşmaktadır. ANSYS ortamında bu durumu gerçeklemek için birim hücreye 'LatticePair' veya 'Master/Slave' sınır koşulları tanımlamak gerekmektedir. Saçılma parametresini elde edebilmek için de 'Floquet Port' ataması yapılmıştır. Bunlar Şekil 3.4'de gözlemlenebilir.

3.1.1. Tasarım I, Benzetim ve Üretim Sonuçları

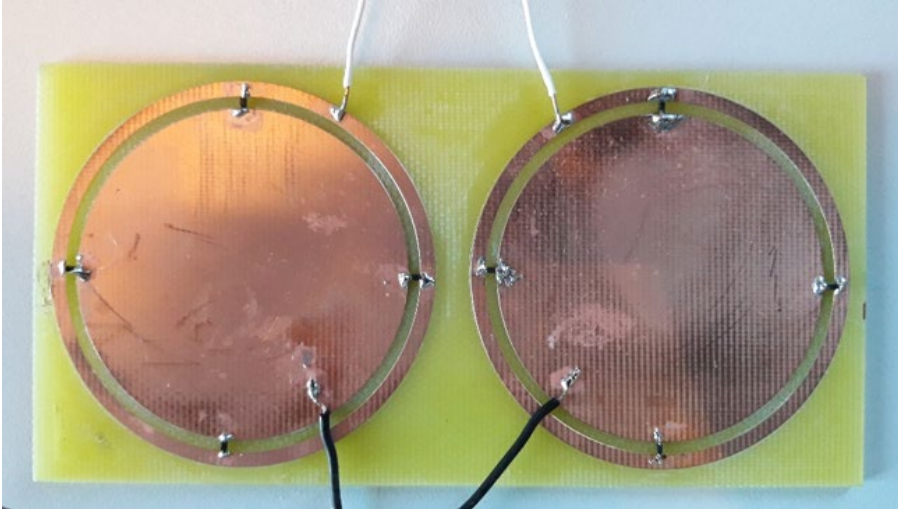
Şekil 3.5’de PIN diyot entegre edilmiş FSY tasarımının MATLAB ortamında çözümlenmesi ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Şekil 3.6’da, ANSYS ortamında yapılan tasarımın PIN diyotlar iletim ve kesim halinde iken 60 dereceye kadar geniş açısı için benzetim sonuçları verilmiştir. 0 derecedeki dalga yönü Şekil 3.4’de c şeklinde gösterilen mavi ok yönündedir. Bu benzetim sonuçlarına göre tasarlanan frekans seçici yüzey, dalgaların 60 dereceye kadar geniş açısına karşı kararlılık göstermiştir. Tasarımın üretilmiş hali Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Üretilen FSY’nin iletim ve yansıma parametreleri Şekil 3.8’de gösterildiği gibi dalga kılavuzu aracılığı ile ölçülmüştür. Bu ölçümün sonuçları Şekil 3.9’da verilmiştir.



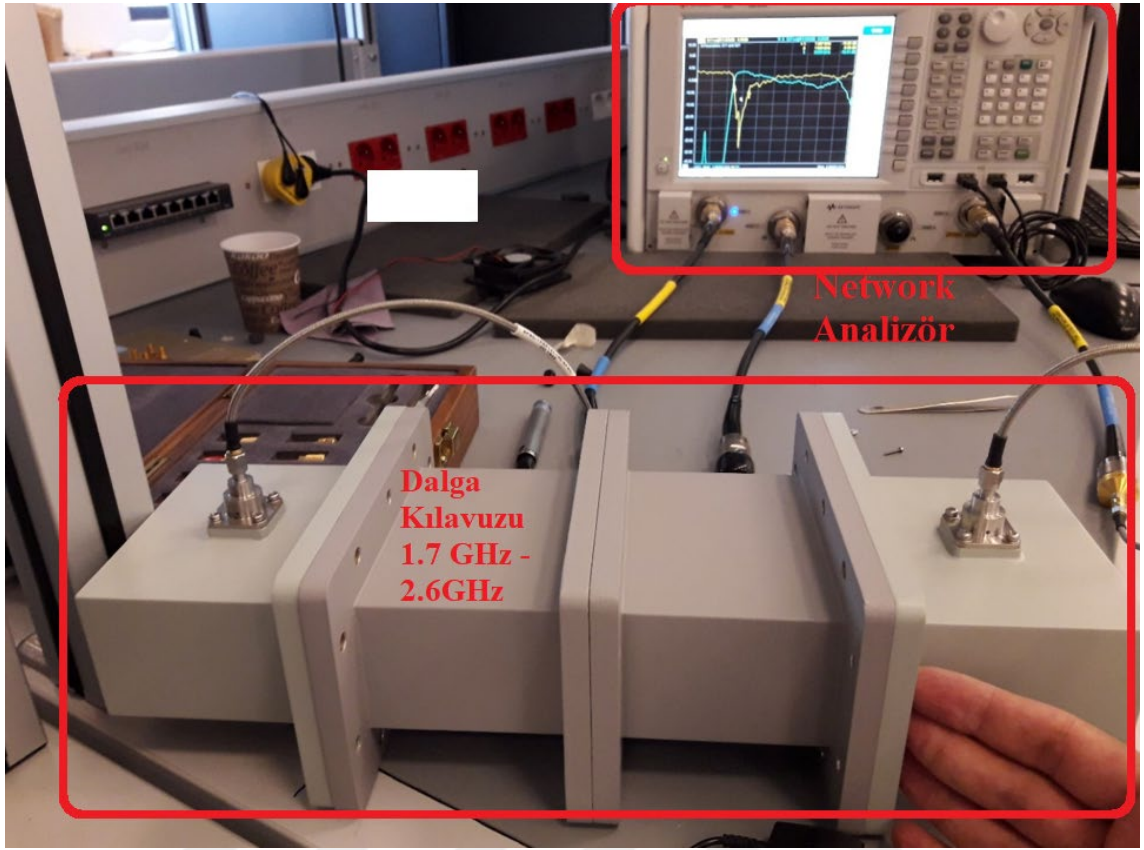
Şekil 3.5 Tasarım I, EDM çözümü. (a) PIN diyotlar iletimde. (b) PIN diyotlar kesimde



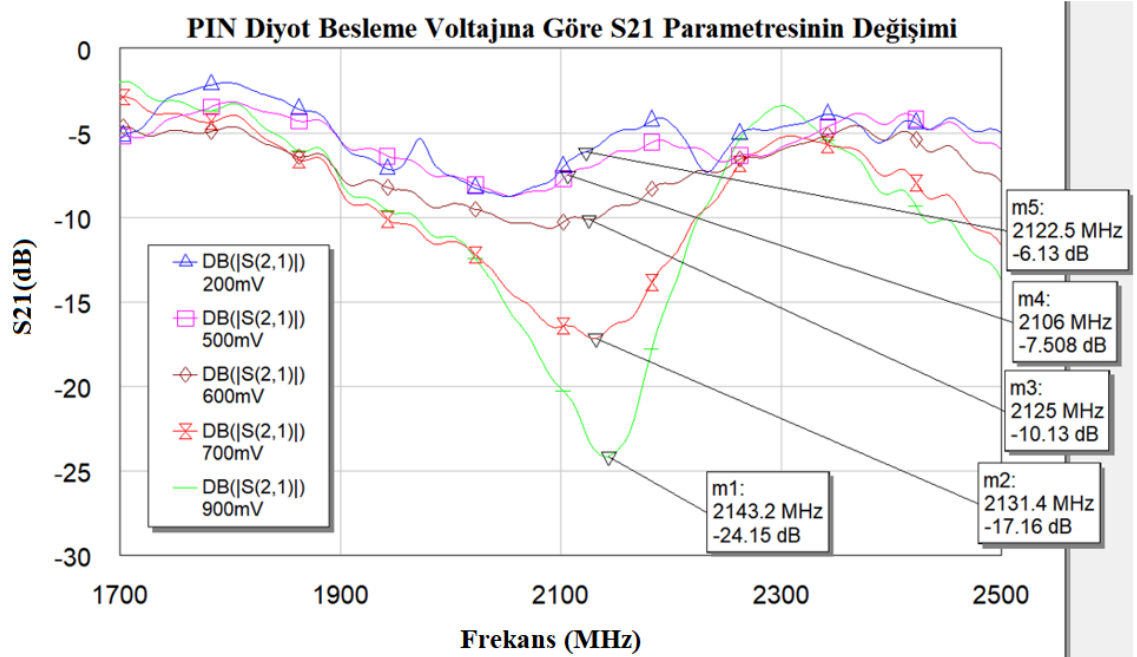
Şekil 3.6 Tasarım I, TE ve TM modunda ANSYS benzetim sonuçları



Şekil 3.7 Tasarım I, üretilmiş hali. (Siyah ve beyaz kablolar besleme hatları içindir.)



Şekil 3.8 Tasarım I, Dalga kılavuzu ile ölçümü

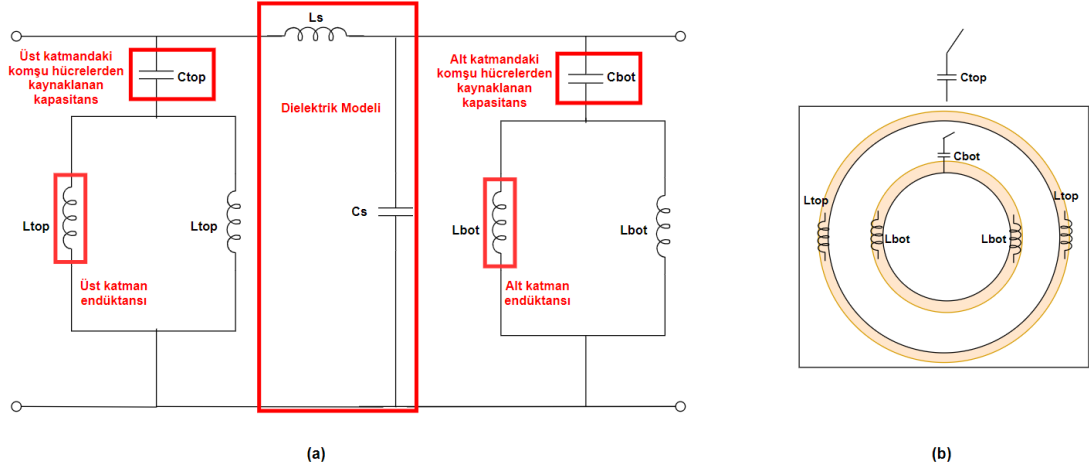


Şekil 3.9 Tasarım I, Üretimin ölçüm sonuçları

3.2. Tasarım II

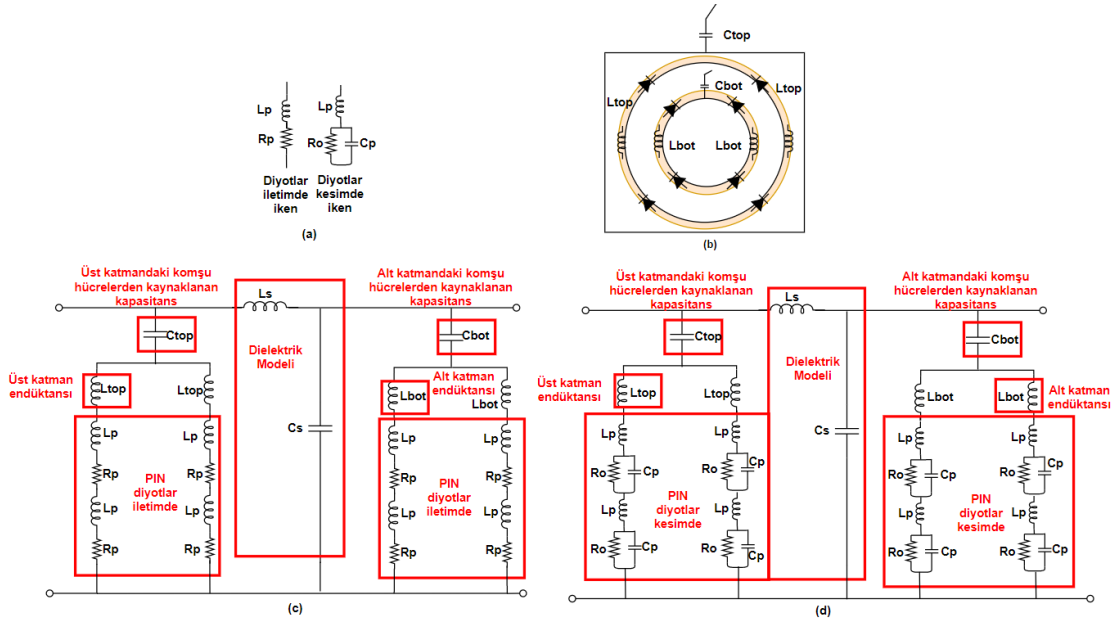
Bu tasarımda, 1.6 mm kalınlığında FR-4 dielektrik malzeme üzerine 2.3 – 2.9 GHz ve 5.4 – 6.2 GHz bantlarında çalışan ve S-parametresi ayarlanabilen bir FSY tasarlanmıştır. Bu frekans aralıklarının seçilmesinin sebebi bu aralıklarda 5G ve lisanssız kullanım için uygun olmasıdır. Tasarım sürecinde öncelikle birim hücre yapısına karar verilmiştir. Bir önceki tasarımdan farklı olarak bu tasarım üst ve alt olmak üzere iki katmandan oluşmaktadır. Tasarım sürecinde öncelikle diyot ve besleme ağı olmadan birim elemanın eşdeğer devre modeli oluşturulmuş ve eşdeğer devre modeli üzerindeki eleman değerleri istenilen rezonans frekansına göre hesaplanmıştır. Daha sonra PIN diyotun devre modeli, iletim ve kesim durumları için eşdeğer devre modeline entegre edilmiştir. Birim elemanın sentezinden sonra FSY katmanı ANSYS elektromanyetik (EM) analiz aracı ile analiz edilmiştir. Analizden sonra PIN diyotlar için besleme ağı da FSY yapısına entegre edilmiştir. Elektromanyetik analiz yinelemeleriyle birlikte, FSY tasarımı son haline ulaşmıştır.

PIN diyot olmadan FSY yapısının için eşdeğer devre modeli aşağıdaki Şekil 3.10'da, PIN diyot entegre edilmiş FSY yapısı için eşdeğer devre modeli de Şekil 3.11'de önerilmiştir. Üst katman ve alt katmandaki dairenin komşu hücre arasındaki kapasitif etkileri C_{top} ve C_{bot} olarak modellenmiştir. Üst katman ve alt katmandaki yarı endüktanslar L_{top} ve L_{bot} olarak modellenmiştir. Dielektrik malzeme endüktansı L_s ve kapasitansı C_s ile modellenmiştir. PIN diyotun iletimde ve kesimde iken eşdeğer modeli bir önceki tasarımda belirtildiği şekildedir. Bu çalışmada kullanılan PIN diyotu eşdeğer devre modeli değerleri için SMP1302-079LF referans alınmıştır. PIN diyotlarının açık ve kapalı durumdaki endüktans değeri 0,7 nH civarındadır. Direnç, diyotlar iletimde iken yaklaşık 3 ohm, diyotlar kesimde iken yaklaşık 700 ohm ve diyotlar kesimde iken kapasitans 0.3 pF civarındadır. FSY, alt ve üst olmak üzere iki katmandan oluşmaktadır. Üst katman 2.38 GHz frekansında, alt katman ise 5.74 GHz frekansında rezonansa girer [27].



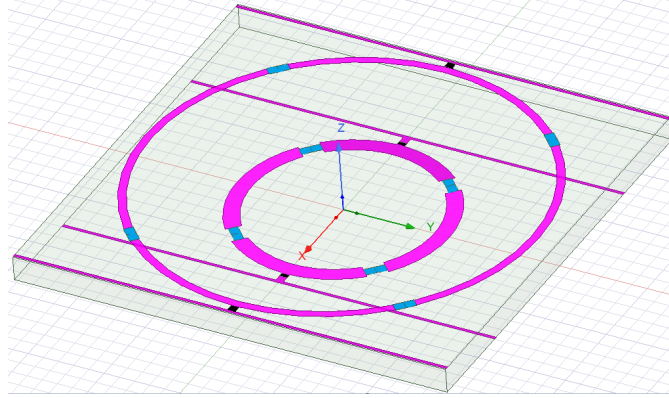
Şekil 3.10 Tasarım II, PIN diyotsuz EDM. (a) EDM. (b) Kuşbakışı gösterimi

L_{top} ve L_{bot} değerinin hesaplanması için (2.2) denkleminde faydalanılmıştır. Bu denklemde D_i dış ve iç dairenin çevresinin yarısıdır w ise dairelerin kalınlığıdır. C_{top} ve C_{bot} değerlerinin hesaplanması için (2.1) denkleminde faydalanılmıştır. Bu denklemde D_c , FSY genişliğidir, s ise birim hücreler arasındaki mesafedir. Burada üst katmanda birim hücreler arasındaki mesafe 2.5 mm'dir ve alt katmanda birim hücreler arası mesafe 14.5 mm'dir ve FSY boyutları 28.5 mm x 27.56 mm'dir. L_s ve C_s değerleri hesaplanması için (2.3) ve (2.4) denklemlerinden faydalanılmıştır. Burada dielektrik malzeme olarak FR-4 kullanılmıştır ve bağıl dielektrik sabiti 4.4 olarak kullanılmıştır. Dielektrik malzeme kalınlığı ise 1.6 mm'dir. İstenilen frekans cevabını elde etmek için üst katmandaki çemberin dış ve iç yarıçapları ile alt katmandaki çemberin dış ve iç yarıçapları sırasıyla 13 mm, 12 mm, 7 mm ve 6 mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.10'daki eşdeğer devre eleman değerleri $C_{top} = 0.55$ pF, $C_{bot} = 0.1$ pF, $L_{top} = 7$ nH, $L_{bot} = 6$ nH, $L_s = 2$ nH ve $C_s = 62$ fF olarak bulunmuştur. Bir sonraki aşama olarak PIN diyotların iletim ve kesimde iken eşdeğer devre modelleri PIN diyotsuz devre modeline entegre edilmiştir. Bu modeller Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

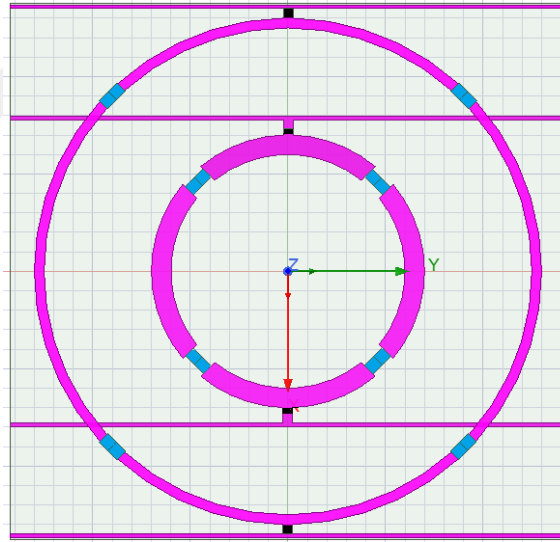


Şekil 3.11 Tasarım II, PIN diyot entegre edilmiş EDM. (a) PIN diyot kesimde ve iletimde iken EDM. (b) PIN diyotlu kuşbakışı FSY. (c) PIN diyot iletimde iken EDM. (d) PIN diyot kesimde iken EDM

Tasarımda kullanılan diyotlar için $L_p = 0.7nH$, $R_p = 3\Omega$, $R_o = 700\Omega$, $C_p = 0.3pF$ dır. [27]. Tasarım aşamasında bir sonraki adım olarak, PIN diyotların iletimde ve kesimde oldukları modeller FSY yapısına entegre edilmiş ve ardından diyotlar için besleme yapısı oluşturulmuştur. FSY yapısına eklenen besleme ağının FSY'nin polarizasyona karşı olan duyarlılığını en az düzeye indirmek için besleme yapılarında üst katman için 24nH ve alt katman için 6 nH değerinde endüktör kullanılmıştır. Şekil 3.12'de mavi ile işaretlenen bölgeler PIN diyotları, siyah ile işaretlenen bölgeler ise besleme endüktörlerini belirtir. Alt ve üst katmanda yatay uzanan çizgiler besleme ağını oluşturur. Şekil 3.13'de tepeden görüntüsü verilmiştir.



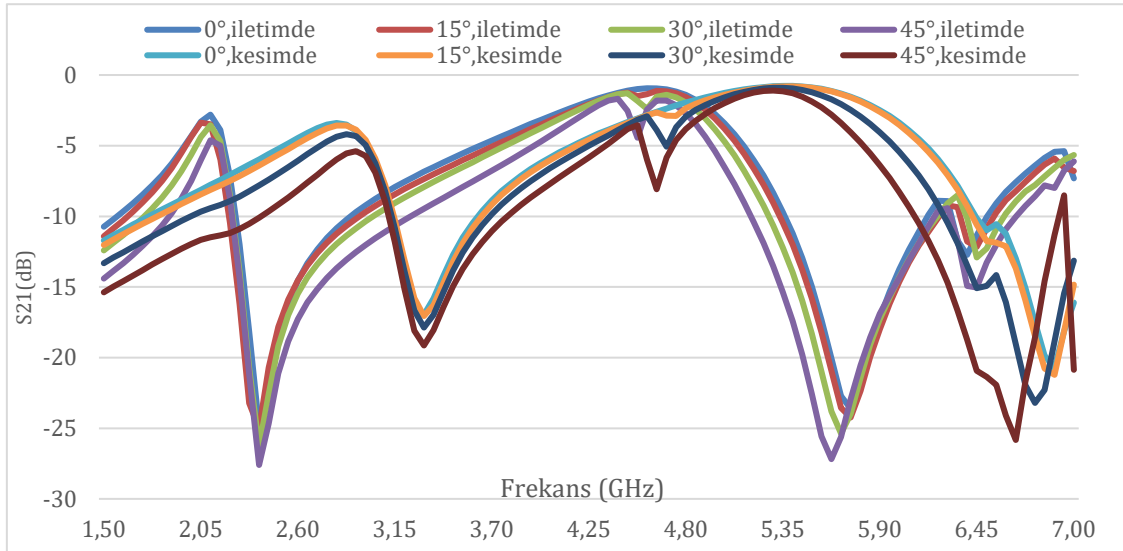
Şekil 3.12 Tasarım II, perspektif görüntüsü



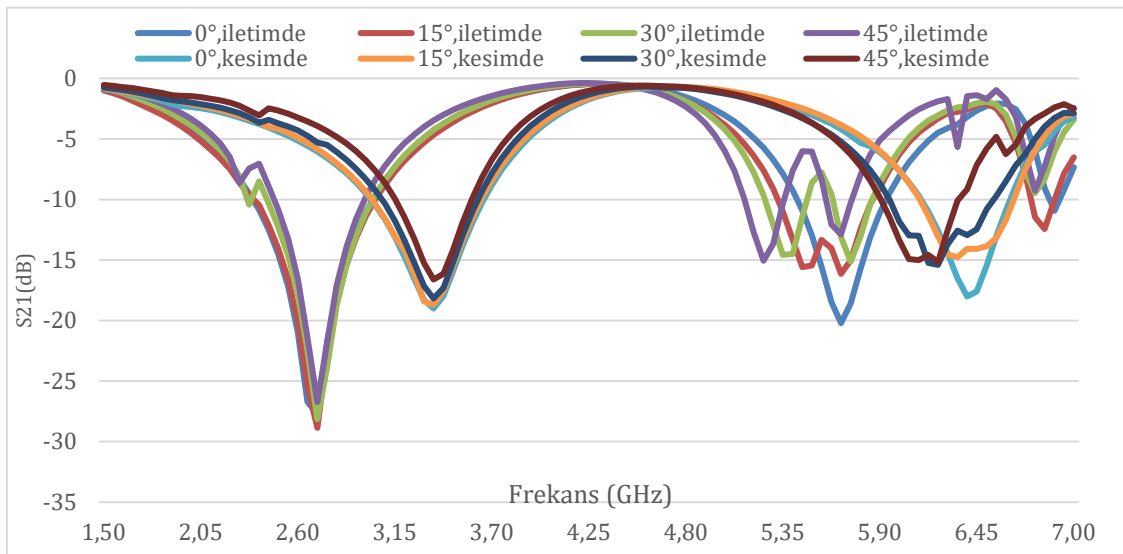
Şekil 3.13 Tasarım II, tepeden görüntüsü

3.2.1. Tasarım II, Benzetim Sonuçları

Şekil 3.14’de ve Şekil 3.15’de ANSYS ortamında yapılan tasarımın PIN diyotlar iletim ve kesim halinde iken 45 dereceye kadar geliş açısı için TE ve TM modunda benzetim sonuçları verilmiştir. Bu şekilde görülebileceği gibi PIN diyotlar iletimde iken dip yapan rezonans frekansları, PIN diyotlar kesime girdiklerinde ilettime geçmişlerdir.

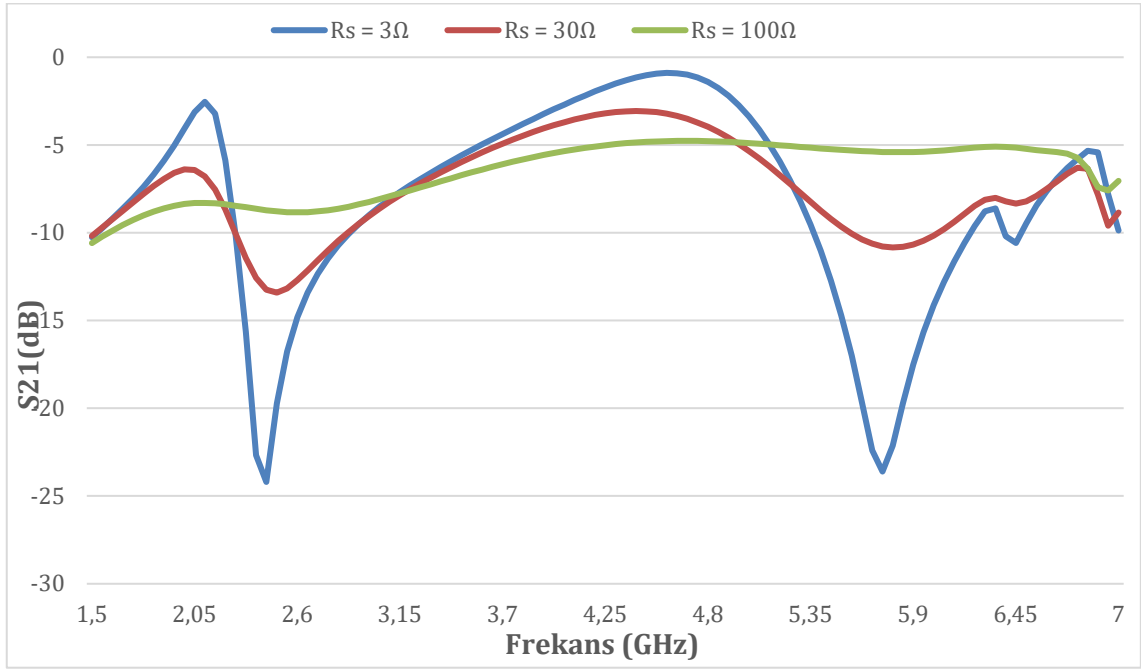


Şekil 3.14 Tasarım II, PIN diyotlar iletimde ve kesimde iken $\theta=[0^{\circ}-45^{\circ}]$ için FSY cevabı, TE modu

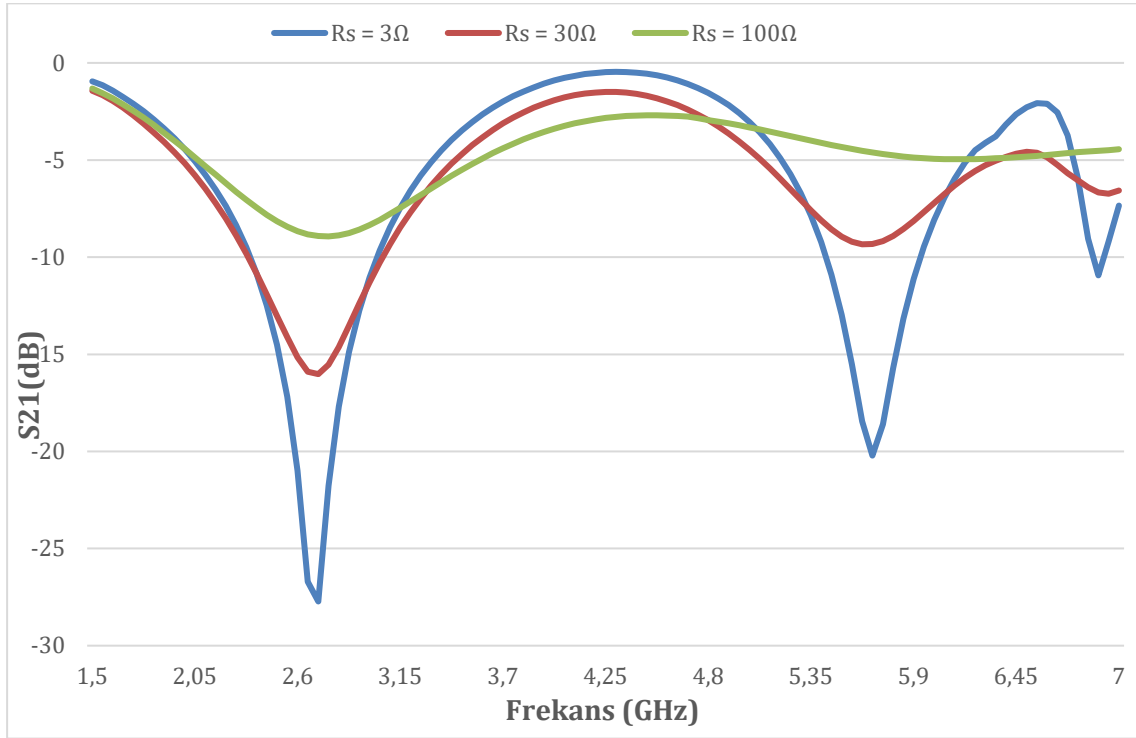


Şekil 3.15 Tasarım II, PIN diyotlar iletimde ve kesimde iken $\theta=[0^{\circ}-45^{\circ}]$ için FSY cevabı, TM modu

Şekil 3.16’da tüm PIN diyotlar iletimde iken sahip oldukları seri direnç değerleri 3Ω , 30Ω ve 100Ω iken TE modunda 0° geliş açısı için S_{21} parametresi gösterilmiştir. Şekil 3.17’de ise aynı durumların TM modunda cevapları verilmiştir. Buradan da görülebileceği gibi her iki frekans bandını kontrol eden PIN diyotların aynı anda kontrolü ile farklı bantlar üzerinde aynı anda iletim katsayısı değiştirilebilir.

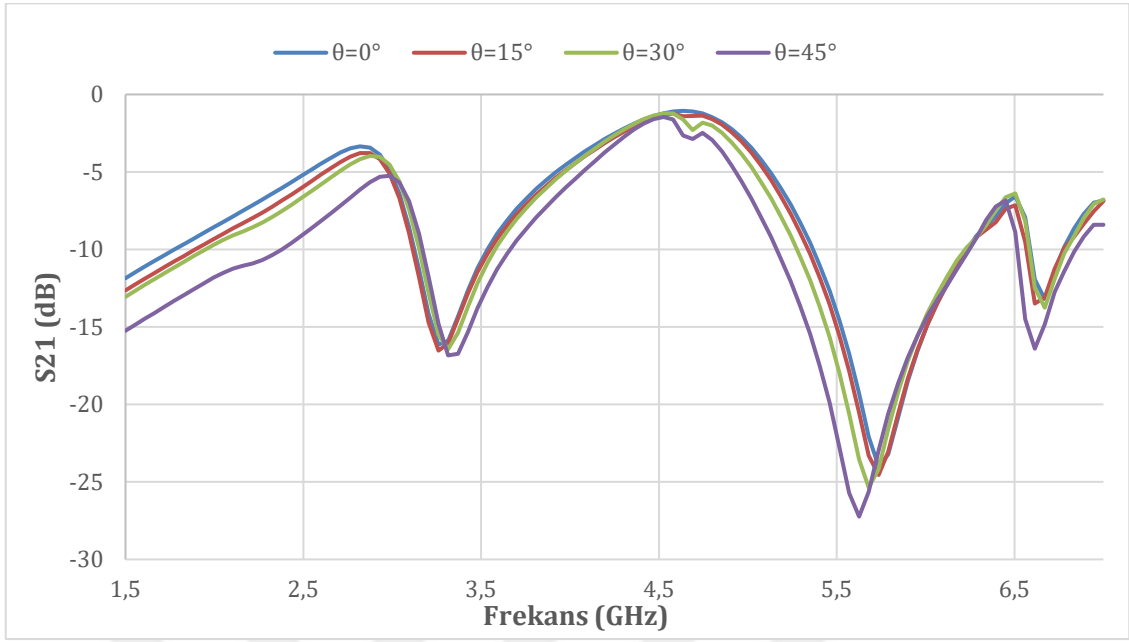


Şekil 3.16 Tasarım II, farklı R_s değerleri için TE modunda S_{21} parametre değişimi

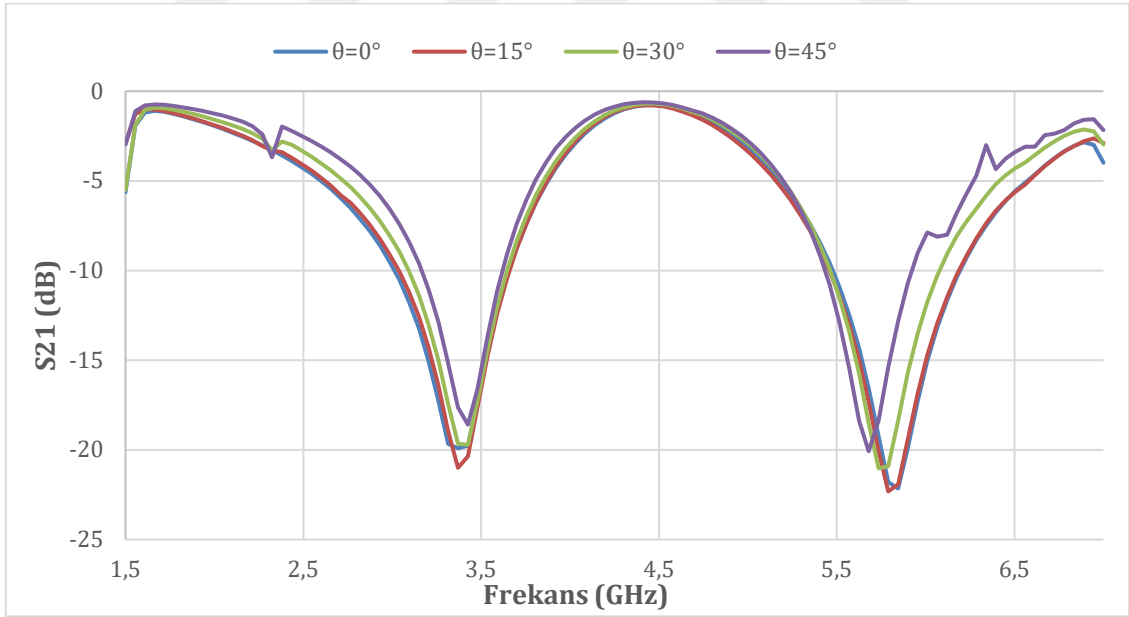


Şekil 3.17 Tasarım II, farklı R_s değerleri için TM modunda S_{21} parametre değişimi

Şekil 3.18’de 2.3 – 2.9 GHz bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde iken ve 5.4 – 6.2 GHz bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde iken $\theta=[0^\circ-45^\circ]$ geliş açısında FSY cevabı TE modu verilmiştir. Şekil 3.19’de ise TM modu için FSY cevabı verilmiştir.

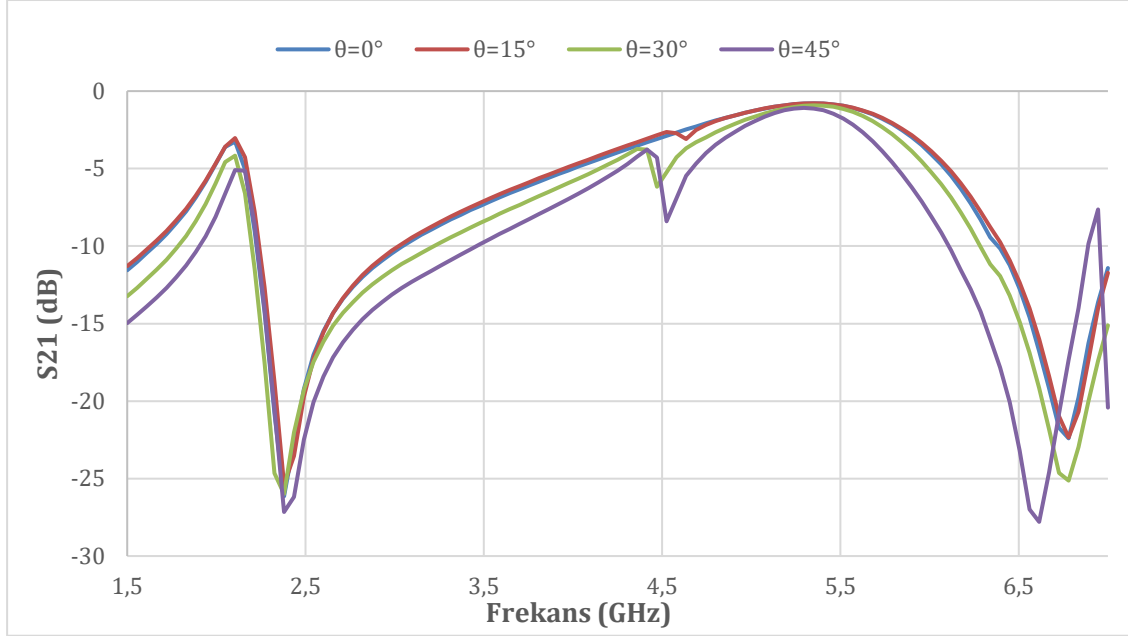


Şekil 3.18 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde iken, TE Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$

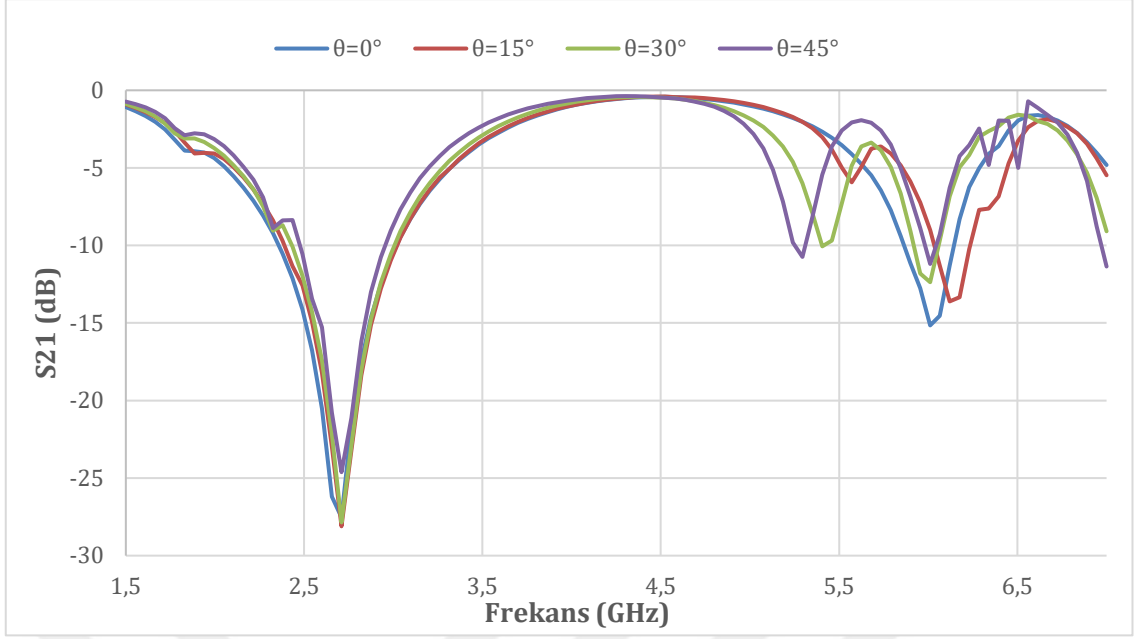


Şekil 3.19 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde iken, TM Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$

Şekil 3.20’de 2.3 – 2.9 GHz bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde iken ve 5.4 – 6.2 GHz bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde iken $\theta=[0^\circ-45^\circ]$ geliş açısında FSY cevabı TE modu verilmiştir. Şekil 3.21’de ise TM modu için FSY cevabı verilmiştir.

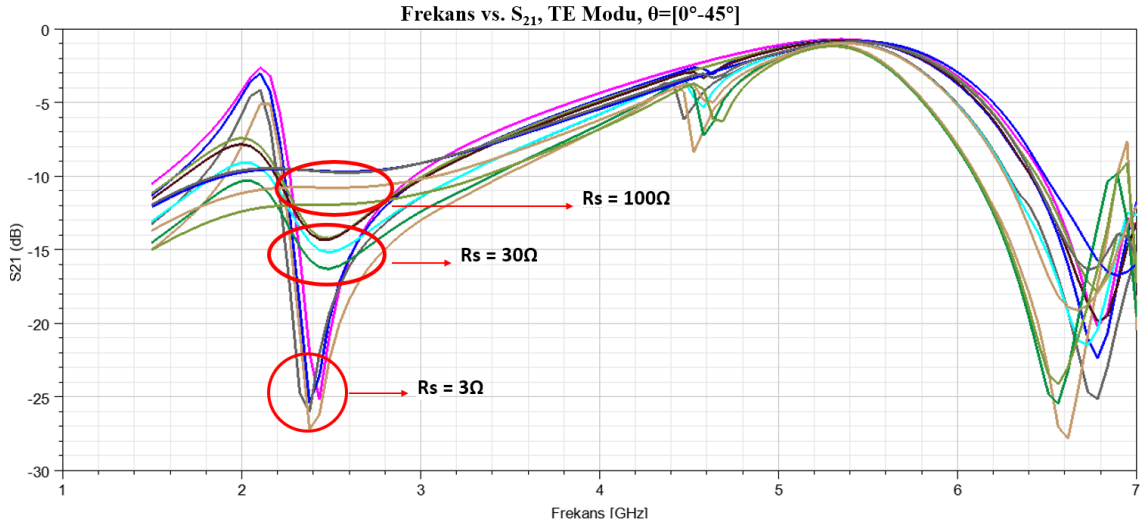


Şekil 3.20 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde iken, TE Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$

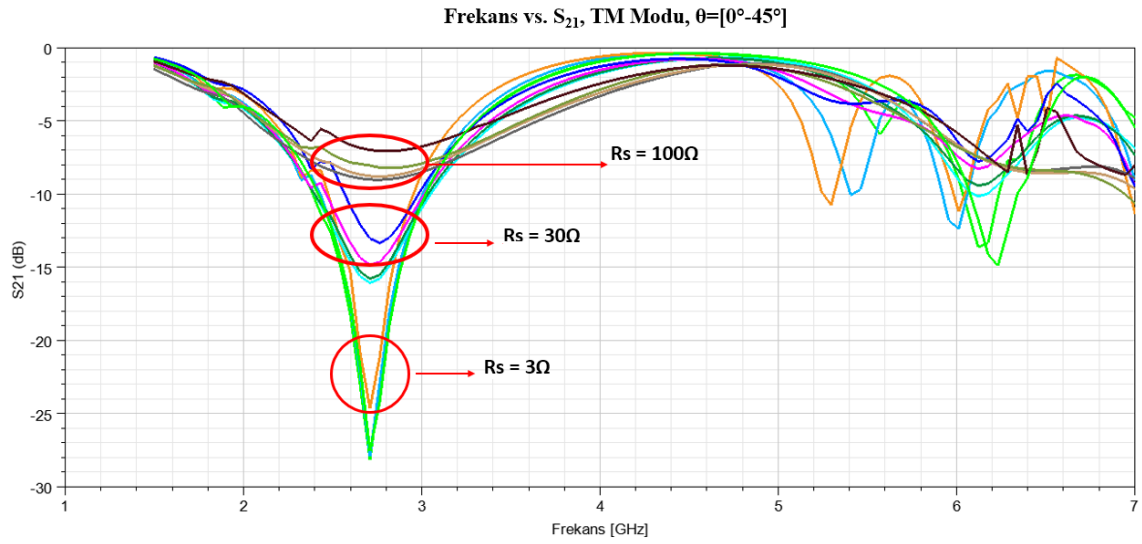


Şekil 3.21 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde iken, TM Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$

Şekil 3.22’de 5.4 – 6.2 GHz bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde iken ve 2.3 – 2.9 GHz bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde iken farklı direnç değerleri için $\theta=[0^\circ-45^\circ]$ geliş açısında TE modunda FSY cevabı verilmiştir. Şekil 3.23’de ise TM modu için bu durumun FSY cevabı verilmiştir.

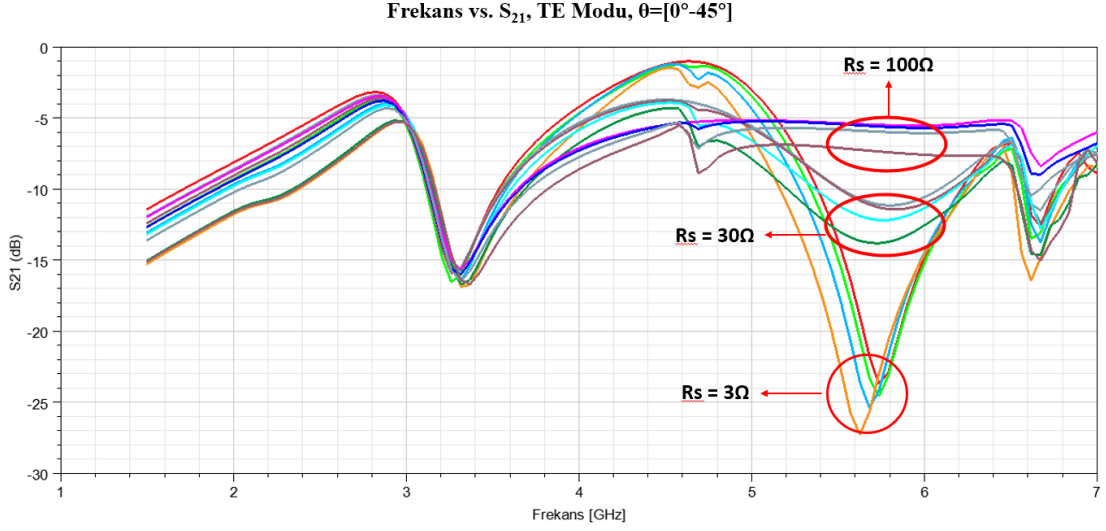


Şekil 3.22 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde ve alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotların iletimdeki dirençleri farklı iken, TE Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$

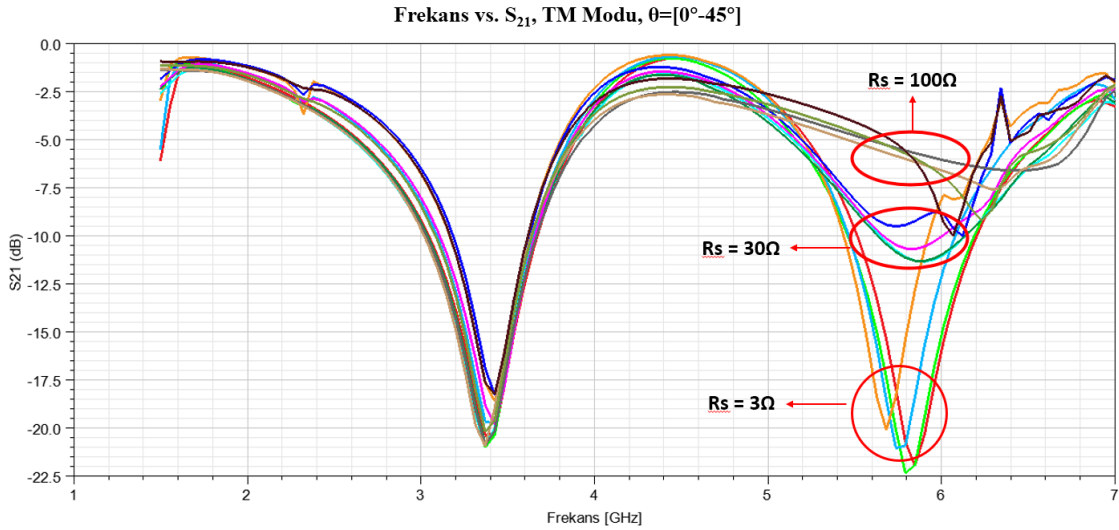


Şekil 3.23 Tasarım II, üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde ve alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotların iletimdeki dirençleri farklı iken, TM Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$

Şekil 3.24’de 2.3 – 2.9 GHz bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde iken ve $\theta=[0^\circ-45^\circ]$ geliş açısında 5.4 – 6.2 GHz bandını kontrol eden PIN diyotlar iletimde iken farklı direnç değerleri için FSY cevabı TE modu için verilmiştir. Şekil 3.25’de ise TM modu için bu durumun FSY cevabı verilmiştir.



Şekil 3.24 Tasarım II, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde ve üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotların iletimdeki dirençleri farklı iken, TE Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$



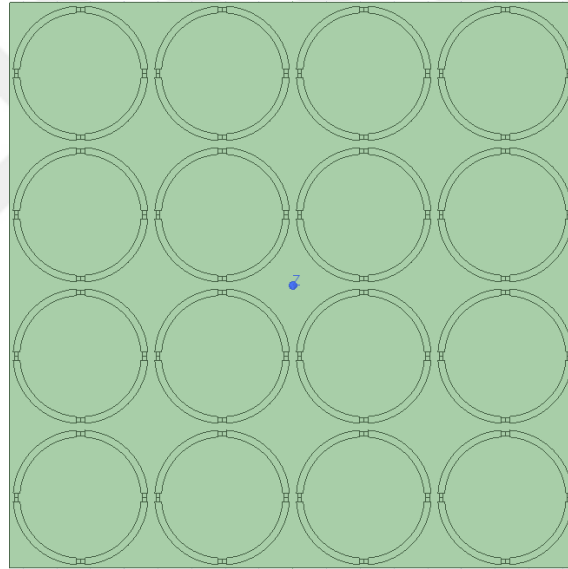
Şekil 3.25 Tasarım II, alt frekans bandını kontrol eden PIN diyotlar kesimde ve üst frekans bandını kontrol eden PIN diyotların iletimdeki dirençleri farklı iken, TM Modu, $\theta=[0^\circ-45^\circ]$

Şekil 3.16'dan Şekil 3.25'e kadarki şekiller incelendiğinde görülebileceği gibi 2.3 – 2.9 GHz ve 5.4 – 6.2 GHz bantları birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. 5.4 – 6.2 GHz bandı yansıtırken veya iletimde iken 2.3 – 2.9 GHz bandı iletim ve yansıtma özellikleri arasında geçiş yapabilir ve S_{21} parametresi ayarlanabilir. Bu durumun

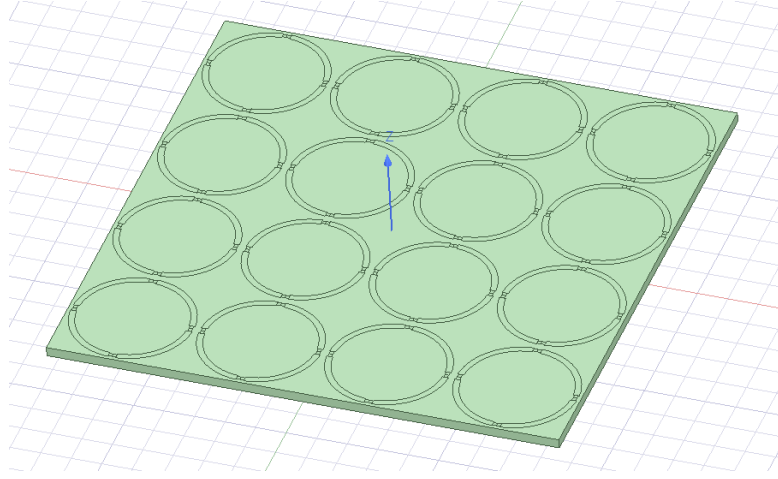
tam tersi durum da geçerlidir. 2.3 – 2.9 GHz bandı yansıtırken veya iletimde iken 5.4 – 6.2 GHz bandı iletim ve yansıtma özellikleri arasında geçiş yapabilir ve S_{21} parametresi ayarlanabilir. Öte taraftan her iki bant aynı anda iletim ve yansıtma özellikleri arasında da geçiş yapabilirler.

3.3. Tasarım III

Bu tasarımda farklı PIN diyot konfigürasyonlarının frekans seçici yüzeyin yansıttığı veya ilettiği ışına olan etkisi incelenmiştir. PIN diyot entegre edilmiş 16 adet dairesel yapıdan oluşan birim hücresi 84 mm x 84 mm boyutlarında 1.6 mm kalınlığında FR-4 üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 3.26’da ve Şekil 3.27’de üstten ve perspektif görüntüsü verilmiştir.



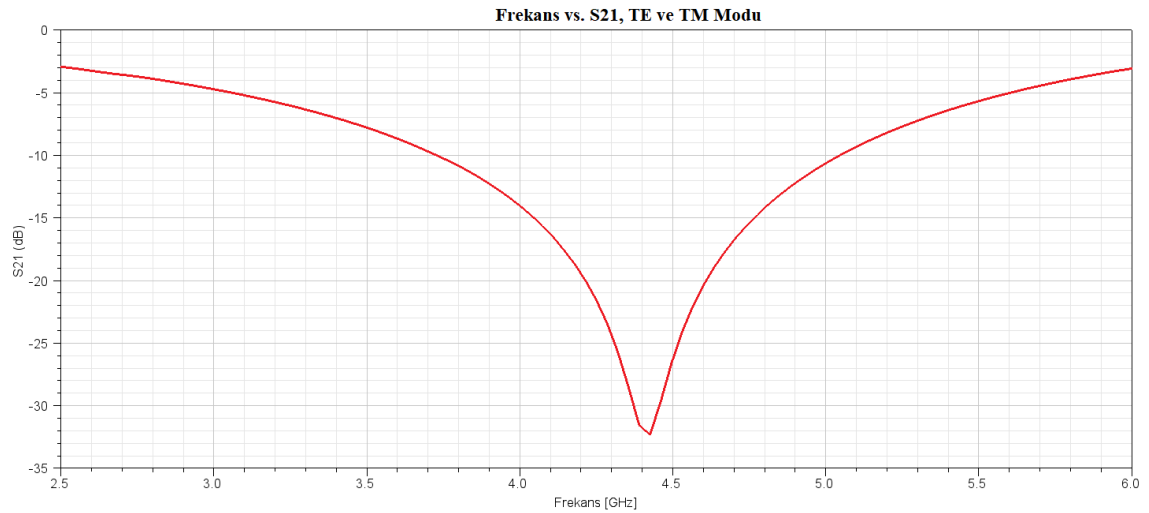
Şekil 3.26 Tasarım III üstten görünüm



Şekil 3.27 Tasarım III perspektif görüntüsü

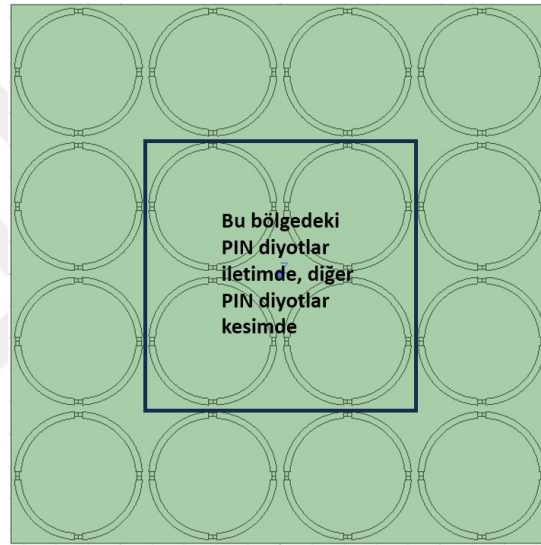
Birim hücre içerisindeki dairelerin dış çapı 20mm, iç çapları ise 19mm'dir. Daireler arasındaki mesafe 1mm'dir. Referans noktası olması için tüm PIN diyotlar iletimde iken FSY cevabı incelenmiştir. Bu durumda Şekil 3.28'de gösterildiği gibi 4.4 GHz frekansı rezonans frekansıdır. Tüm PIN diyot konfigürasyonlarında referans olarak 4.4 GHz frekansı için FSY'nin yansıttığı veya ilettiği ışın şekli incelenmiştir. EM dalga tepeden açısız gelecek şekilde gönderilmiştir.

3.3.1. Tasarım III, Benzetim Sonuçları

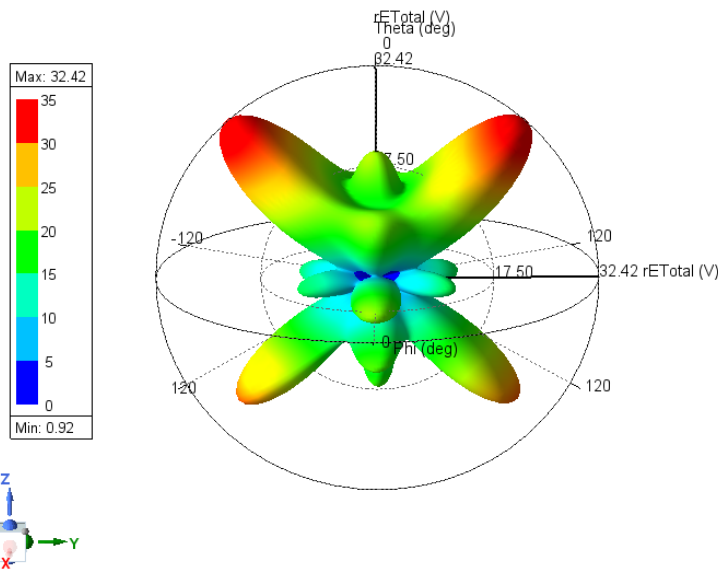


Şekil 3.28 Tasarım III, PIN diyotlar iletimde iken TE ve TM modu için frekans cevabı

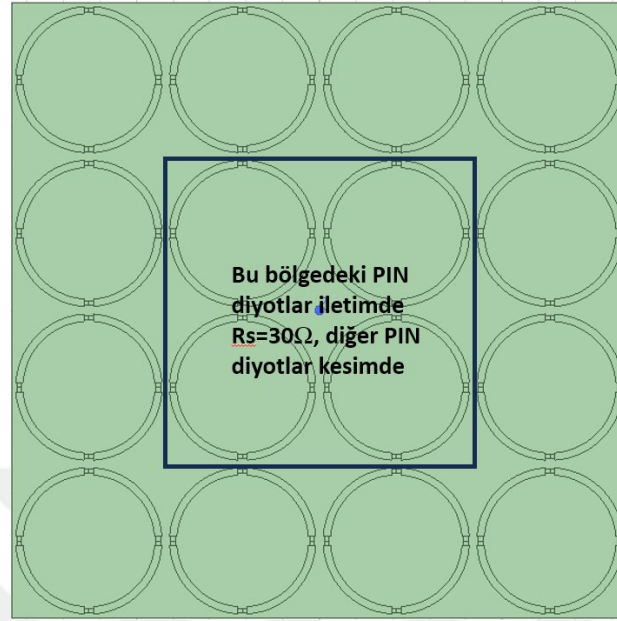
Şekil 3.29’da ortada bölgede bulunan PIN diyotlar iletimde iken diğer PIN diyotlar kesimdedir. Bu konfigürasyonun yansıtıcılığı Şekil 3.30’da gösterildiği gibidir. Şekil 3.31’de orta bölgede bulunan PIN diyotlar iletimde ve iletimde iken seri dirençleri 30Ω olarak modellenmiştir. Diğer PIN diyotlar kesimdedir. Bu konfigürasyonun yansıtıcılığı Şekil 3.32’de gösterildiği gibidir. Şekil 3.33’de ise orta bölgede bulunan PIN diyotlar kesimdedir ve diğer PIN diyotlar iletimdedir. Bu konfigürasyonun yansıtıcılığı Şekil 3.34’de gösterilmiştir. PIN diyotlarının açık ve kapalı durumdaki endüktans değeri $0,6\text{ nH}$ olarak alınmıştır. Direnç, diyotlar iletimde iken 3Ω , diyotlar kesimde iken 3000Ω ve diyotlar kesimde iken kapasitans 0.3 pF olarak alınmıştır.



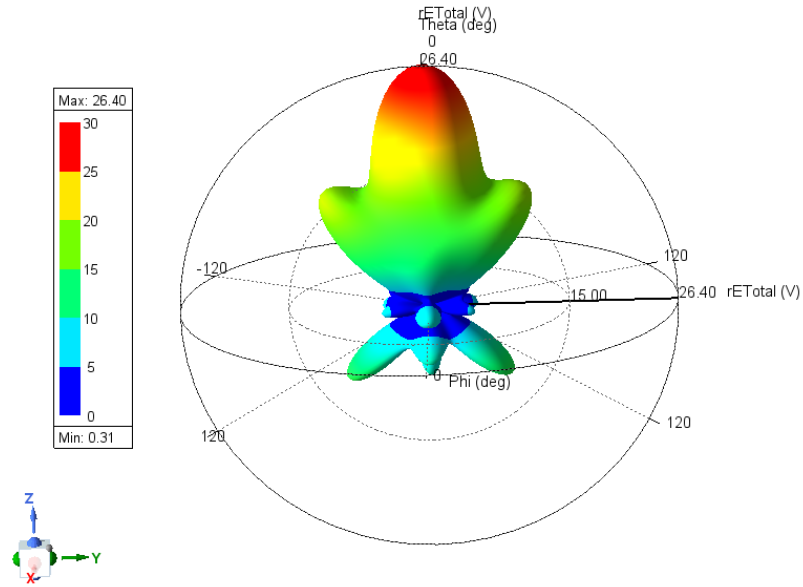
Şekil 3.29 Birinci konfigürasyon



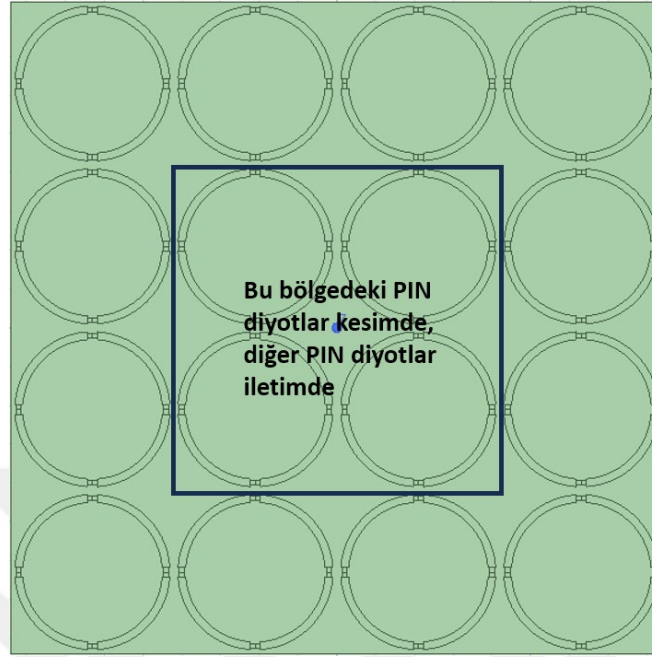
Şekil 3.30 Birinci konfigürasyon toplam yayılan elektrik alan



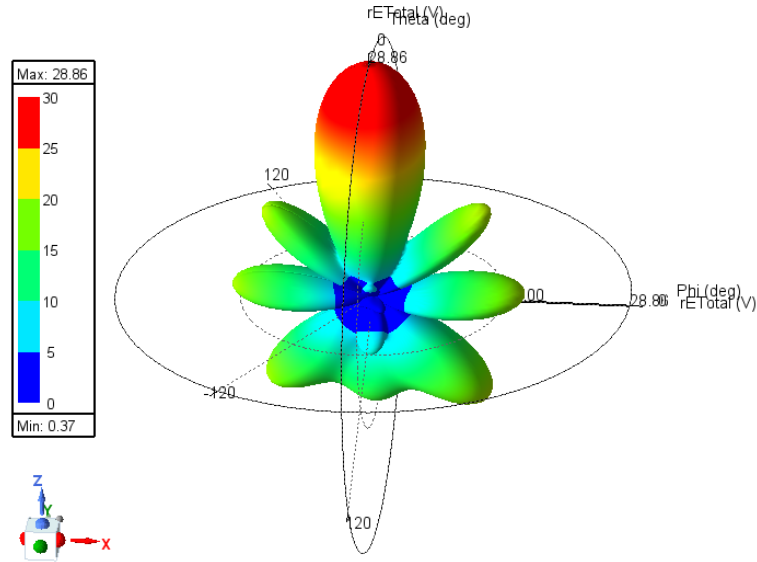
Şekil 3.31 İkinci konfigürasyon



Şekil 3.32 İkinci konfigürasyon toplam yayılan elektrik alan



Şekil 3.33 Üçüncü konfigürasyon



Şekil 3.34 Üçüncü konfigürasyon toplam yayılan elektrik alan

Şekil 3.30, Şekil 3.32 ve Şekil 3.34'den görülebileceği gibi farklı PIN diyot konfigürasyonları kullanılarak hedeflenen frekans için hüzme yönlendirme ve şekillendirme işlemleri yapılabilir. Her bir birim elemandaki veya belli bir gruptaki PIN diyotları kontrol edebilmek için kompleks besleme ağlarına ihtiyaç vardır. Bu besleme ağlarının entegre edildiği FSY, Tasarım III kapsamında değildir. Tasarım III ile amaçlanan hüzme şekillendirme, yönlendirme işlemlerinin aktif frekans seçici yüzeyler ile yapılabileceğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu tez çalışması kapsamında üç farklı tasarım sunulmuştur. Her üç tasarımda da 1.6 mm yüksekliğinde FR-4 dielektrik malzeme kullanılmıştır. Birinci ve ikinci tasarımların tasarım sürecinde öncelikle birim hücre yapısına karar verilmiştir. Ardından PIN diyotsuz birim elemanın eşdeğer devre modeli çıkartılmış ve istenen rezonans frekansını elde etmek için toplu elemanların değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra PIN diyotun devre modeli, açık ve kapalı durumları için eşdeğer devre modeline entegre edilmiştir. ANSYS benzetim ortamında birim hücre oluşturulmuş ve PIN diyotların iletim ve kesimde iken eşdeğer devre modelleri birim hücreye entegre edilmiştir. Ardından eğer gerekiyorsa besleme ağı eklenmiş ve birim elemanın sentezinden sonra FSY birim hücresi, benzetim yinelemeleriyle son halini almıştır.

Tezde verilen ilk tasarımda (Tasarım I) tasarlanan FSY, 2.1 – 2.2 GHz aralığında geçirgenlik ve yansıtma modları arasında geçiş yapabilir. PIN diyotların besleme voltajının değiştirilmesi ile S_{21} parametresi yaklaşık 20 dB kadar değiştirilebilir. Tasarım I için üretim ve ölçüm yapılmıştır. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları yakınlık göstermiştir. Benzetim sonuçlarına göre Tasarım I, 60° geliş açısına kadar kararlılık göstermiştir. Birim hücre boyutları 54.61 mm x 54.61 mm'dir.

İkinci tasarımda (Tasarım II) 2.3 – 2.9 GHz ve 5.4 – 6.2 GHz bantlarında çalışan bir FSY sunulmuştur. FSY, bu bantlarda geçirgenlik ve yansıtma modları arasında geçiş yapabilen bir yapıya sahiptir. Bu tasarımda, ilk ve üçüncü tasarımdan farklı olarak PIN diyotlar için bir besleme ağı da önerilmiştir. Bu tasarım, 2.7 - 3.0 GHz bandı için 30°, 5.4 – 5.8 GHz bandı için 45° geliş açısına kararlılık gösterir.

Bu tasarımı farklı modlarda kullanmak mümkündür. Aynı anda hem alt frekans bandı hem de üst frekans bandı için geçirgen veya yansıtma modunda kullanılabilir. Alt frekans bandı geçirgenlik modunda iken üst frekans bandı geçirgenlik/yansıtma modları arasında kullanılabilir ve yansıtma şiddeti ayarlanabilir. Üst frekans bandı geçirgenlik modunda iken alt frekans bandı geçirgenlik/yansıtma modları arasında kullanılabilir ve yansıtma şiddeti ayarlanabilir. Birim hücre boyutları 28.5 mm x 27.56 mm'dir

Üçüncü tasarımda (Tasarım III) birim hücre 4 satır ve 4 sütundan oluşan toplam 16 dairesel yapı içerir. Birim hücrenin boyutu 84 mm x 84 mm'dir. Bu tasarımda PIN diyotların FSY üzerinden yayılan toplam elektrik alan üzerine olan etkisi incelenmiştir. Bunun için PIN diyotlar farklı konfigürasyonlarda ayarlanmıştır ve bunların FSY'nin yansıttığı veya ilettiği hüzmeler üzerine etkili olabileceği ve hüzmeye yönlendirme ve şekillendirme konularında kullanılabileceğini göstermek amaçlanmıştır. Aktif frekans seçici yüzeyler kullanılarak hüzmeye yönlendirme ve şekillendirme konularının gelecek çalışması olarak çalışılması planlanmaktadır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Ben A. Munk, Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, 2000.
- [2] Unal, E., Gokcen, A., & Kutlu, Y. (2006). Effective electromagnetic shielding. *IEEE Microwave Magazine*, 7(4), 48–54.
- [3] Farooq, U., Iftikhar, A., Shafique, M. F., Khan, M. S., Fida, A., Mughal, M. J., & Anagnostou, D. E. (2021). C-Band and X-Band Switchable Frequency-Selective Surface. *Electronics*, 10(4), 476.
- [4] Sen, G., Mandal, T., Majumdar, S., Mahato, S., Mondal, S., & Sarkar, P. P. (2012). Design of a wide band Frequency Selective Surface (FSS) for multiband operation of reflector antenna. *2012 5th International Conference on Computers and Devices for Communication (CODEC)*, 1–3.
- [5] Kiani, G. I., & Hussaini, M. A. (2020). Waveguide ASK Modulator Using Switchable FSS. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 41(12), 1478–1487.
- [6] Tennant, A., & Chambers, B. (2004). Adaptive radar absorbing structure with PIN diode controlled active frequency selective surface. *Smart Materials and Structures*, 13(1), 122–125.
- [7] Harnois, M., Himdi, M., Yong, W. Y., Rahim, S. K. A., Tekkouk, K., & Cheval, N. (2020). An Improved Fabrication Technique for the 3-D Frequency Selective Surface based on Water Transfer Printing Technology. *Scientific Reports*, 10(1), 1714.
- [8] Mamedes, D. F., Gomes Neto, A., Costa e Silva, J., & Bornemann, J. (2018). Design of reconfigurable frequency-selective surfaces including the PIN diode threshold region. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(9), 1483–1486.
- [9] Kiani, G. I., Esselle, K. P., Weily, A. R., & Ford, K. L. (2007). Active frequency selective surface using PIN diodes. *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 4525–4528.
- [10] Ebrahimi, A., Shen, Z., Withayachumnankul, W., Al-Sarawi, S. F., & Abbott, D. (2016). Varactor-Tunable Second-Order Bandpass Frequency-Selective Surface With Embedded Bias Network. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(5), 1672–1680.
- [11] Ghosh, S., & Srivastava, K. V. (2018). Broadband Polarization-Insensitive Tunable Frequency Selective Surface for Wideband Shielding. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60(1), 166–172.
- [12] Anderson, I. (1975). On the Theory of Self-Resonant Grids. *Bell System Technical Journal*, 54(10), 1725–1731.

- [13] Lee, C. K., & Langley, R. J. (1985). Equivalent-circuit models for frequency-selective surfaces at oblique angles of incidence. *IEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation*, 132(6), 395.
- [14] Costa, F., Monorchio, A., & Manara, G. (2014). An overview of equivalent circuit modeling techniques of frequency selective surfaces and metasurface. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 29(12), 960–976.
- [15] Sarabandi, K., & Behdad, N. (2007). A Frequency Selective Surface With Miniaturized Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(5), 1239–1245.
- [16] Shaik, V., & Shambavi, K. (2018). Design of Dodecagon Unit Cell Shape Based Three Layered Frequency Selective Surfaces For X Band Reflection. *Progress In Electromagnetics Research M*, 75, 103–111.
- [17] Xu, Y., & He, M. (2019). Design of Multilayer Frequency-Selective Surfaces by Equivalent Circuit Method and Basic Building Blocks. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019, 1–13.
- [18] Parker, E. A., & Hamdy, S. M. A. (1981). Rings as elements for frequency selective surfaces. *Electronics Letters*, 17(17), 612.
- [19] Hooberman B., Everything you ever wanted to know about Frequency-Selective surface filters but were afraid to ask, 2005.
- [20] Sung H., Frequency Selective Wallpaper for Mitigating Indoor Wireless Interference, Auckland Üniversitesi, Doktora Tezi, 2006.
- [21] Hamdy, S. M. A., & Parker, E. A. (1982). Current distribution on the elements of a square loop frequency selective surface. *Electronics Letters*, 18(14), 624.
- [22] Döken B., Amaca uygun olarak yansıma ve iletim karakteristikleri değiştirilebilen yapısal yüzey malzemesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Doktora Tezi, 2017.
- [23] Kihun Chang, Sang il Kwak, & Young Joong Yoon. (2008). Equivalent circuit modeling of active frequency selective surfaces. *2008 IEEE Radio and Wireless Symposium*, 663–666.
- [24] Chang, T. K., Langley, R. J., & Parker, E. (1993). An active square loop frequency selective surface. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 3(10), 387–388.
- [25] Qi, R., Zhai, H., Yang, D., & Xue, K. (2020). An angular-stable multi-layer reconfigurable frequency selective surface based on varactor with wide tuning range. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(2).

[26] Kocakaya, A., Çakır, G., & Çimen, S. (2019). Açık ve polarizasyondan bağımsız ultra geniş bantlı frekans seçici yüzey tasarımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 287–296.

[27] SMP1302-079LF Skyworks Diode-PIN|Skyworks,. Available at: <https://store.skyworksinc.com/products/detail/smp1302079lf-skyworks-solutions-inc/262130> (Erişim tarihi: **20 Ağustos 2023**)



EKLER

EK 1 – Tezden Türetilmiş Bildiriler

E. Sarıbay, B. Saka, Çift Bantlı ve Çok Modlu Frekans Seçici Yüzey Tasarımı, XI. URSI-TÜRKİYE 2023 Bilimsel Kongresi ve Ulusal Genel Kurul Toplantısı, İstanbul, 31 Ağustos – 2 Eylül 2023, Boğaziçi Üniversitesi, 2023.

