

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FİLTRE KARAKTERİSTİĞİ KLONLAMA TEKNİĞİ İLE
AYARLANABİLİR ÇOK BANDLI MİKRODALGA FİLTRE
TASARIMI**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ALPEREN CENGİZ

DENİZLİ, TEMMUZ - 2023

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



FİLTRE KARAKTERİSTİĞİ KLONLAMA TEKNİĞİ İLE
AYARLANABİLİR ÇOK BANDLI MİKRODALGA FİLTRE
TASARIMI

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ALPEREN CENGİZ

DENİZLİ, TEMMUZ - 2023

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 120E101 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

ALPEREN CENGİZ

ÖZET

**FİLTRE KARAKTERİSTİĞİ KLONLAMA TEKNİĞİ İLE
AYARLANABİLİR ÇOK BANDLI MİKRODALGA FİLTRE TASARIMI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ALPEREN CENGİZ
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. CEYHUN KARPUZ)**

DENİZLİ, TEMMUZ - 2023

Son yıllarda modern kablosuz haberleşme sistemlerinde düşük maliyetli, düşük kayıplı, seçiciliği yüksek ve kompakt boyutlu mikrodalga filtreleme olan ihtiyaç özellikle 5G Teknolojisi kapsamındaki sistemlerde ve IoT uygulamalarında giderek artmaktadır. Çoklu frekanslarda çalışan mikrodalga filtreler kompakt olmaları, eş zamanlı çalışabilmeleri gibi avantajlara sahip olduklarından tek bant filtreler yerine öne çıkmaktadırlar. Ayrıca çok bantlı filtreler, ayarlı bir devre olarak kullanılabilirlikleri için minyatürleştirilmelerde de önemli bir role sahiptir.

Bu çalışmada öncelikli olarak çift modlu ve yan hatlı filtre tasarımları referans alınmış ve yeni tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Çift modlu mikrodalga filtre tasarımında pertürbasyon etkisinin sağlanması ve bu etkiyle dejenere modların uyarımı ile çift mod filtre tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Yan hatlı filtre tasarımında ise yükleme elemanları ile filtre cevabında istenilen frekans aralığında daha düzgün bir geçiş bandı elde edilmek istenmiştir. Bu kapsamda bu tez çalışmasında öncelikli olarak çift modlu ve yan hatlı filtre tasarımları referans alınacak, yeni tasarımlar gerçekleştirilecek ve bir sonraki aşamada ise bu iki tasarım birleştirilerek filtre karakteristiği klonlaması yapılarak ayarlanabilir nitelikte çok bantlı çok modlu mikrodalga filtre tasarımının gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Son aşamada ise bandlar arası izolasyonun arzu edilir seviyelerde ve kontrol edilebilir nitelikte, filtre tasarımlarının düzlemsel yapılarla gerçekleştirilmesi çalışmaları çerçevesinde ayarlanabilir çok bantlı çok modlu mikroşerit filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Yan hatlı filtre, band geçiren filtre, çift-tek mod empedans analizi, çift mod, çift bantlı filtre, çok bantlı.

ABSTRACT

DESIGN OF TUNABLE MULTI-BAND MICROWAVE FILTER WITH FILTER CHARACTERISTICS CLONING TECHNIQUE

MSC THESIS

ALPEREN CENGİZ

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR:PROF. DR. CEYHUN KARPUZ)**

DENİZLİ, JULY 2023

In recent years, the need for low expectation, low loss, high selectivity and compact size microwave filters for modern wireless communication tools has been increasing, especially in systems within the scope of 5G Technology and IoT applications. Multi-frequency mixed filters have advantages such as compact assets and simultaneous operation. In addition, multi-band filters have an important role in miniaturization, as they can be used as a tuned circuit.

These works have been referenced in dual-mode and sideline filter models and new models have been realized. The dual-mode filter design has been studied by providing perturbation limitations in the dual-mode microwave filter design and excitation of degenerate modes with this effect. In the sideline filter design, it is desired to obtain a smoother passband in the desired frequency range in the filter response with the loading elements. In this context, in this thesis study, primarily dual-mode and stub filter designs will be referenced, new designs will be realized, and in the next step, it is aimed to realize an adjustable multi-band multi-mode microwave filter design by combining these two designs by cloning the filter characteristics. In the last stage, electrical multi-band multi-mode microstrip filter design has been carried out within the scope of the desired and controllable quality of the filter designs with planar structures.

KEYWORDS: Stub loaded filter, band pass filter, even-odd mode impedance analysis, dual band filter, multi band.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Özeti.....	3
2. MİKRODALGA FİLTRE TASARIMINDA KULLANILAN	
DÜZLEMSEL YAPILAR.....	10
2.1 Mikroşerit Hatlar.....	11
2.2 Kuplajlı Hatlar	12
2.3 Süreksizlikler	14
3. ÇİFT MODLU BAND GEÇİREN FİLTRE TASARIMI VE	
ANALİZİ.....	15
3.1 Saçılma Parametreleri	15
3.2 Çift-Tek Mod Analizi	16
3.2.1Kare halka rezonatörde çift-tek mod analizi	17
3.2.2Pertürbasyon Elemanına Sahip Kare Halka Rezonatörün Çift	
Tek Mod Empedans Analizi.....	19
3.2.3Pertürbasyon ve Referans Elemanına Sahip Kare Halka	
Rezonatörün Çift Tek Mod Empedans Analizi	24
3.3 Pertürbasyon Elemanı İle Çift Modlu Rezonatör Tasarımlarında	
Bulanık Mantık Uygulamaları.....	30
4. YAT HATLI KARE HALKA REZONATÖR TASARIMI	35
4.1 Kısa Devre Sonlandırılmış Yan Hatlar İle Kare Halka	
Rezonatör Filtre Tasarımı.....	35
4.2 Açık Devre Sonlanmış Yan Hatlar İle Kare Halka Rezonatör	
Filtre Tasarımı	42
5. YAN HATLI REFERANS VE PERTÜRBASYON ELEMANLI	
FİLTRE TASARIMI VE ANALİZİ.....	50
6. KOMPAKT YENİ YAN HAT KONFIGÜRASYONLU ÇOK	
BANDLI BAND GEÇİREN FİLTRE TASARIMI	57
6.1 Önerilen Tasarımda Kullanılan Konfigürasyon Parametrelerinin	
Frekans Cevabı Üzerindeki Etkileri	62
6.2 Deneysel Sonuçlar	66
7. KIVRIMLI BASAMAK TİPİ EMPEDANS REZONATÖRLER	
KULLANILARAK YARI MOD ÜÇ BAND FİLTRE TASARIMI	69
7.1 Tasarım Metodolojisi	69
7.2 Ölçüm Çalışmaları	73
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	75
9. KAYNAKLAR.....	76
10. GEÇMİŞ.....	80

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Mikrodalga filtrelerin sınıflandırılması.	2
Şekil 1.2: (a) İç köşe kesim elemanına sahip çift modlu kare halka rezonatör, (b) İç köşe yama elemanına sahip çift modlu kare halka rezonatör, (c) Dış köşe yama elemanına sahip çift modlu kare halka rezonatör, (d) Üç devrenin simülasyon sonuçları (Görür 2004).	4
Şekil 1.3: (a) Köşe yama elemanlı mikroşerit kare halka rezonatör, (b) Köşe kesim elemanlı mikroşerit kare halka rezonatör (Görür 2004).	5
Şekil 1.4: (a) Açık devre sonlandırmalı yan hat yüklü rezonatörler kullanılması, (b) Kısa devre sonlandırmalı yan hat yüklü rezonatörler kullanılması.	6
Şekil 1.5: (a) Çift modlu çok bantlı band geçiren filtre, (b) Yan hat yapısı.	6
Şekil 1.6: Önerilen filtre yapısının referans verdiği çalışmadaki filtre ile karşılaştırılması.	7
Şekil 1.7: (a) Görür ve Karpuz tarafından tasarlanan filtre (b) frekans cevabı.	8
Şekil 1.8: (a) Dört bandlı band geçiren filtrede kullanılan rezonatör, (b) İmal edilen devrenin fotoğrafı, (c) Simülasyon, ölçüm ve teorik sonuçların karşılaştırılması.	8
Şekil 1.9: (a) Tasarlanan kompakt çift bandlı mikroşerit band geçiren filtre yapısı, (b) Ölçüm sonuçlarıyla simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.	9
Şekil 2.1: Genel mikroşerit yapı.	11
Şekil 2.2: Kuplajlı mikroşerit hattın enine kesiti.	12
Şekil 2.3: (a) Manyetik kuplaj, (b) Elektrik kuplaj.	13
Şekil 3.1: İki kapılı devre modeli.	15
Şekil 3.2: Kare halka rezonatör.	18
Şekil 3.3: Kare halka rezonatörün eşdeğer yarı devre modelleri (a) Çift mod, (b) Tek mod.	18
Şekil 3.4: (a) Pertürbasyon elemanına sahip kare halka rezonatör, (b) Pertürbasyon kapasitesine sahip kare halka rezonatör.	19
Şekil 3.5: Yama elemanının farklı boyutlardaki değişiminin frekans cevabına etkisi.	20
Şekil 3.6 Farklı pertürbasyon kapasite değerleri için frekans cevabı.	20
Şekil 3.7: Pertürbasyon elemanlı kare halka rezonatörde kuplaj değişiminin frekans cevabına etkisi.	21
Şekil 3.8: Pertürbasyon elemanına sahip kare halka rezonatörün eşdeğer yarı devre modelleri (a) Çift mod, (b) Tek mod.	21
Şekil 3.9: Pertürbasyon elemanına sahip kare halka rezonatörün teorik cevabı.	22
Şekil 3.10: Pertürbasyon kapasitesine sahip kare halka rezonatörde, rezonatör boyutlarının ayarlanması.	23
Şekil 3.11: Farklı rezonatör kenar uzunlukları için frekans cevabı.	23

Şekil 3.12: Pertürbasyon elemanının kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3.....	25
Şekil 3.13: Pertürbasyon elemanının rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesinin frekans cevabına etkisi.	25
Şekil 3.14: Köşe kesim pertürbasyonlu kare halka rezonatör.	26
Şekil 3.15: Köşe kesim pertürbasyon elemanının farklı boyutlarda frekans cevabı.....	26
Şekil 3.16: Yama ve referans elemanlı kare halka rezonaör.....	27
Şekil 3.17: Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün frekans cevabı.....	27
Şekil 3.18: Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün eşdeğer yarı devre modelleri (a) Çift mod, (b) Tek mod.....	28
Şekil 3.19: Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün teorik cevabı.	29
Şekil 3.20: Bulanık mantık çalışması için incelenen filtre yapısı.	31
Şekil 3.21: Data hazırlanmasında okunan değerler için bir örnek frekans cevabı.....	32
Şekil 3.22: Uygulanan fuzzy model.	33
Şekil 4.1: Kısa devre sonlandırılmış tek yan hatlı kare halka rezonatör.	36
Şekil 4.2: Kısa devre sonlanmış yan hattın uzunluğunun frekans cevabına etkisi.	36
Şekil 4.3: Kısa devre sonlanmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4.	37
Şekil 4.4: Kısa devre sonlanmış yan hattın rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesinin frekans cevabına etkisi.	37
Şekil 4.5: İki adet kısa devre sonlandırılmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4, (e) Konum 5, (f) Konum 6.	38
Şekil 4.6: İki kısa devre sonlanmış yan hattın ilk üç konum için frekans cevabı.	39
Şekil 4.7: İki kısa devre sonlanmış yan hattın son üç konum için frekans cevabı.	39
Şekil 4.8: Üç adet kısa devre sonlandırılmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4.	40
Şekil 4.9: Üç adet kısa devre sonlanmış yan hattın rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesinin frekans cevabına etkisi.	40
Şekil 4.10: Dört adet kısa devre sonlanmış yan hatlı kare halka rezonatör.	41
Şekil 4.11: Dört adet kısa devre sonlanmış yan hatlı kare halka rezonatör frekans cevabı.....	41
Şekil 4.12: Pertürbasyon elemanlı kısa devre sonlandırılmış yan hatlı kare halka rezonatör.	42
Şekil 4.13: Kısa devre sonlandırılmış yan hatlı kare halka rezonatörde pertürbasyon elemanının etkisi.....	42
Şekil 4.14: Açık devre sonlanmış yan hattın uzunluğunun frekans cevabına etkisi.	43

Şekil 4.15: Açık devre sonlanmış yan hattın uzunluğunun frekans cevabına etkisi.	43
Şekil 4.16: Açık devre sonlanmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4.	44
Şekil 4.17: Açık devre sonlanmış yan hattın rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesinin frekans cevabına etkisi.	44
Şekil 4.18: İki adet açık devre sonlandırılmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4, (e) Konum 5, (f) Konum 6.	45
Şekil 4.19: İki adet açık devre sonlanmış yan hattın ilk üç konum için frekans cevabı.	46
Şekil 4.20: İki adet açık devre sonlanmış yan hattın son üç konum için frekans cevabı.	46
Şekil 4.21: Üç adet açık devre sonlandırılmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4.	47
Şekil 4.22: Üç adet kısa devre sonlanmış yan hattın rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesinin frekans cevabına etkisi.	47
Şekil 4.23: Dört adet açık devre sonlanmış yan hatlı kare halka rezonatör.	48
Şekil 4.24: Dört adet açık devre sonlanmış yan hatlı kare halka rezonatör frekans cevabı.	48
Şekil 4.25: Pertürbasyon elemanlı açık devre sonlandırılmış yan hatlı kare halka rezonatör.	49
Şekil 4.26: Açık devre sonlandırılmış yan hatlı kare halka rezonatörde pertürbasyon elemanının etkisi.	49
Şekil 5.1: Yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatör.	50
Şekil 5.2: Yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün eşdeğer yarı devre modelleri (a) Çift mod, (b) Tek mod.	51
Şekil 5.3: Yan hat yükü kapasite olan filtrenin teorik frekans cevabı.	54
Şekil 5.4: Yan hat yükü bobin olan filtrenin teorik frekans cevabı.	54
Şekil 5.5: Seri yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün farklı C değerleri için teorik frekans cevabı.	55
Şekil 5.6: Seri yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün farklı L değerleri için teorik frekans cevabı.	55
Şekil 5.7: Paralel yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün farklı C değerleri için teorik frekans cevabı.	56
Şekil 5.8: Paralel yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün farklı L değerleri için teorik frekans cevabı.	56
Şekil 6.1: Tasarlanan filtre yapısındaki pertürbasyon elemanlı iç rezonatör.	57

Şekil 6.2: Farklı pertürbasyon boyutları için frekans cevabı.	58
Şekil 6.3: Yeni yan hat konfigürasyonlu kıvrımlı kare halka rezonatör.	58
Şekil 6.4: Yeni yan hat konfigürasyonlu kıvrımlı kare halka rezonatör frekans cevabı.....	59
Şekil 6.5: Yeni yan hat konfigürasyonlu pertürbasyon elemanlı kıvrımlı kare halka rezonatör.	59
Şekil 6.6: Rezonatörün yan hat yapısı ve yan hat parametreleri.	60
Şekil 6.7: İnterdijital parmak uzunluğunun frekans cevabına etkisi.	60
Şekil 6.8: İnterdijital yapıyı iç rezonatöre bağlayan hattın uzunluğunun frekans cevabına etkisi.	61
Şekil 6.9: Tasarlanan kompakt yeni yan hatlı dört band band geçiren filtre yapısı.....	61
Şekil 6.10: a parametresinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi.	62
Şekil 6.11: b parametresinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi.	63
Şekil 6.12: d parametresinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi.	64
Şekil 6.13: da parametresinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi.	64
Şekil 6.14: p parametresinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi.	65
Şekil 6.15: Yeni yan hat konfigürasyonuna sahip kompakt dört band band geçiren rezonatör.	66
Şekil 6.16: Tasarımı verilen filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.	67
Şekil 6.17: İmal edilen çok bandlı filtre.	67
Şekil 6.18: Network Analyzer ile yapılan ölçümler ve örnek bir ölçüm sonucu.....	68
Şekil 7.1: Filtrenin tasarım adımları ve düzeni. a) kısa devre sonlandırılmış basamak tipi empedans rezonatör yapısı b) çift bandlı band geçiren filtre konfigürasyonu c) interdijital yan hat ile yüklenmiş çift bandlı band geçiren filtre konfigürasyonu d) interdijital yan hat ile yüklenmiş üç bandlı band geçiren filtre konfigürasyonu.	70
Şekil 7.2: Toprak düzleme geçiş yollarının kullanılmasının frekans cevabına etkisi.	71
Şekil 7.3: w2 değişimine bağlı olarak elde edilen frekans cevabı.	71
Şekil 7.4: Tasarım adımları için zayıf kuplaj altında elde edilen frekans cevaplarının karşılaştırılması.	72
Şekil 7.5: İnterdijital yapı üzerindeki toprak düzleme geçiş yolları arasındaki mesafenin değişimine bağlı olarak elde edilen frekans cevabı.	73
Şekil 7.6: (a) Üretilen yarı mod üç bandlı band geçiren filtre devresinin fotoğrafı (b) simüle edilen ve ölçülen sonuçların karşılaştırılması.....	74

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Fuzzy model uygulaması için hazırlanan data seti için kesit excel tablosu.....	32
Tablo 3.2: Üç giriş-İki çıkış fuzzy model için üretilen sonuçlar.	33
Tablo 3.3: Hesaplanan hata değerleri.....	34
Tablo 6.1: Simülasyon ve ölçüm sonuçlarının özeti.	67
Tablo 7.1: Üretilen yarı mod üç band filtre devresi boyutları.....	73

SEMBOL LİSTESİ

Z_0	:	Karakteristik empedans
Z_{in}	:	Giriş empedansı
Y_{in}	:	Giriş admitansı
ϵ_r	:	Dielektrik sabiti
λ	:	Dalga boyu
S_{11}	:	Yansıma katsayısı (Geri dönüş kaybı-return loss)
S_{21}	:	İletim katsayısı (Araya girme kaybı-insertion loss)
Z_{even}	:	Çift mod empedansı (Even-mode impedance)
Y_{even}	:	Çift mod admitansı (Even-mode admittance)
Z_{odd}	:	Tek mod empedansı (Odd-mode impedance)
Y_{odd}	:	Tek mod admitansı (Odd-mode admittance)
θ	:	Elektriksel uzunluk
C_s	:	Kuplaj kapasitansı
C_p	:	Pertürbasyon kapasitansı
L	:	Bobin
C	:	Kapasitör
RL	:	Return loss (Geri dönüş kaybı)
IL	:	İnsertion loss (Araya girme kaybı)

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimlerim boyunca benden engin bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarımın her anında yanımda olan ve beni yönlendiren ayrıca paylaştığı değerli hayat görüşleriyle de bana bir hayat gayesi veren tez danışmanım sayın Prof. Dr. Ceyhun KARPUZ'a, yüksek lisans çalışmalarımda her konuda benden yardımını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÖZEK'e, yönlendirmeleriyle ve her türlü sorunumda yardımına koşan değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Pınar ÖZTÜRK ÖZDEMİR ve Doç. Dr. Ali Kürşad GÖRÜR hocalarıma, bu çalışmanın yanında farklı çalışmalarda birlikte çalıştığım Araş. Gör. Gülfem Balasu FIRAT UNUK ve Araş. Gör. Mehmet ÇAKIR'a sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca bu çalışma sürecinde aldığım her kararda maddi, manevi her anlamda bana destek olan ve asla haklarını ödeyemeyeceğim anneme, babama ve canım kardeşime teşekkür ederim.

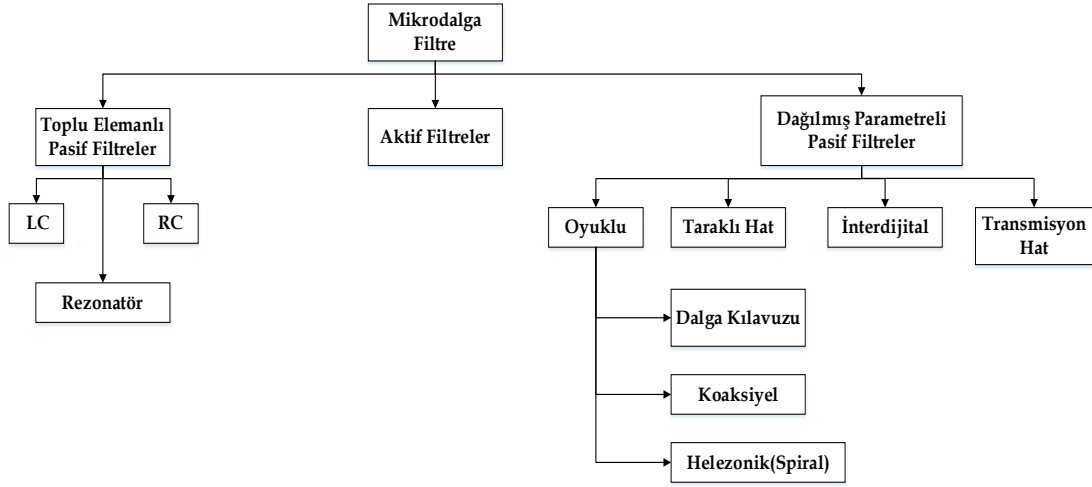
1. GİRİŞ

Mikrodalga, dalga boyları bir milimetre ile bir metre arasında değişen elektromanyetik radyasyon formu; 300 MHz (100 cm) ve 300 GHz (0.1 cm) arasındaki frekansları kapsar. "Mikrodalga" sözü elektromanyetik dalganın dalga boyunun 1 metreden kısa olduğu frekansları tanımlar. Dalga boyunun 1 cm'den kısa olduğu frekanslara (30-300 GHz aralığı) "milimetrik" dalga ismi de verilir. Mikrodalga devre problemlerinin çözümünde veya mikrodalga devrelerin teorik analizinde, yüksek frekans ve küçük dalga boyuna sahip oldukları için doğrudan devre teorisindeki analiz yöntemleri uygulanamaz. Başka bir ifadeyle, mikrodalga frekanslarında devre teorisine ait toplu devre elemanları çözümleri geçerli değildir.

Mikrodalga devrelerde, devrenin fiziksel boyutlarına bağlı olarak devre elemanları gerilim ve akımın fazının önemli derecede değişimine imkân verirler. Bu nedenle, genel devre teorisi çözümleri, elektromanyetik alan teorisi için bir yaklaşım veya özel bir çözümleme sahasıdır. Alan analizi ile devre teorisi arasındaki köprü görevini iletim hattı teorisi (Transmission Line Theory) sağlar. İletim hattı teorisi ile devre teorisi arasındaki en önemli fark ise elektriksel boyuttur. Çünkü devre analizi öngörüsüne göre, bir devrenin fiziksel boyutu elektriksel uzunluk olarak dalga boyundan küçükken, iletim hatları boyut olarak dalga boyunun bir veya birkaç katı oranında olabilir (Pozar, 2014).

Mikrodalga devreler, yüksek frekanslı sinyallerin iletimi, işlenmesi ve alınması için tasarlanır. Genellikle veri iletimi, haberleşme, radar sistemleri, askeri uygulamalar, tıbbi cihazlar, uzay teknolojisi ve endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar. Bu devrelerin tasarımı ve optimizasyonu, mikrodalga teorisi, elektromanyetik alanlar, elektromanyetik dalgalar, filtre tasarımı, anten tasarımı ve konularını içerir. Özellikle radar, elektronik Harp, uydu ve haberleşme sistemlerinde frekans seçiciliği sağlamak, istenmeyen yayın ya da işaretleri filtrelemek için tasarlanan; mikrodalga devre elemanlarından filtreler çalışma prensibi olarak; alçak geçiren filtre, yüksek geçiren filtre, bant geçiren filtre, bant durduran filtre olarak sınıflandırılırlar. Bütünleşik veya dağıtık topolojilerde çok farklı yapılarda tasarlanan

ve geliştirilen filtreleri, tasarım yapıları olarak Şekil 1.1’ de verildiği gibi genel bir sınıflandırma yapmak mümkündür.



Şekil 1.1: Mikrodalga filtrelerin sınıflandırılması.

Toplu devre elemanları alçak frekans devrelerindeki bütün empedans elemanlarını, dağılmış devre elemanları ise yüksek frekanslardaki empedans elemanlarını tasvir etmektedir. Dağılmış devre elemanları iletkenlerin her noktasına dağılmış durumda buldukları için, her yerde aynı etkiyi gösterirler. (Görür, 2011).

Dağılmış devre elemanları ile filtre tasarım yöntemi olan ve bu çalışmada da ağırlıklı olarak kullanılan mikroşerit iletim hatları ve mikroşerit devre elemanları, düşük maliyet, düşük kayıplar, yüksek kazanç, geniş bant genişliğine sahip olması açısından mikrodalga filtre tasarımında önemli bir yere sahiptir. Literatürdeki birçok çalışmada, mikrodalga filtrenin frekans cevabının bulunması için, kuplaj matrisi sentezi, rasyonel fonksiyonlar, çift-tek mod empedans analizi gibi birçok farklı teorik analiz yöntemi kullanılmıştır. Rasyonel fonksiyona göre analiz yaparken, filtrenin frekans cevabının eliptik, lineer veya Chebyshev karakteristiklerinden arzu edilen seçilir ve buna göre gereken rasyonel fonksiyon yardımıyla frekans cevabı teorik olarak ortaya koyulabilir. Kuplaj matrisi çıkarılırken, devrenin kuplaj şeması çıkarılır, araya girme kaybı ve iletim sıfırları frekansları belirlenerek kuplaj matrisi çıkarılır. Çift-tek mod empedans analizinde ise filtrenin eşdeğer devre modeli ortaya konular sonra girişe göre çift ve tek mod empedans formüllerinden filtreye ait frekans cevabı elde edilir. Eşdeğer devre modeli belirlenirken, mikrodalga frekanslarında küçük

parçaların indüktif, iki iletim hattı arasındaki boşluğun ise kapasitif özellikli olması gibi bazı teorilerden faydalanılır.

1.1 Tezin Amacı

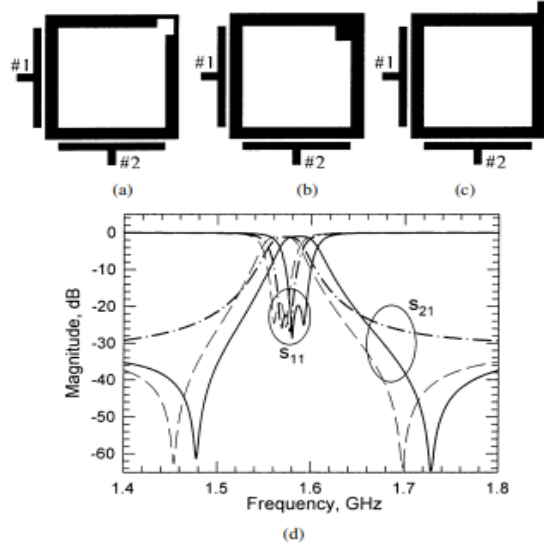
İletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak modern haberleşme sistemlerinde çok daha fazla geçiş bandına ihtiyaç duyulabilmekte ve bu nedenle de son yıllarda çok bantlı band geçiren filtrelere olan talep giderek artmaktadır. Bu çalışma ile ortaya konulan filtre tasarımı ayarlanabilir özellikte olması çok bantlı filtrelerin şifreli haberleşme sistemleri için de kullanılabilirliği son derece önemli bir yapı olma özelliği ortaya koymaktadır. Literatürden de görülebileceği gibi şifreli haberleşme sistemleri için istenilen bantlarda sinyalin alınıp gönderilmesi akabinde de birden fazla band tasarımının sağlanması durumu oldukça avantaj sağlayacaktır. Ayrıca tez çalışmasında, literatür bölümünde daha detaylı anlatılacak olan filtrelere çift mod özelliğinin bir pertürbasyon elemanı ile gerçekleştirilmesi, yan hatlı filtre tasarımlarının frekans cevabına etkisinin incelenmesi gibi konularda oldukça yaygın ve önemli araştırma konularındadır. Bu tez çalışmasında bu iki yöntemin birleştirilip frekans ölçeklendirme ve diğer hesaplama yöntemleriyle elde edilecek filtre özellikleri ve bu özellikleri sağlayacak yapıların modellenmesi sadece günümüz haberleşme sistemleri için değil gelecek nesil sistemler için de oldukça önem arz edecektir.

1.2 Literatür Özeti

Bu bölümde tez çalışmasına rehberlik edecek çalışmalar veriliş sırasına göre çift modlu filtre, yan hatlı filtre ve çok bantlı filtre tasarımı ile ilgili olarak literatür taraması yapılmıştır.

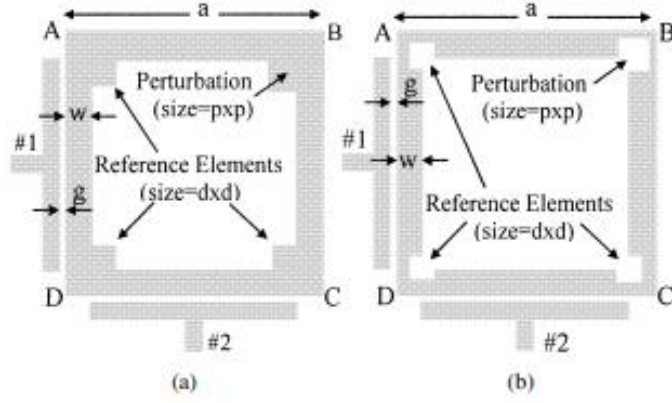
Görür (2004), yapılan çalışmada farklı türdeki pertürbasyonların frekans cevabına etkisi incelenmiştir. Kare halkanın içine veya dışına yerleştirilen pertürbasyon elemanlarının iletim sıfırlarını ve kutuplarını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Bu çalışma ile, yama şeklindeki bir pertürbasyon elemanının, dejenere modlar arasında kapasitif kuplaj oluşturacağı, yarık şeklindeki pertürbasyon elemanının ise bir indüktif kuplaj oluşturacağı belirtilmiştir. Kare halka rezonatörde oluşturulan kare yama şeklindeki

bir pertürbasyon elemanını ile eliptik fazlı frekans cevabı, yarık pertürbasyonu ile lineer fazlı frekans cevabı elde edileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada incelenen farklı tipte pertürbasyon elemanının kullanıldığı çift modlu rezonatörler Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2: (a) İç köşe kesim elemanına sahip çift modlu kare halka rezonatör, (b) İç köşe yama elemanına sahip çift modlu kare halka rezonatör, (c) Dış köşe yama elemanına sahip çift modlu kare halka rezonatör, (d) Üç devrenin simülasyon sonuçları (Görür 2004).

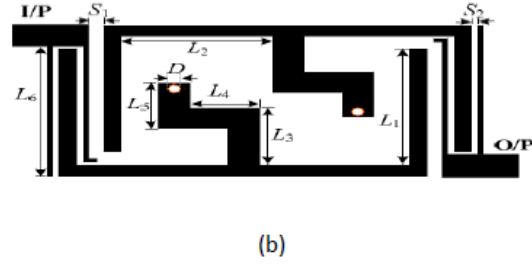
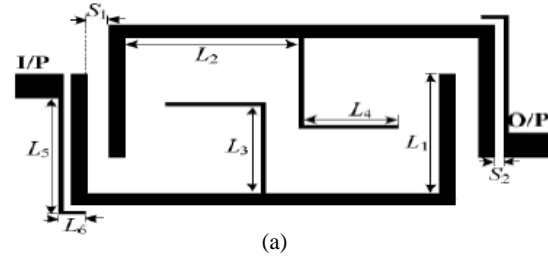
Aynı zamanda Görür bu çalışmada Şekil 1.3’te görüldüğü gibi pertürbasyon elemanı ile aynı tür olacak şekilde giriş ve çıkış portlarından 45 derece uzaklıktaki köşelere de köşe kesim elemanları (yama elemanları) eklenmiştir. Yeni eklenen bu elemanlar referans elemanı olarak adlandırılmıştır. Sonuç olarak, tek başına bir pertürbasyon elemanı, kapasitif veya indüktif kuplaj olarak, dejenere modlar arasında sadece tek çeşit kuplaj sağlayabilir. A. Görür tarafından önerilen düzenlemede ise pertürbasyon elemanının boyutunun referans elemanlardan küçük veya büyük olmasına bağlı olarak çift modlu rezonatörün dejenere modları arasındaki kuplajın türü değiştirilebilir. Böylece pertürbasyon elemanının boyutu değiştirilerek lineer faz veya eliptik filtreleme karakteristikleri elde edilebilir.



Şekil 1.3: (a) Köşe yama elemanlı mikroşerit kare halka rezonatör, (b) Köşe kesim elemanlı mikroşerit kare halka rezonatör (Görür 2004).

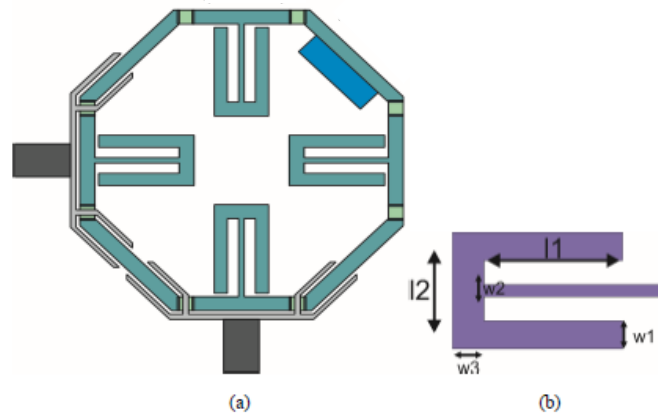
Görür (2004), filtrelere çift mod özelliğinin genellikle bir pertürbasyon elemanının kullanılmasıyla gerçekleştirildiği çalışmaları ve pertürbasyon elemanın boyutlarının değişiminin filtre cevabına etkisini incelemiştir. Ek olarak pertürbasyon etkisinin ve dejeneratör mod halka rezonatörlerle ilgili çok fazla çalışma olup bunlardan önemli olan çalışmalar, (Wolff 1972), (Görür 2002), (Görür ve Diğ. 2007), (Eryılmaz ve Diğ. 2008), (Görür ve Karpuz 2018) çalışmalarıdır.

Yan hat, mikrodalga filtre tasarımlarında sıkça kullanılan bir yapıdır. Yan hat, ana iletim hattından ayrılan ve paralel olarak yerleştirilen bir ek hat ile oluşturulur. Yan hat kullanılarak gerçekleştirilen mikrodalga filtrelerde, ek hat üzerinden belli bir oranda sinyal geçişi sağlanır ve geri kalan sinyaller durdurulur. Bu, frekans seçimini ve sinyal işleme işlevini gerçekleştirmek için kullanılır. Yan hatın uzunluğu, genişliği ve konumlaması gibi parametreler, filtre karakteristiklerini etkileyen önemli faktörlerdir. Mikrodalga filtreler açık halka rezonatör yapılarıyla, yan hat yüklemeleriyle özellikle yarım dalga boyu ($\lambda/2$) ve çeyrek dalga boyu ($\lambda/4$) açık devre-kısa devre sonlandırılmış hat yapılarıyla gerçekleştirilebilir (Zhang ve diğ. 2007), (Tsai ve Huse,2004). Örnek bir çalışma olarak (Fu-Chang ve diğ. 2012) nin çalışmasında Şekil 1.4' te verilen çalışma ile rezonatör merkezine tek açık ya da kısa devre sonlu yan hat bağlanarak ve yan hatların uzunlukları ve empedansları ayarlanarak ilk üç rezonans modu üç-band filtrenin üç geçirme bandı içerisinde elde edildiği gösterilmiştir.



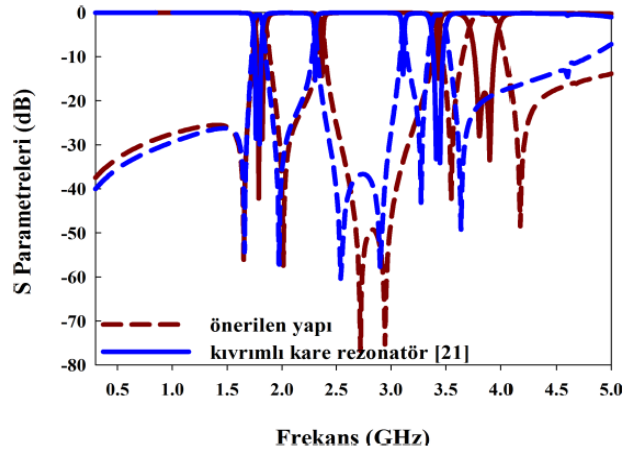
Şekil 1.4: (a) Açık devre sonlandırmalı yan hat yüklü rezonatörler kullanılması, (b) Kısa devre sonlandırmalı yan hat yüklü rezonatörler kullanılması.

Çimen (2015), çalışmasında önceden Görür ve Karpuz tarafından tasarlanmış minyatür bir çift modlu mikroşerit bant geçiren filtre yapısı göz önünde bulundurularak yeni bir filtre tasarımı sunulmuştur. Yapılan çalışmada rezonatörde atlamalar, iç dış kuplaj değişiklikleri yapılarak yapının frekansı ayarlanmıştır. Şekil 1.5' te görüleceği üzere rezonatör sekizgen şeklinde tasarlanmıştır ve yapı açık devre sonlandırmalı yan hatlarla desteklenmiştir.



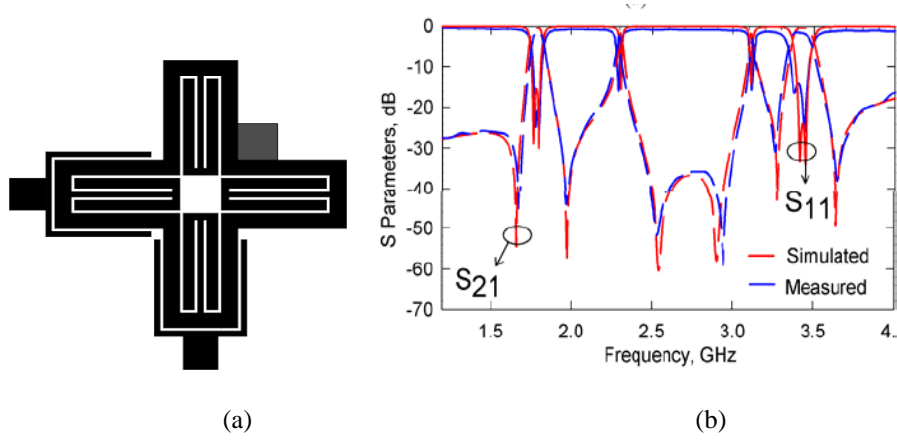
Şekil 1.5: (a) Çift modlu çok bantlı band geçiren filtre, (b) Yan hat yapısı.

Bu çalışmada da ilk önce pertürbasyon etkisi incelenmiş ve filtrenin eliptik-lineer faz cevapları incelenmiştir. Daha sonra daha önceden açıklanan pertürbasyon elemanının filtreye kapasitif veya indüktif etkisini incelemek adına yama elemanı yerine yine aynı kapasitif etkiyi vereceği düşünülen varaktör diyot kullanılarak sonuçlar verilmiştir. Daha sonra yan hat için düz iletim hattı yerine bobin bağlayarak devrenin elektriksel uzunluğu değiştirilmeden indüktif etki artırılarak filtre cevabı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.



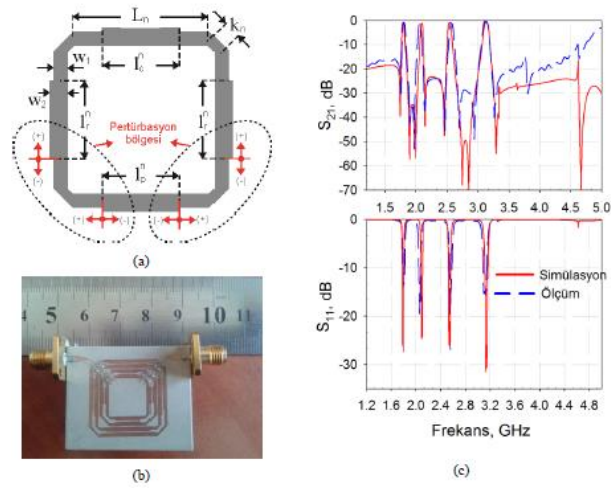
Şekil 1.6: Önerilen filtre yapısının referans verdiği çalışmadaki filtre ile karşılaştırılması.

Literatür taramasında belirtilen iki ana başlıkla beraber hem pertürbasyon etkisinin hem de yan hat yükleme elemanı kullanılması ve bu tez çalışmasında. Görür ve Karpuz tarafından yapılan çalışmalardan yola çıkılmıştır. Bu çalışmalar (Karpuz ve diğ. 2012), (Görür ve diğ 2017), (Görür ve diğ 2013), (Görür ve Karpuz 2017), (Görür ve Karpuz 2011), (Görür 2011), (Görür ve diğ. 2016) dır. Özellikle Görür ve Karpuz (2013) portların konumu ve simetri eksenine göre 0° , 90° , 180° , 270° lere yerleştirilmiş açık devre sonlandırılmış yan hat yükleme elemanlı kırımlı mikroşerit kare rezonatör tasarımı sunulmuştur. Bu tasarımda 2 çift mod ve 2 tek mod olmak üzere 4 band, band geçiren filtrede 2 çift mod daha dejenere modları uyarımı portları arasında 90 derecelik farka göre 135° lik köşeye konulan pertürbasyon (yama) elemanı ile sağlanmıştır. Tasarlanan devre ve filtre cevabı Şekil 1.7' de verilmiştir.



Şekil 1.7: (a) Görür ve Karpuz tarafından tasarlanan filtre (b) frekans cevabı.

Başka bir çalışmada ise (Görür ve diğ. 2013), çeyrek dalga boyu rezonatör oluşturulacak şekilde yerleştirilen giriş-çıkış portlarının tam zıt köşelerine yerleştirilen açık devre sonlandırılmış yan hatlar ile geniş band, band geçiren filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yan hatlarının uzunlukları değiştirilerek geçme bandının merkez frekansı ayarlaması yapılmıştır. Ek olarak rezonatörün köşesine yerleştirilen yama elemanı ile dejenere modların uyarılmasıyla çift mod karakteristik elde edilmiştir.

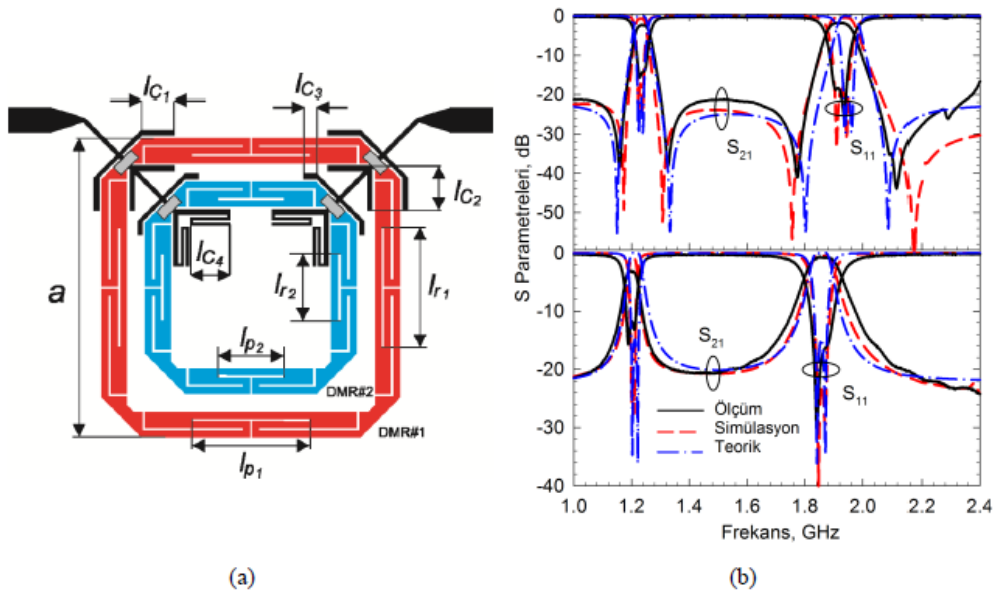


Şekil 1.8: (a) Dört bandlı band geçiren filtrede kullanılan rezonatör, (b) İmal edilen devrenin fotoğrafı, (c) Simülasyon, ölçüm ve teorik sonuçların karşılaştırılması.

Çok bandlı filtre çalışmalarından (Karpuz ve diğ. 2014) çalışmalarında, iç içe yerleştirilmiş farklı elektriksel uzunluklara sahip dört adet çift modlu rezonatör kullanarak dört bandlı band geçiren filtre tasarlamışlardır. Çift modlu rezonatörlerde pertürbasyon etkisi rezonatörlerin kollarındaki empedans değerleri değiştirilerek

ayarlanmıştır. Bu ayarlama ile her bir geçme bandının band genişlikleri ve mod frekansları birbirinden ayrı olarak kontrol etme imkanı sağlamaktadır. Ayrıca her bir rezonatör için açık devre sonlandırılmış yan hatlara sahip besleme hatlarıyla giriş-çıkış portlarına bağlanarak bazı harmonikler bastırılmıştır.

Görür (2016) çalışmasında kare halka rezonatörün kollarının kıvrılması suretiyle yeni bir çift modlu rezonatör konfigürasyonu önerilmiştir. Dejenere modlar klasik pertürbasyon elemanı kullanılması yerine, kıvrılmış hatların arasındaki boşluğun kaydırılması ile uyarılmıştır. Böylece, rezonatörün toplam elektriksel uzunluğu sabit kalmakta ve merkez frekansı değişmemektedir. Ayrıca, önerilen rezonatörün uygun bir giriş-çıkış kuplajı altında kullanılmasıyla iki bandlı, band geçiren bir filtre tasarımı ortaya konulmuştur. İki geçme bandı elde etmek için elektriksel uzunlukları farklı iki adet rezonatör iç içe yerleştirilmiştir. İç içe yerleştirilmiş rezonatörlerden dıştaki rezonatör birinci geçme bandını oluştururken, içteki rezonatör ikinci geçme bandını oluşturmaktadır. Böylece her iki geçme bandı da birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Giriş-çıkış kuplajı için ise açık devre sonlandırılmalı yan hatlara sahip besleme hatları kullanılmıştır.



Şekil 1.9: (a) Tasarlanan kompakt çift bandlı mikroşerit band geçiren filtre yapısı, (b) Ölçüm sonuçlarıyla simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

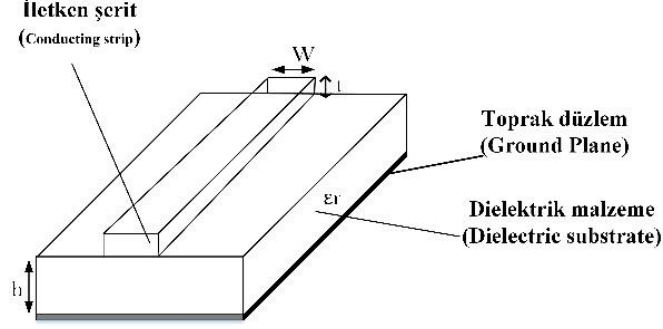
2. MİKRODALGA FİLTRE TASARIMINDA KULLANILAN DÜZLEMSEL YAPILAR

Düzlemsel yapılar mikrodalga filtre tasarımlarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Düzlemsel yapılar, filtre elemanlarını ve bağlantılarını düz bir yüzey üzerinde gerçekleştirmek için kullanılan bir tasarım yaklaşımını ifade eder. Düzlemsel yapılar, mikrodalga filtre tasarımlarında birçok avantaj sunar. Bunlar, kompaktlık, düşük maliyet, entegrasyon kolaylığı, düşük kayıplar, empedans kontrolü ve yüksek frekanslarda iyi performanstır. Bu yapılar, iletim hatları, dirençler, kapasitörler, endüktörler ve diğer filtre elemanlarının düzlemsel bir formda gerçekleştirilmesini sağlar. Düzlemsel yapılarla gerçekleştirilen filtre tasarımları, çeşitli mikrodalga teknolojileriyle uygulanabilir. Bunlar arasında mikroşerit hat teknolojisi, stripline teknolojisi ve mikroşerit-huzmeli teknolojisi gibi yöntemler bulunur.

Mikroşerit hat, mikroşerit hattı metal bir şerit tabakasının dielektrik malzeme üzerine yerleştirildiği ve bu şekilde bir filtre elemanının oluşturulduğu bir yapıdır. Mikroşerit hat, kompakt ve düşük maliyetli olması nedeniyle popüler bir seçenektir. Ayrıca, entegrasyon kolaylığı sağlar ve düzlemsel yapılarda yüksek performans sağlayabilir. Stripline, iki paralel metal tabaka arasında yer alan dielektrik bir tabaka ile oluşturulan bir yapıdır. Bu yapıda, filtre elemanları ve bağlantılar, dielektrik tabakanın içinde bulunan metal izler üzerinde gerçekleştirilir. Stripline yapısı, yüksek frekanslarda düşük kayıplar ve iyi empedans kontrolü sağlar. Mikroşerit-huzmeli yapı, mikroşerit hattı ile huzme yayan bir antenin birleşimidir. Bu yapıda, mikroşerit hattı filtre elemanı olarak kullanılırken, huzme yayan anten işlevi de gerçekleştirilir. Bu şekilde hem filtreleme işlevi hem de sinyal iletimi işlevi aynı düzlemsel yapının içinde gerçekleştirilmiş olur. Bu çalışmada filtre tasarımı aşamasında kullanılan yapılar ve bu yapıların teorik analizleri bu bölüm içerisinde incelenmiştir.

2.1 Mikroşerit Hatlar

Bir mikroşerit hattın genel yapısı Şekil 2.1’de verilmiştir. Genişliği W ve kalınlığı t olan mikroşerit iletken hat, dielektrik sabiti ϵ_r ve kalınlığı h olan bir dielektrik taban malzemenin üstündedir. En alt kısım ise toprak düzlemdir.



Şekil 2.1: Genel mikroşerit yapı.

Mikroşeritteki alanlar, üstte hava ve altta dielektrik olmak üzere iki ortam olması dolayısıyla yapı homojen değildir ve yapı dağılma özelliğe sahiptir. Bu homojen olmama durumu baskın modunun TEM dalga olmamasına neden olur. Bunun nedeni olarak TEM dalgasının yalnızca enine bileşenlere sahip olması ve yayılma hızının yalnızca malzeme özelliklerine, yani elektrik geçirgenliğe ϵ ve manyetik geçirgenliğe μ bağlı olmasıdır. Bir mikroşerit hatta baskın mod için alanların uzunlamasına bileşenleri, enine bileşenlerden çok daha küçük kaldığında, bunlar ihmal edilebilir. Bu durumda, baskın mod bir TEM modu gibi davranır ve TEM iletim hattı teorisi mikroşerit hat için de geçerlidir. Bu Yarı-TEM yaklaşımı olarak adlandırılır ve mikroşeridin çalışma frekans aralıklarının çoğunda geçerlidir. Yarı-TEM yaklaşımında, etkin bir dielektrik geçirgenliğe sahip homojen bir dielektrik malzeme, homojen olmayan dielektrik hava ortamı olan mikroşeridin yerini alır. Mikroşeridin iletim özellikleri, daha sonra yarı statik analiz ile elde edilebilecek efektif dielektrik sabiti ϵ_{re} ve karakteristik empedans Z_0 olmak üzere iki parametre ile tanımlanır. Çok ince iletkenler için ($t \rightarrow 0$) bu parametrelerin kapalı form ifadeleri hesaplanır. İletkenin genişliğinin malzeme kalınlığına oranının birden küçük ve büyük olma durumuna göre

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} + 0.04 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right\} \quad (2.1a)$$

$$Z_0 = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left(\frac{8h}{W} + 0.25 \frac{W}{h} \right) \quad (2.1b)$$

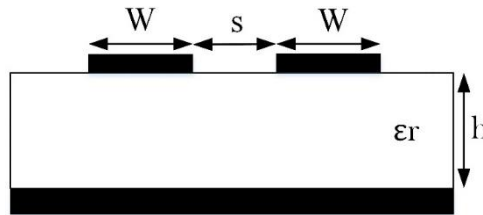
$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} \quad (2.2a)$$

$$Z_0 = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \{ W/h + 1.393 + 0.677 \ln(W/h + 1.444) \}^{-1} \quad (2.2b)$$

Ayrıca bu verilen ifadelerin şerit kalınlığının hesaba katılmasıyla şerit kalıgına bağılı ya da dispersiyon etkisine bağılı olarak frekansa bağılı olarak tekrar düzenlenmiş formülleri de mevcuttur.

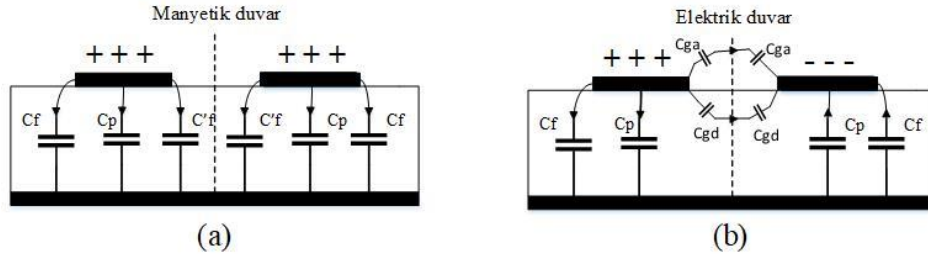
2.2 Kuplajlı Hatlar

Kuplajlı mikroşerit hatlar, mikroşerit filtre uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. W genişliğine sahip iki mikroşerit hattın bir s ayrımı ile paralel ya da kenar kuplajlı hat konfigürasyonunun enine kesiti Şekil 2.2’de gösterilmiştir. İki hat arasındaki yakın yerleşim, elektromanyetik kuplajı sağlar. Kuplaj oranı, hatlar arasındaki geometri, uzaklık ve dielektrik sabiti gibi faktörlere bağılı olarak ayarlanabilir. Bu kuplajlı yapı iki Yarı-TEM modunu destekler. Bu modlar çift mod ve tek moddur. Bu hatların analizini yaparken bu iki mod durumu için ayrı ayrı çözümler yapılır.



Şekil 2.2: Kuplajlı mikroşerit hattın enine kesiti.

Çift modlu uyarım için iki mikroşerit hatta aynı voltaj potansiyeli ya da aynı yük taşırlar bu da Şekil 2.3(a)’da gösterildiği gibi simetri düzleminde manyetik duvar oluşturur. Tek modun uyarılmasında ise mikroşerit hatlar zıt potansiyele ya da zıt yüklerle yüklenirler böylece Şekil 2.3(b)’de gösterildiği gibi simetrik düzlemde elektrik duvar olur.



Şekil 2.3: (a) Manyetik kuplaj, (b) Elektrik kuplaj.

Genel olarak kuplajlı mikroşerit hatlarda bu iki mod aynı anda uyarılır. Ancak Quasi-TEM modundan dolayı farklı faz hızlarında yayılırlar bu da farklı geçirgenlikleri olduğunu gösterir. Bu nedenle, kuplajlı mikroşerit hatlar, iki mod için efektif dielektrik sabitlerinin yanı sıra karakteristik empedanslar ile karakterize edilir.

Tek mikroşerit hatta benzer bir yaklaşımla, çift ve tek mod karakteristik empedansları ile efektif dielektrik sabitleri, C_e ve C_o ile gösterilen çift (even) ve tek (odd) mod kapasitansları cinsinden elde edilebilir. C_e ve C_o Denklem 2.3 ve Denklem 2.4'teki gibi ifade edilebilir;

$$C_e = C_p + C_f + \hat{C}_f \quad (2.3)$$

$$C_e = C_p + C_f + C_{gd} + C_{ga} \quad (2.4)$$

Bu ifadelerde C_p mikroşerit hat ile toprak düzlem arasındaki paralel plaka kapasitörünü ifade eder ve en basit tanımlama ile şu şekilde hesaplanır,

$$C_p = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{W}{h} \quad (2.5)$$

C_f ifadesi ise saçılmalardan kaynaklanan kapasiteyi ifade eder ve şu şekilde hesaplanır,

$$2C_f = \sqrt{\epsilon_{re}} / (cZ_0) - C_p \quad (2.6)$$

\hat{C}_f kapasitansı diğer mikroşerit hattın kaynaklanan saçılmalardan kapasitansının değişimini açıklar. Deneysel bir ifadeyle,

$$\hat{C}_f = \frac{C_f}{1 + A(h/s) \tanh(8s/h)} \quad (2.7)$$

Tek mod için C_{gs} ve C_{gd} sırasıyla, hava ve dielektrik bölge arasındaki saçak kapasitansını ifade eder. Kapasitans C_{gd} kuplajlı hattın geometrisinden bulunur. C_{ga} kapasitansı kuplajlı hattın geometrisinden hesaplanan kapasitansın değiştirilmesiyle ve iki eliptik fonksiyonun oranı cinsinden ifade edilebilir.

Özellikle mikrodalga filtre tasarımlarında çok farklı filtre yapıları mevcuttur. En sık kullanılan yapılardan biri de İlk olarak Wen tarafından önerilen E_s düzlemlerli dalga kılavuzu (CPW) Genişliği W olan metal bir şerit ve bağlı dielektrik sabiti ϵ_r ve kalınlığı h olan dielektrik bir alt tabaka üzerine basılmış iki bitişik yer düzleminde oluşur. CPW ile birlikte stripline, asılı mikroşerit hat gibi yapılarda mevcuttur. Ayrıca bu bölümde söylendiği üzere mikrodalga düzlemsel yapılar için teorik analizinde kullanılan formüller ampirik(deneysel), türetilmiş formüllerdir. Yani belirli koşullar altında farklı doğruluk yüzdeleri vardır. Literatürde pek çok kabul görmüş aynı ifadenin farklı formülasyonları mevcuttur. Bu da gösteriyor ki tasarımı yapılmak istenen mikrodalga filtreye en uygun formüller seçilerek analiz yapılabilir.

2.3 Süreksizlikler

Mikrodalga devreler tasarım gerekliliğinden dolayı genellikle çeşitli süreksizliklere sahip iletim hatalarından oluşur. Bazı durumlarda süreksizlikler için bir ortamda diğerine geçiş, mekanik ya da elektriksel geçişlerin bir sonucudur. Süreksizlik etkisi istenmeyen bir durum olsa da belirli bir mekanik veya elektriksel işlevi yerine getirmek için devreye bilinçli bir şekilde eklenebilir. Bir süreksizlik iletim hattının herhangi bir noktasında bir eşdeğer devre ile gösterilebilir. Bir eşdeğer devrenin elemanları, hattın ve süreksizliğin parametrelerine ve çalışma frekansına bağlıdır.

3. ÇİFT MODLU BAND GEÇİREN FİLTRE TASARIMI VE ANALİZİ

Çalışmanın bu bölümünde tasarlanan filtrenin hangi tasarım adımları önce kare halka rezonatör üzerinde uygulanmıştır. Öncelikli olarak daha önce sözü edilen pertürbasyon etkisi ile mod uyarımı ile yan hat yükleme elemanlarının kullanılması metodları önce kare halka rezonatör yapısı üzerinde gösterilmiştir. Her bir aşamada filtrelerin teorik cevapları bulunmuş, eş değer devreleri üzerinden çift-tek mod analizleri yapılmıştır.

3.1 Saçılma Parametreleri

Mikrodalga frekanslarda, akım ve gerilimlerin doğrudan ölçümü için ampermetre ve voltmetre kullanılmaz. Bu nedenle, bir şebekenin elektriksel uyarım düzeyinin ölçüsü olan gerilim ve akım, mikrodalga frekanslarında öncelik bir rol oynamaz. Yine de mikrodalga devre analizlerinin kolay anlaşılabilmesi için mikrodalga devrenin çalışması gerilimler, akımlar ve empedanslar ile tanımlanabilirler. Mikrodalga filtreler Şekil 3.1’de verilen iki kapılı devre modeliyle temsil edilir.



Şekil 3.1: İki kapılı devre modeli.

Mikrodalga filtreler Şekil 3.1’de gösterildiği gibi iki kapılı devreler ile modellenebilir. Burada iki kapılı devrede V_1 ve I_1 bir nolu kapıdaki gerilim ve akım değişkenlerini, V_2 ve I_2 iki nolu kapıdaki gerilim ve akım değişkenlerini, Z_{01} ve Z_{02} hat empedanslarını ve E_s kaynak gerilimini temsil etmektedir.

S parametreleri kapılardan içeri giren ve kapılardan dışarıya çıkan ya da yansıyan gerilim dalgaları ile ifade edilmiştir. Burada a_1 , a_2 , b_1 , b_2 dalga değişkenleridir ve a gelen dalgayı, b yansıyan dalgayı temsil etmektedir. Dalga değişkenleri ile gerilim ve akım Denklem 3.1a ve Denklem 3.1b'deki ifadelerle tanımlanır.

$$V_n = \sqrt{Z_{0n}}(a_n + b_n) \quad (3.1a)$$

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{Z_{0n}}}(a_n - b_n) \quad (3.1b)$$

Denklem 3.2a ve Denklem 3.2b'de 2 kapılı bir devre için kapılardan giren ve yansıyan normalize gerilim dalgaları ile S parametrelerin denklemleri verilmiştir. Burada S_{11} , bir kapısındaki gerilim yansıma katsayısı, S_{22} , iki kapısındaki gerilim yansıma katsayısı, S_{12} , iki kapısından bir kapısına doğru (geri) gerilim transfer fonksiyonu, S_{21} ise bir kapısından iki kapısına doğru (ileri) gerilim transfer fonksiyonu olarak tanımlanır.

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.2a)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.2b)$$

Mikrodalga devre analizinde ve devre sentezinde yansıma katsayısı S_{11} ' i karakteristik empedans ve giriş empedansı sırasıyla Denklem 3.3a ve Denklem 3.3b ile verilen ifadeler ile tanımlanabilir.

$$S_{11} = \frac{Z_{in1} - Z_{01}}{Z_{in1} + Z_{01}} \quad (3.3a)$$

$$S_{22} = \frac{Z_{in2} - Z_{02}}{Z_{in2} + Z_{02}} \quad (3.3b)$$

3.2 Çift-Tek Mod Analizi

Çift-tek mod analizi yaparken fitrenin eşdeğer devresi filtrenin giriş-çıkış portlarının konumuna göre filtre iki simetrik parçaya ayrılacak şekilde bir simetri

ekseniyle bölünür. Simetri eksenine göre bölünen parçalardan biri üzerinden eş değer devre çıkarımı yapılır. Daha sonra çıkartılan eşdeğer devre üzerinden çift mod için açık devre sonlandırılır ve devrenin giriş empedans ya da giriş admitansı hesaplanır. Tek mod için ise devre kısa devre sonlandırıp devrenin girişinden görünen giriş empedansı ya da admitansı bulunur. Hesaplanan empedans ya da admitans değerinden saçılma parametrelerin bulunmasına geçilir ve saçılma parametrelerinden filtrenin frekans cevabı elde edilir. Eşdeğer devrenin giriş empedans ve admitansı sırasıyla Denklem 3.4a ve 3.4b’de verilen formüller ile bulunur.

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \theta}{Z_0 + jZ_L \tan \theta} \quad (3.4a)$$

$$Y_{in} = Y_0 \frac{Y_L + jY_0 \tan \theta}{Y_0 + jY_L \tan \theta} \quad (3.4b)$$

Denklem 3.4a ve Denklem 3.4b’ deki Z_L ve Y_L ifadeleri sırasıyla yük empedansı ve yük admitansını göstermektedir. θ ise iletim hattının elektriksel uzunluğunun ifadesidir. Eşdeğer devrede çift-tek mod empedans ya da admitansı hesaplandıktan sonra S parametreleri Denklem 3.5a ve 3.5b’de verilen formüller ile hesaplanır (Hong ve Lancaster 2001).

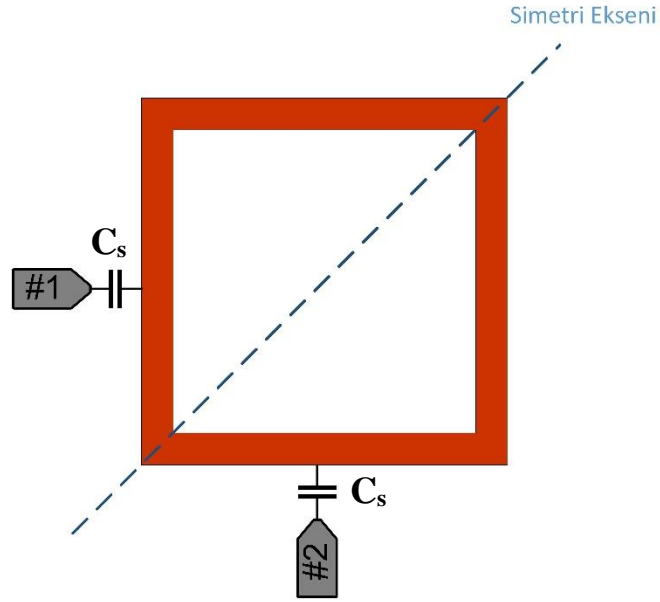
$$S_{11} = \frac{Z_{ine}Z_{ino} - Z_0^2}{(Z_{ine} + Z_0)(Z_{ino} + Z_0)} = \frac{Y_0^2 - Y_{ine}Y_{ino}}{(Y_{ine} + Y_0)(Y_{ino} + Y_0)} \quad (3.5a)$$

$$S_{21} = \frac{Z_{ine}Z_0 - Z_{ino}Z_0}{(Z_{ine} + Z_0)(Z_{ino} + Z_0)} = \frac{Y_0Y_{ino} - Y_{ine}Y_0}{(Y_{ine} + Y_0)(Y_{ino} + Y_0)} \quad (3.5b)$$

3.2.1 Kare halka rezonatörde çift-tek mod analizi

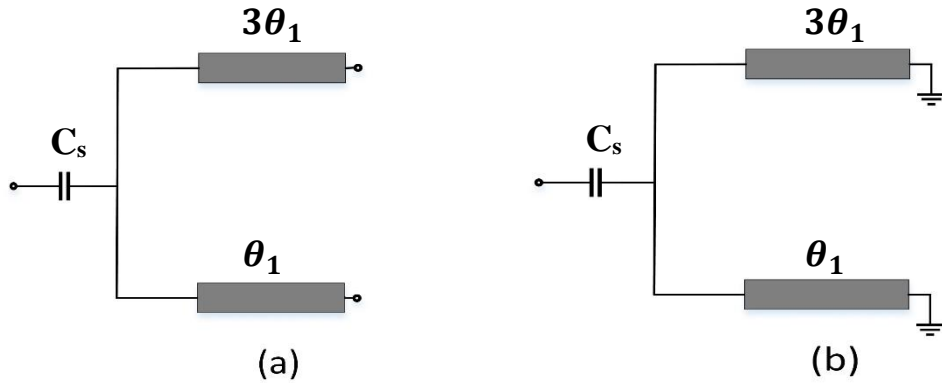
Çift tek mod analizi yapılacak kare halka rezonatörün bir kenar uzunluğu 14 mm ve kalınlığı 1.2 mm alınmıştır. Portlar aralarında 90°’lik açı olacak şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 3.1’de verilen kare halka rezonatör yapısı ile ilgili olarak literatürdeki çalışmalarda filtrenin kuplaj beslemeleri genellikle bir kuplaj kolu ile sağlanır. Yapılan çalışmada ise yeterli kuplajın sağlanması, kuplajın daha kolay artırılıp azaltılması ve filtre cevabının daha doğru elde edilmesi için direkt kapasiteler ile giriş-çıkış portlarına bağlanmıştır. Böylelikle bir kuplaj kolunun boyutlarının sınırlı

oranda değişmesi durumu ortadan kalkarak istenilen kuplaj kapasitesi değerinde tasarımlar gerçekleşmiştir.



Şekil 3.2: Kare halka rezonatör.

Kare halka rezonatörün eşdeğer devresi ve çift-tek mod analizi ele alındığında yarı eşdeğer devresi Şekil 3.2’de verildiği gibidir. Yarı eşdeğer devre üzerinden çift-tek mod empedans ya da admitansı bulunurken, çift mod için devre açık yapılır ve giriş empedans ya da admitans değeri bulunur. Tek mod için devre kısa devre edilir. Son işlem adımı olarak hesaplanan çift-tek mod empedans ya da admitansına göre saçılma parametreleri formüllerinde yerine yazılarak frekans cevabı bulunur.



Şekil 3.3: Kare halka rezonatörün eşdeğer yarı devre modelleri (a) Çift mod, (b) Tek mod.

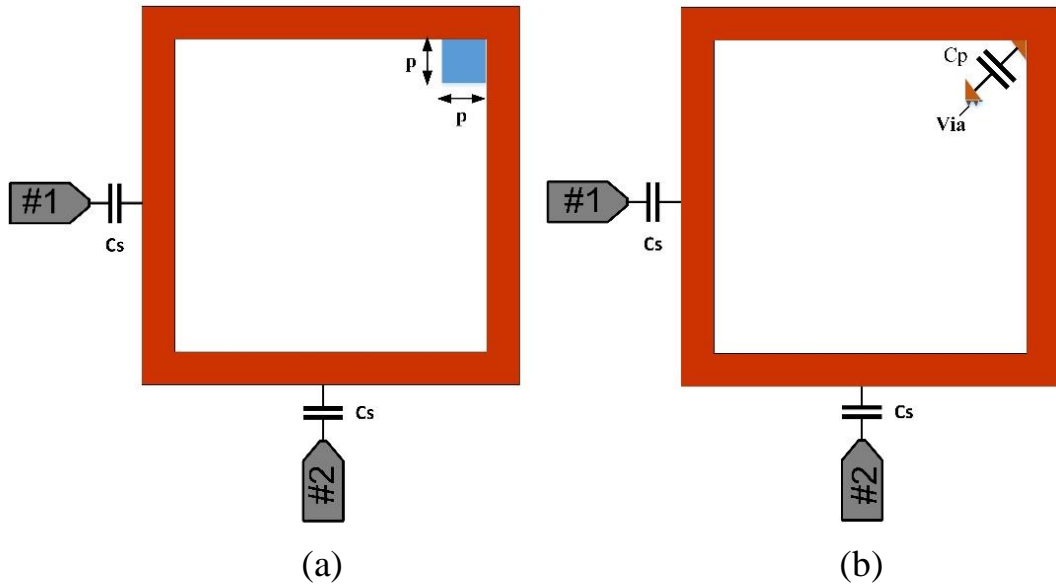
$$Z_{\text{even}} = Z_s + \frac{-jZ_0}{\cot 3\theta_1 + \cot \theta_1} \quad (3.6)$$

$$Z_{\text{odd}} = Z_s + \frac{-jZ_0}{\tan 3\theta_1 + \tan \theta_1} \quad (3.7)$$

Denklem 3.6 ve 3.7 ile verilen eşitliklerde Z_0 karakteristik empedansı Z_s ise filtre ile besleme arasındaki kuplaj aralığını temsil eden C_s kapasitesinin empedansını ifade eder.

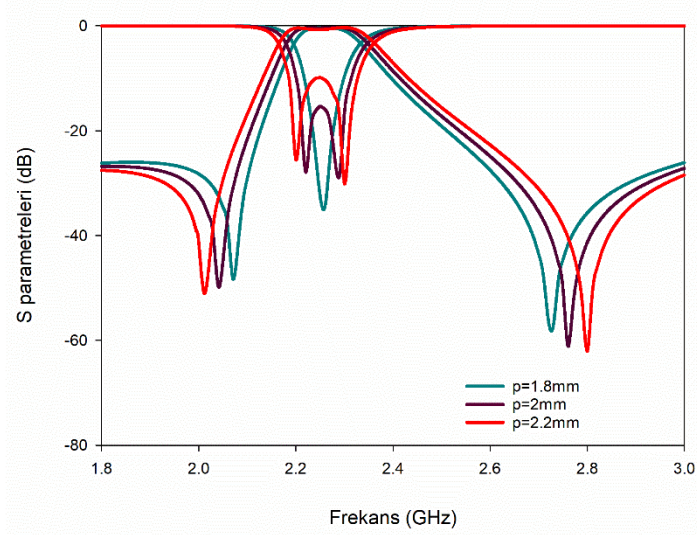
3.2.2 Pertürbasyon Elemanına Sahip Kare Halka Rezonatörün Çift Tek Mod Empedans Analizi

Şekil 3.4(a) ve Şekil 3.4(b)'de yama elemanına sahip kare halka rezonatör ve bu yama elemanın yerine filtredeki kapasitif etkiyi sağlayacak bir kapasite ile tasarımı verilmiştir. Böylelikle iki devre içinde alan bozucu bir etki sağlayacak pertürbasyon elemanı yerleştirilmiştir. Filtreye eklenen pertürbasyon elemanları ile çift modlu band frekans cevabı elde edilmek istenmiştir. Bandın elde edilmesi içinse yama elemanın boyutları değiştirilerek ya da kapasitenin değeri değiştirilerek bandın değişimi incelenmiştir. Yama elemanın boyutlarının değişimine göre iki modlu bandın değişimi Şekil 3.5'te verilmiştir. Aynı zamanda Şekil 3.6 ile verilen rezonatörde farklı pertürbasyon kapasitesi değerleri için iki modlu bandın değişimi verilmiştir.

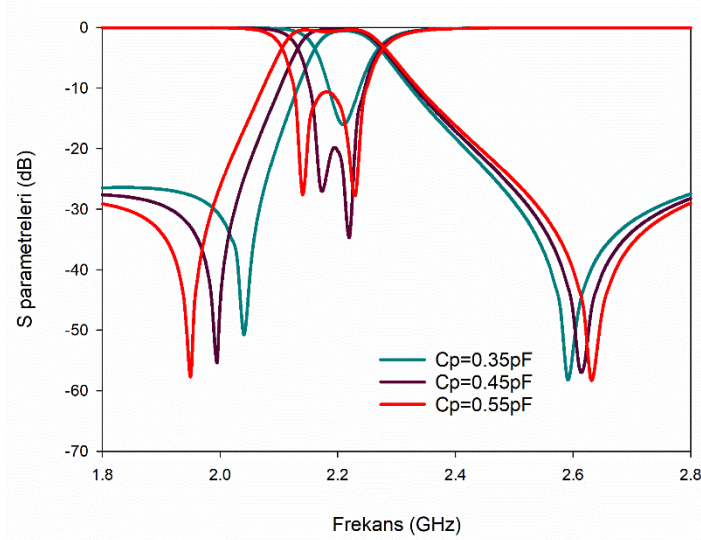


Şekil 3.4: (a) Pertürbasyon elemanına sahip kare halka rezonatör, (b) Pertürbasyon kapasitesine sahip kare halka rezonatör.

Pertürbasyon elemanı olarak kullanılan kare yamanın bir kenar uzunluğu sırasıyla 1.8mm, 2mm ve 2.2mm alınmıştır. Ayrıca bu filtrede kare halkanın bir kenar uzunluğu 14mm ve genişliği 1.2mm alınmıştır. Şekil 3.5'te verilen grafikten görüldüğü üzere bir yama elemanı ile çift modlu bir band elde edilmiştir. Yama elemanının boyutunun arttırılmasıyla mod ayrışımı gözükmemektedir.



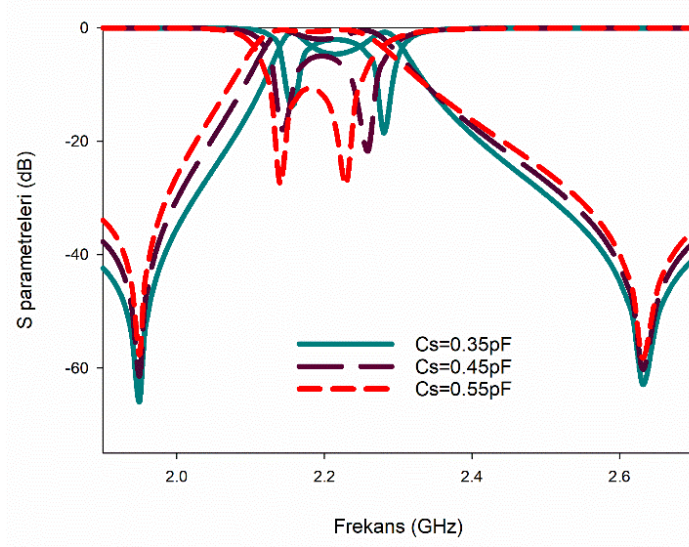
Şekil 3.5: Yama elemanının farklı boyutlardaki değişiminin frekans cevabına etkisi.



Şekil 3.6 Farklı pertürbasyon kapasite değerleri için frekans cevabı.

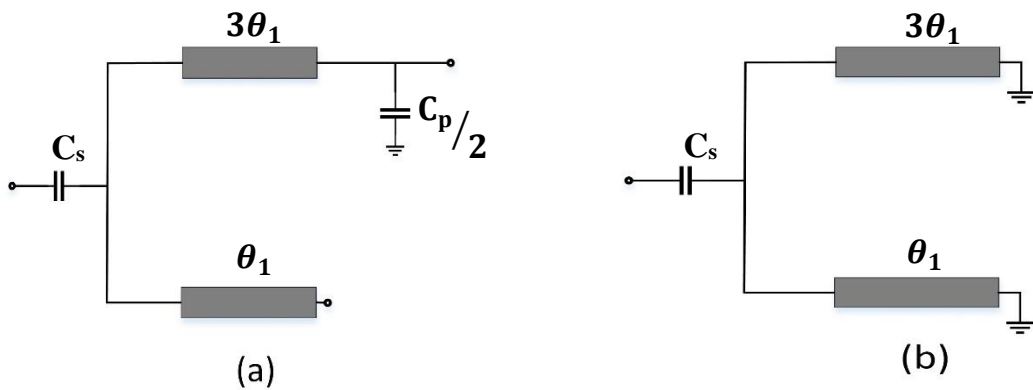
Pertürbasyon elemanlı rezonatörde kuplajın frekans cevabına etkisini incelemek adına pertürbasyon kapasitesi değerini 0.55pF'ta sabit tutarak, kuplaj

kapasitesi değeri sırasıyla 0.35pF, 0.45pF ve 0.55pF alınarak simülasyon analizi yapılmıştır. Elde edilen cevaplar Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7: Pertürbasyon elemanlı kare halka rezonatörde kuplaj değişiminin frekans cevabına etkisi.

Pertürbasyon elemanlı filtrenin çift mod ve tek mod analizi yapılırken çizilen eşdeğer yarı devre modellerinde girişten pertürbasyon elemanına kadar olan elektriksel uzunluk diğer kısımdaki elektriksel uzunluğun üç katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Pertürbasyon elemanına sahip kare halka rezonatörün çift mod ve tek mod eşdeğer yarı devresi Şekil 3.8’de verilmiştir. Bu devreler ile hesaplanan çift-tek mod empedansları sırasıyla Denklem 3.8 ve Denklem 3.9’da verilmiştir.



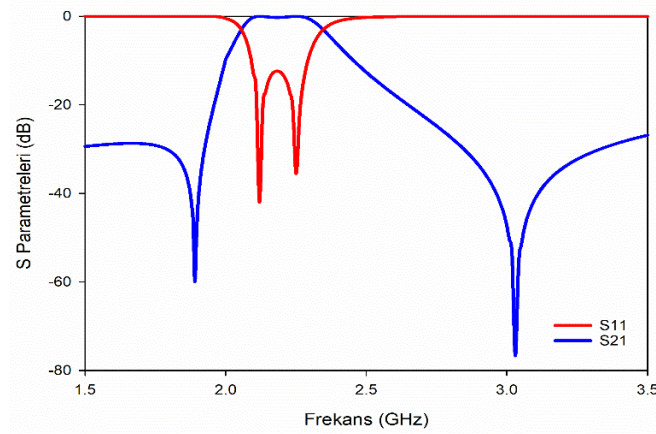
Şekil 3.8: Pertürbasyon elemanına sahip kare halka rezonatörün eşdeğer yarı devre modelleri (a) Çift mod, (b) Tek mod.

Bu eşitliklerde çift modda pertürbasyon etkisini ifade eden C_p hatta bağlanmış yük olarak kabul edilir ve Denklem 3.8 ile verilen eşitlikte Y_p admitans ifadesi olarak alınmıştır. Burada Y_p ifadesi $j\omega \frac{C_p}{2}$ olarak bulunur.

$$Z_{\text{even}} = Z_s + \left(Y_0 \frac{Y_p + jY_0 \tan 3\theta_1}{Y_0 + jY_p \tan 3\theta_1} + jY_0 \tan \theta_1 \right)^{-1} \quad (3.8)$$

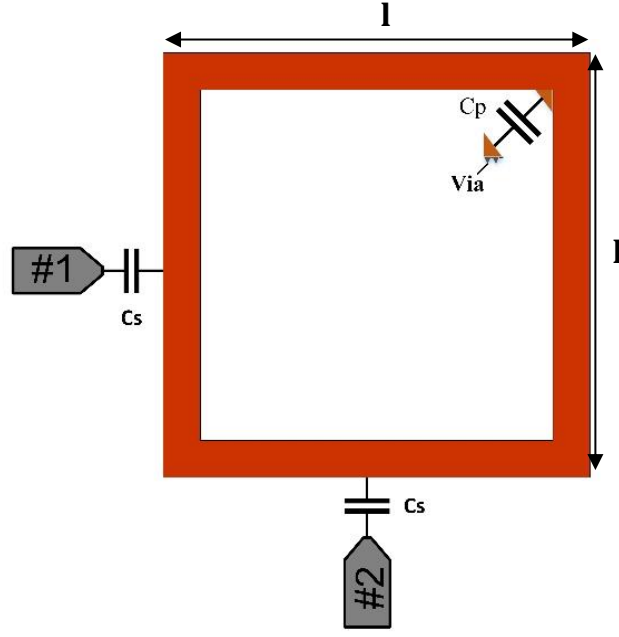
$$Z_{\text{odd}} = Z_s + \frac{-jZ_0}{\tan 3\theta_1 + \tan \theta_1} \quad (3.9)$$

Sırasıyla Denklem 3.8 ve Denklem 3.9'da verilen Z_{even} ve Z_{odd} empedans formülleri ile hesaplanan, filtrenin $C_p = 0.55\text{pF}$ için teorik cevabı Şekil 3.9'da verilmiştir.

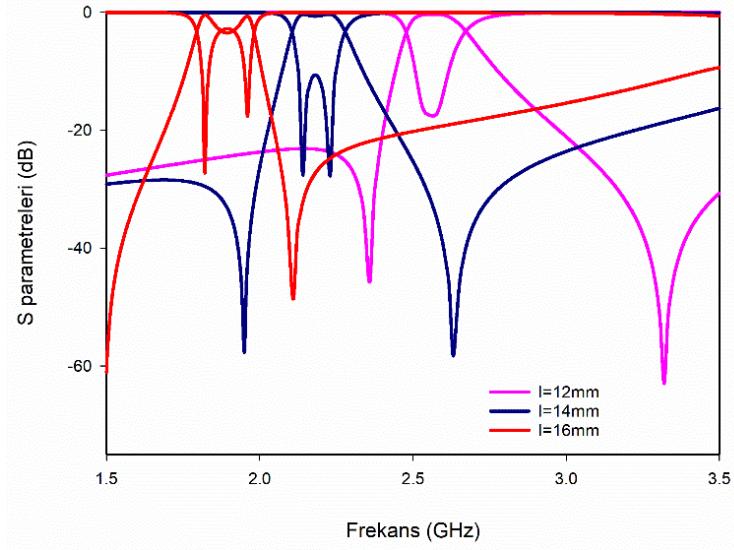


Şekil 3.9: Pertürbasyon elemanına sahip kare halka rezonatörün teorik cevabı.

Rezonatör boyutlarının frekans cevabına etkisini incelemek adına pertürbasyon kapasitesinin değeri 0.55pF 'ta sabit tutularak kare halka rezonatörün bir kenar uzunluğu sırasıyla 16mm, 14mm ve 12mm alınmıştır.



Şekil 3.10: Pertürbasyon kapasitesine sahip kare halka rezonatörde, rezonatör boyutlarının ayarlanması.



Şekil 3.11: Farklı rezonatör kenar uzunlukları için frekans cevabı.

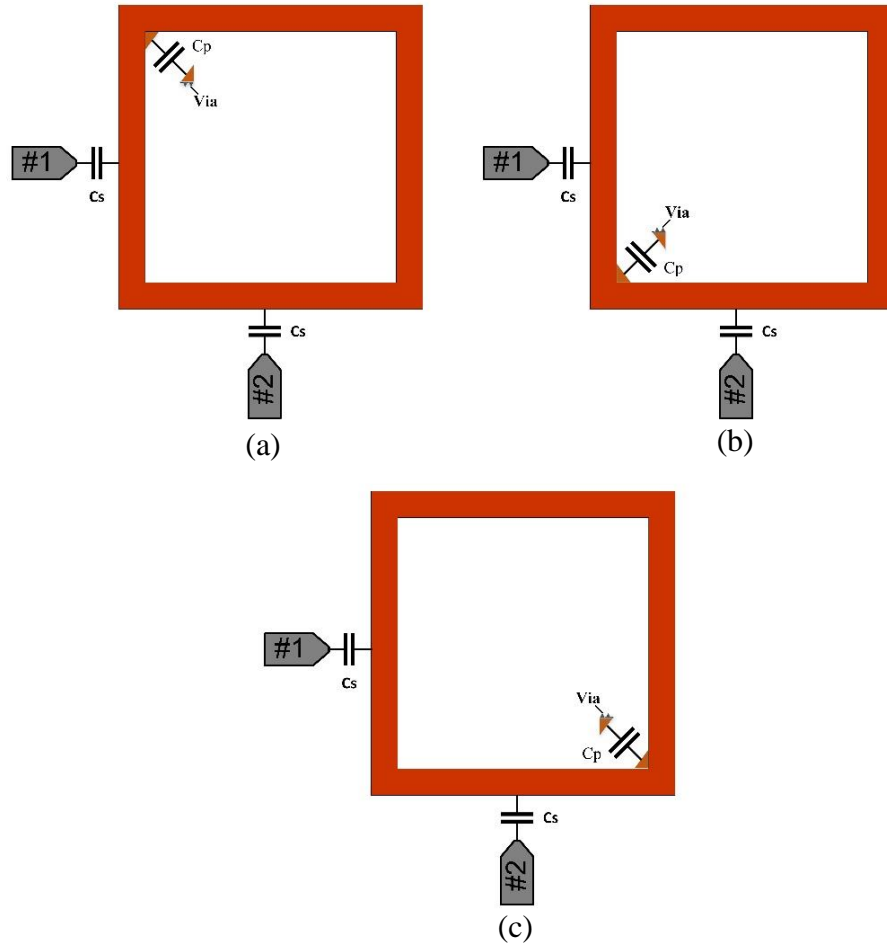
Rezonatör boyutları, rezonans frekansını belirleyen önemli parametrelerdir ve frekans cevabı, rezonatörün boyutlarına bağlı olarak değişir. Rezonatör boyutlarında geometrik değişiklikleri, rezonans frekansını etkiler. Rezonatör boyutlarının artması, rezonans frekansının düşmesine yol açar. Yani, daha düşük frekanslarda rezonans yapar. Rezonatör boyutlarının azalması ise, rezonans frekansının yükselmesine neden olur. Yani, daha yüksek frekanslarda rezonans yapar.

3.2.3 Pertürbasyon ve Referans Elemanına Sahip Kare Halka Rezonatörün Çift Tek Mod Empedans Analizi

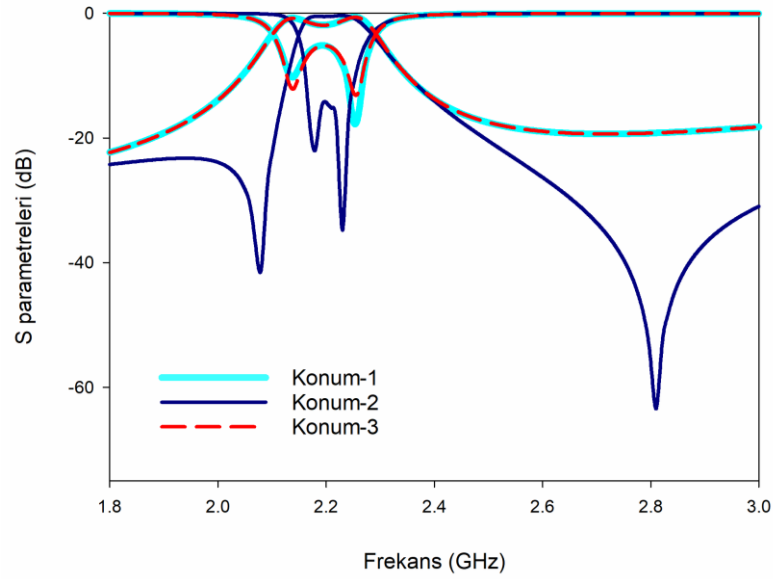
Dejenere modlar arasındaki kuplajın niteliğini belirleyen temel faktör, pertürbasyon elemanının tipi ve boyutudur. Çift mod, mikroşerit, kare pertürbasyonlu rezonatörde bir dual band filtrenin köşesinde kare kesim pertürbasyon mevcut ise filtre cevabı lineer faz cevabını verirken, aynı rezonatörde, rezonatörün dışına eklenen küçük iletken pertürbasyon elemanı ise filtre cevap karakteristiğinde eliptik filtre cevabını verir. Yani pertürbasyon türü kuplaj türünün indüktif ya da kapasitif olmasını belirler. Eğer pertürbasyon elemanı bir kare kesim parça ise indüktif bir kuplaj etkisi; eğer köşede bir kare yama elemanı ise kapasitif kuplaj etkisine yol açar.

Görür'ün 2004'te önerdiği yapı ile pertürbasyon elemanı ile aynı tür olacak şekilde giriş ve çıkış portlarından 45^0 uzaklıktaki köşelere de köşe kesim elemanları veya yama elemanları eklenmiştir. Yeni eklenen bu elemanlar referans elemanı olarak adlandırılmıştır. Sonuç olarak, tek başına bir pertürbasyon elemanı, kapasitif veya indüktif kuplaj olarak, dejenere modlar arasında sadece tek çeşit kuplaj sağlarken, Görür tarafından önerilen düzenleme ile pertürbasyon elemanının boyutunun referans elemanlardan büyük ya da küçük olması durumunda çift modlu rezonatörün dejenere modları arasındaki kuplajın türü değiştirilebilir. Böylece pertürbasyon elemanının boyutu değiştirilerek lineer faz veya eliptik filtreleme karakteristikleri elde edilebilir.

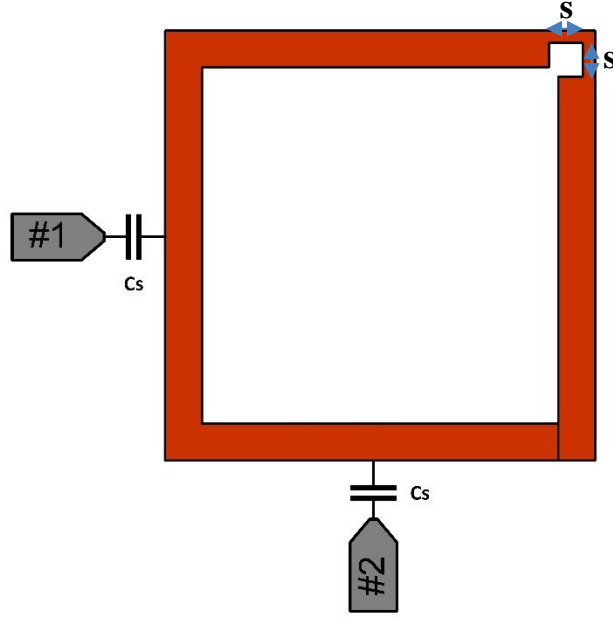
Referans ve pertürbasyon elemanlı rezonatör analizinden önce pertürbasyon kapasitesi kare halka rezonatörün diğer köşelerine konumlandırılarak, pertürbasyon elemanının rezonatör üzerinde yerinin değişmesinin filtre cevabı üzerindeki etkisi incelenmiştir.



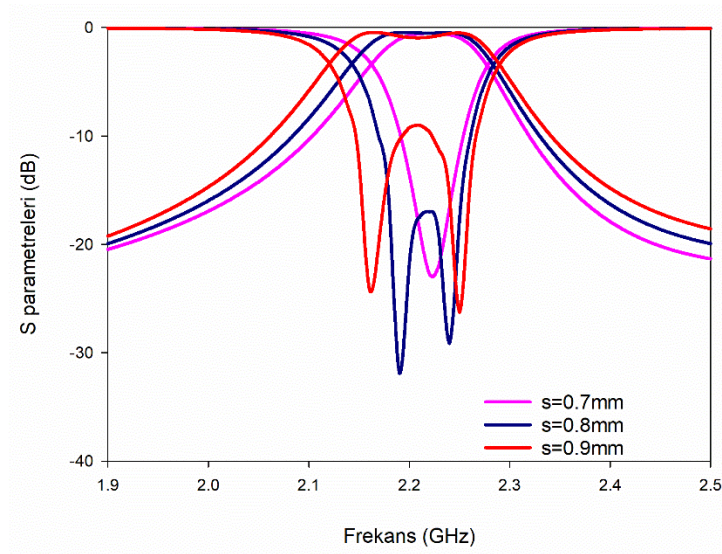
Şekil 3.12: Pertürbasyon elemanının kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3.



Şekil 3.13: Pertürbasyon elemanının rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesinin frekans cevabına etkisi.



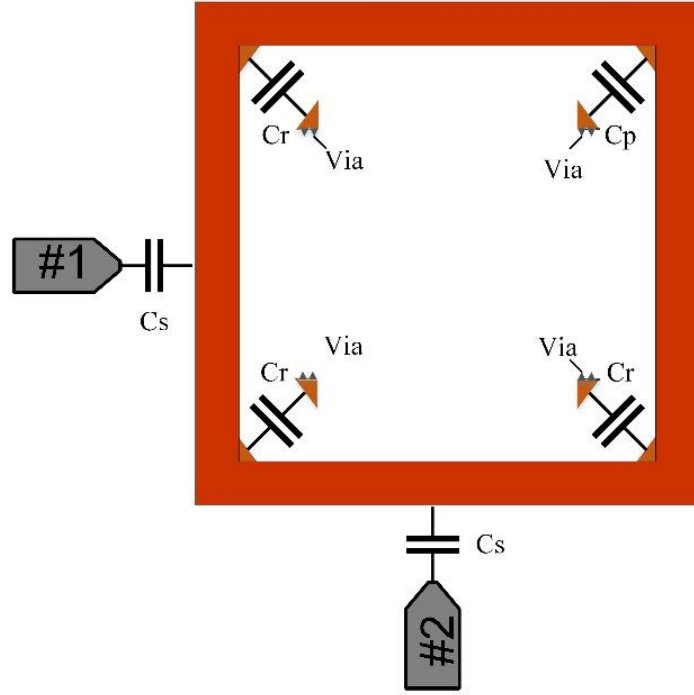
Şekil 3.14: Köşe kesim pertürbasyonlu kare halka rezonatör.



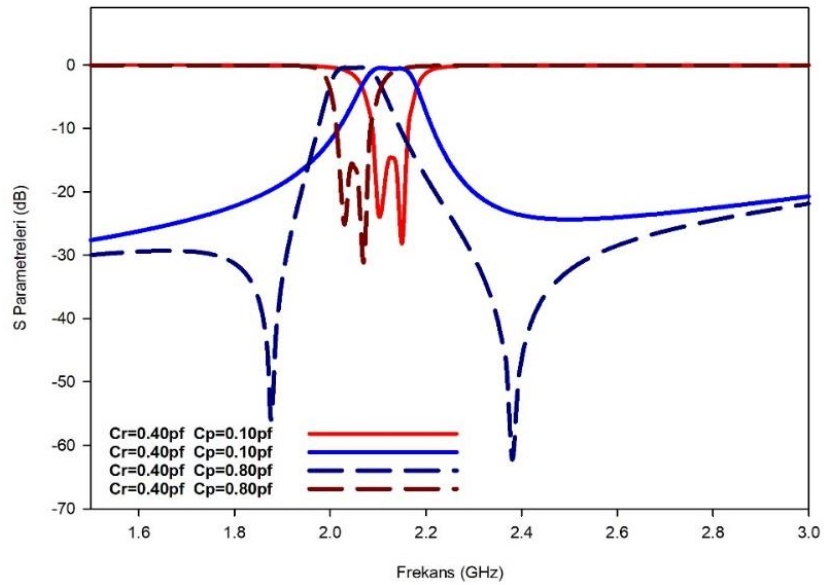
Şekil 3.15: Köşe kesim pertürbasyon elemanın farklı boyutlarda frekans cevabı.

Bir sonraki işlem adımı olarak kare halka rezonatöre referans elemanları eklenmiştir. Referans elemanları, pertürbasyon elemanın etkisini kontrol etmek için kullanılır ve pertürbasyon elemanın boyutunun referans elemanından büyük veya küçük olması durumunda filtrenin eliptik veya lineer faz cevabı elde edilir. Şekil 3.16'dan görüleceği üzere pertürbasyon ve referans elemanları yerine kapasiteler kullanılmıştır. Bu durumda ise pertürbasyon kapasitesinin referans kapasitesinden büyük ya da küçük olması eliptik ve lineer faz cevabının elde edilmesini sağlar.

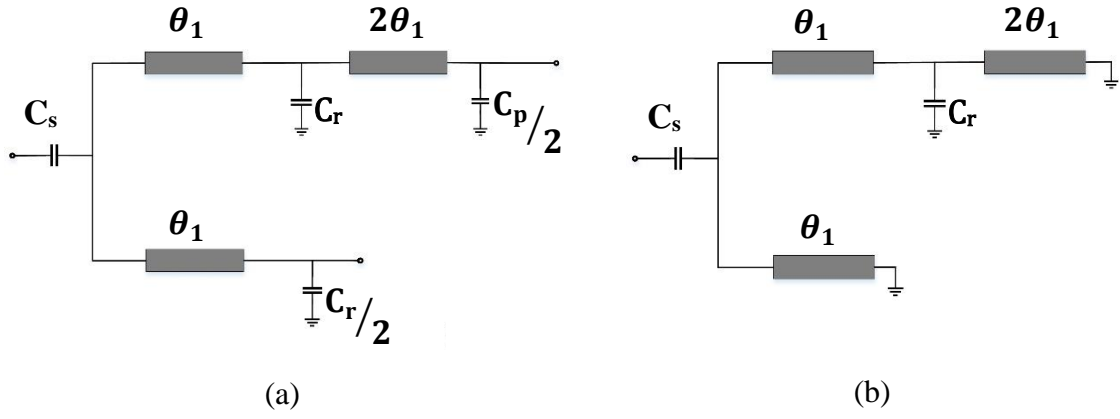
Bu filtre yapısının çift mod ve tek mod eşdeğer yarı devreleri çıkartılmıştır ve bu eşdeğer yarı devreler üzerinden çift mod empedansı ve tek mod empedansı hesaplanıp saçılma parametrelerinde yerine yazılarak filtrenin teorik olarak frekans cevabı elde edilmiştir.



Şekil 3.16: Yama ve referans elemanlı kare halka rezonaör.



Şekil 3.17: Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün frekans cevabı.



Şekil 3.18: Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün eşdeğer yarı devre modelleri (a) Çift mod, (b) Tek mod

Tek mod empedansı Denklem 3.10’da verildiği gibi hesaplanmıştır. Çift mod empedansı için hesaplamalar açık devre yapılan kısmından başlayıp devre basite indirgenerek bulunmuştur. Bu ara işlemlerde Y_r ifadesi referans elemanının admitansını ifade eder ve $j\omega \frac{C_r}{2}$ şeklinde hesaplanır.

$$Z_{\text{odd}} = Z_s + \left(Y_0 \frac{-jY_0 \cot 2\theta_1 + Y_r + jY_0 \tan \theta_1}{Y_0 + j \tan \theta_1 (-jY_0 \cot 2\theta_1 + Y_r)} - jY_0 \tan \theta_1 \right)^{-1} \quad (3.10)$$

İlk olarak yük admitansları hesaplanır.

$$Y_p = j\omega \frac{C_p}{2} \quad (3.11)$$

$$Y_r = j\omega \frac{C_r}{2} \quad (3.12)$$

Bir sonraki adımda devrenin üst kolu için çözüm yapılır. Burada ilk olarak çeyrek dalga boyundaki hatta $\frac{C_p}{2}$ yükü ile sonlandırılış olup hattın girişinden gözükten admitans bulunmuştur.

$$Y_1 = Y_0 \frac{Y_0 + jY_p \tan 2\theta_1}{Y_p + jY_0 \tan 2\theta_1} \quad (3.13)$$

Sonraki adımda Y_1 ve Y_r birbirine paralel iki admitans değeri olduğundan toplanır.

$$Y_2 = Y_1 + 2Y_r \quad (3.14)$$

Son durumda ise üst kolun girişinden gözüken empedans hesaplanmış olur.

$$Y_{üst} = Y_0 \frac{Y_0 + jY_2 \tan \theta_1}{Y_2 + jY_0 \tan \theta_1} \quad (3.15)$$

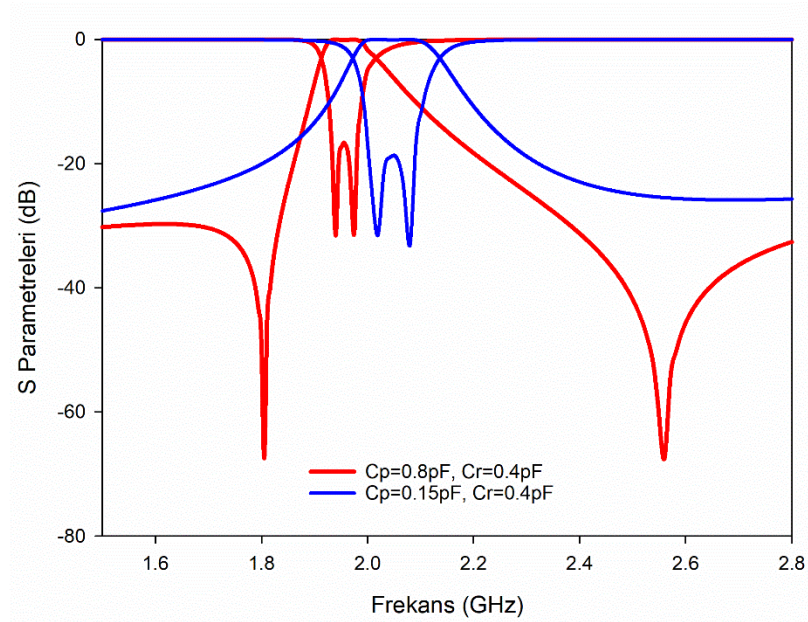
Alt kolu için $\lambda/8$ uzunluğundaki hatta $\frac{C_r}{2}$ lik bir yük ile sonlandırılmıştır. Hattın girişinden gözüken admitans değeri hesaplanmıştır.

$$Y_{alt} = Y_0 \frac{Y_0 + jY_r \tan \theta_1}{Y_r + jY_0 \tan \theta_1} \quad (3.16)$$

Bu sonuçlar göze alındığında çift mod empedansı,

$$Z_{even} = Z_s + (Y_{üst} + Y_{alt})^{-1} \quad (3.17)$$

Denklem 3.17 'de verildiği gibi hesaplanmış olur. Sırasıyla Denklem 3.10 ve Denklem 3.17'de verilen Z_{even} ve Z_{odd} empedansları ile hesaplanan, filtrenin referans kapasitesi $C_r = 0.4\text{pF}$ sabit alınarak pertürbasyon kapasitesi sırasıyla $C_p = 0.8\text{pF}$ ve $C_p = 0.15\text{pF}$ alınarak lineer faz ve eliptik frekans cevabı için teorik cevap Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19: Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün teorik cevabı.

3.3 Pertürbasyon Elemanı İle Çift Modlu Rezonatör Tasarımlarında Bulanık Mantık Uygulamaları

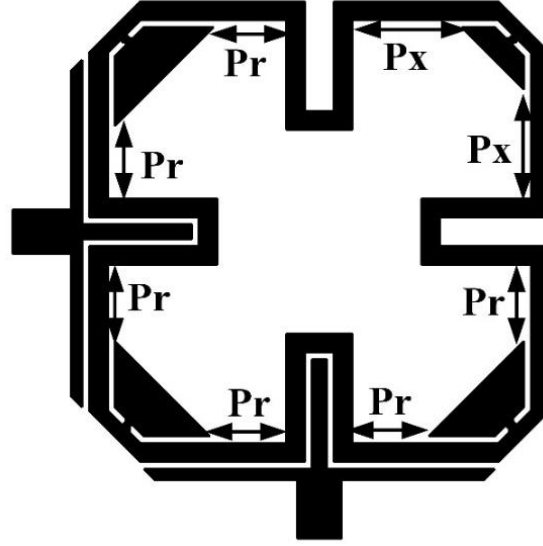
Mikrodalga filtre tasarımlarında pertürbasyon etkisi oluşturularak çift modlu mikroşerit band geçiren filtre tasarım çalışmaları günümüzde popülerliğini koruyan çalışmalardandır. Bu çalışmalarda özellikle pertürbasyon etkisini sağlayacak, pertürbasyon elemanının boyutlarının doğru tayin edilmesi dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan biridir. Lakin teorik analizler sonucu elde edilmiş pertürbasyon elemanı boyutlarında bile filtrelerin geometrisinden ve kompleksliğinden günlerce süren simülasyon çalışmalarının ardından arzu edilen frekans cevapları bulunamayabilir. Bu sebeple çalışmanın bu kısmında pertürbasyon ve referans elemanına sahip rezonatör üzerinden bulanık mantık ile istenilen frekans cevabı için optimum eleman boyutlarının bulunabilirliği test edilmek istenmiştir.

Bulanık mantık (Fuzzy Logic) kavramı, California Berkeley Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Lotfi A. Zadeh tarafından 1965 yılında yayınlanan makale ile ilk kez ortaya atılmıştır. Günümüzde özellikle yapay zeka uygulamalarında kullanılmaktadır. Belirsizlikleri anlatmak ve belirsizliklerle çalışmak üzere kurulan katı bir matematik düzen şeklinde ifade edilebilir.

Bulanık sistemlerde, elde bulunan veriler içinden seçilmiş olan girdi değişkenleri ile çıktı değişkenlerini elde edebilmek için bulanık küme ile ilgili ilkeleri kullanırlar. Bulanık sistemlerin diğer sistemlere göre en büyük avantajı, sözel verilerin ve insan deneyimlerinin bulanık modele eklenmesi ile çözüme ulaşılmasıdır. Yani modele ait değişkenler bulanık alt kümeler ile temsil edilir ve klasik küme işlemleri genelleştirilerek elde edilen bulanık küme işlemleri ile sonuca ulaşılır.

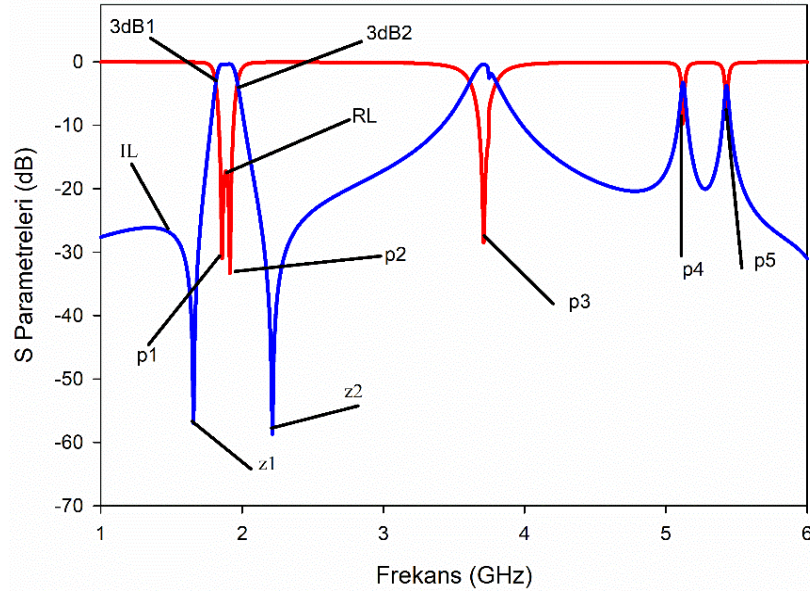
Şekil 3.20’de pertürbasyon ve referans elemanına sahip içe kıvrımlı köşe kesim kare halka rezonatör yapısı verilmiştir. Bu yapıda p_x pertürbasyon elemanının boyutunu ayarlayan parametre iken, p_r ise referans elemanının boyutunu ayarlayan parametredir. Verilen filtrede fuzzy model uygulanabilirliğini test etmek için üzerinde çalışılabilecek bir datanın olması gerekir. Bu sebeple ilk olarak verilen filtrede parametrik çalışma yapılmıştır.

İlk olarak p_x parametresi 1mm'den başlayarak 3.7mm'ye kadar 0.1mm adımlarla değiştirilmiştir. Bununla beraber p_r parametresi de 1mm'den başlayarak 3.7mm'ye kadar 0.1mm adımlarla değiştirilmiştir. Tamamlanan simülasyon çalışmalarının ardından frekans cevabı üzerinden fuzzy model uygulanacak data hazırlanmıştır.



Şekil 3.20: Bulanık mantık çalışması için incelenen filtre yapısı.

Fuzzy model uygulanacak data hazırlanırken her bir parametre değişiminde ilgili frekans cevabı üzerinden okunan değerler ile excel tablosu oluşturulmuştur. Frekans cevabı üzerinden okunan değerlerde ilgili değerlerin frekans ve dB değerleri kaydedilmiştir. Parametre değişimine karşı frekans cevabında okunan değerler ise geri dönüş kaybı, araya girme kaybı, ilk band için üç desibel noktaları, sıfır ve kutup noktalarıdır. Bu değerlerin frekans cevabı üzerinden nasıl okunduğuna dair Şekil 3.21'deki grafikte gösterilmiştir.



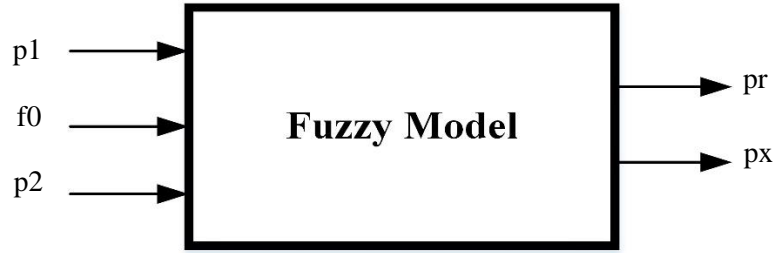
Şekil 3.21: Data hazırlanmasında okunan değerler için bir örnek frekans cevabı.

Tablo 3.1: Fuzzy model uygulaması için hazırlanan data seti için kesit excel tablosu.

pr	px	IL/GHz		z1		3dB1		p1		RL/GHz		f0	p2		3dB2	
2.9	1	-26.673	1.325	-57.8764	1.62	-3.59806	1.77	-28.3771	1.81	-14.8549	1.835	1.835	-30.1386	1.865	-3.22277	1.915
2.9	1.1	-26.5007	1.34	-57.3237	1.63	-3.27802	1.775	-32.0785	1.815	-18.3706	1.84	1.84	-32.1049	1.865	-2.99551	1.915
2.9	1.2	-26.3231	1.355	-53.8531	1.64	-2.98352	1.78	-33.3733	1.825	-25.1981	1.84	1.84	-33.2923	1.86	-3.40525	1.91
2.9	1.3	-26.1393	1.375	-54.6713	1.655	-3.52943	1.79	-37.7753	1.845	-37.7753	1.845	1.845	-37.7753	1.845	-3.137	1.91
2.9	1.4	-25.9488	1.395	-56.1833	1.665	-3.19788	1.795	-21.1941	1.85	-21.1941	1.85	1.85	-21.1941	1.85	-3.53374	1.905
2.9	1.5	-25.7506	1.415	-52.1524	1.675	-3.73437	1.805	-15.8156	1.85	-15.8156	1.85	1.85	-15.8156	1.85	-3.22212	1.905
2.9	1.6	-25.5437	1.435	-54.0584	1.69	-3.36016	1.81	-12.3377	1.855	-12.3377	1.855	1.855	-12.3377	1.855	-3.57014	1.9
2.9	1.7	-25.3265	1.455	-52.809	1.7	-3.01417	1.815	-9.86543	1.855	-9.86543	1.855	1.855	-9.86543	1.855	-3.20877	1.9
2.9	1.8	-25.0976	1.475	-51.5545	1.715	-3.39989	1.825	-7.90676	1.86	-7.90676	1.86	1.86	-7.90676	1.86	-3.45697	1.895
2.9	1.9	-24.8542	1.5	-51.6234	1.725	-3.691	1.835	-6.34404	1.86	-6.34404	1.86	1.86	-6.34404	1.86	-3.6197	1.89
2.9	2	-24.5928	1.525	-50.6003	1.74	-3.78431	1.845	-5.05255	1.865	-5.05255	1.865	1.865	-5.05255	1.865	-3.63635	1.885
2.9	2.1	-24.3083	1.55	-48.1286	1.75	-3.58718	1.855	-3.99108	1.865	-3.99108	1.865	1.865	-3.99108	1.865	-3.75507	1.875

Tablo 3.1 ile verilen tabloda tüm tablo verilemeyeceğinden bir parametre değişimi için oluşturulan tablodan bir kesit verilmiştir. Toplamda ise 785 satırlık veri tabloya girilmiştir. Verilen tabloya ve Şekil 3.21'deki grafik incelenecek olursa tablo pertürbasyon ve referans elemanlarının etkilediği çift mod bandının değerleri ile oluşturulmuştur. Arzu edilirse harmoniklerin kutup ve sıfırları da tabloya eklenerek data genişletilebilir. Üzerinde çalışılacak data seti hazırlandıktan sonra fuzzy model uygulanabilirliğini görmek amacıyla neurusolution programı kullanılmıştır.

Fuzzy modelin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla üç girişli iki çıkışlı bir fuzzy model tercih edilmiştir. Üzerinde çalışılan filtrede pertürbasyon ve referans elemanlarının etkisi incelendiğinden giriş verileri olarak çift modlu bandın kutupları ve merkez frekansı alınmıştır. Modelin çıkışları ise pertürbasyon ve referans elemanının boyut parametreleri olan p_x ve p_r dir.



Şekil 3.22: Uygulanan fuzzy model.

Neurosolution programında tanımlanan fuzzy model sonunda program çıktısı olarak üç girişe karşılık hesaplanan çıkışlar Tablo 3.2’de verilmiştir. Sonunda program çıktısı olarak en küçük kareler yöntemiyle hesapladığı değerleri ve minimum maksimum hata yöntemiyle hata Tablo 3.3’te verilmiştir. Mikrodalga filtrelerde bulanık mantık uygulamaları kapsamındaki çalışmalar yüksek lisans sonrası çalışmalar olarak devam edecektir.

Tablo 3.2: Üç giriş-iki çıkış fuzzy model için üretilen sonuçlar.

p1	f0	p2	pr	px	pr Output	px Output
1.835	1.835	1.835	2	3	1.999827	2.805705
1.835	1.835	1.835	2	3.1	1.999827	2.805705
1.84	1.84	1.84	2	3.2	2.041289	2.886334
1.84	1.84	1.84	2	3.3	2.041289	2.886334
1.84	1.84	1.84	2	3.4	2.041289	2.886334
1.84	1.84	1.84	2	3.5	2.041289	2.886334
1.845	1.845	1.845	2	3.6	2.081941	2.965846
1.845	1.845	1.845	2	3.7	2.081941	2.965846
1.8	1.8	1.8	2.1	1	1.659801	2.183766
1.805	1.805	1.805	2.1	1.1	1.71075	2.279187
1.805	1.805	1.805	2.1	1.2	1.71075	2.279187
1.81	1.81	1.81	2.1	1.3	1.761517	2.378751
1.81	1.81	1.81	2.1	1.4	1.761517	2.378751
1.815	1.815	1.815	2.1	1.5	1.814626	2.463689
1.82	1.82	1.82	2.1	1.6	1.865586	2.554203

Tablo 3.3: Hesaplanan hata değerleri.

Performance	pr	px
MSE	0.239370371	0.970821218
NMSE	2.708492854	1.464639945
MAE	0.427015551	0.792713575
Min Abs Error	0.00017306	0.001942242
Max Abs Error	1.22597085	2.721745959
r	0.574246214	0.517138807
Percent Correct	0	100

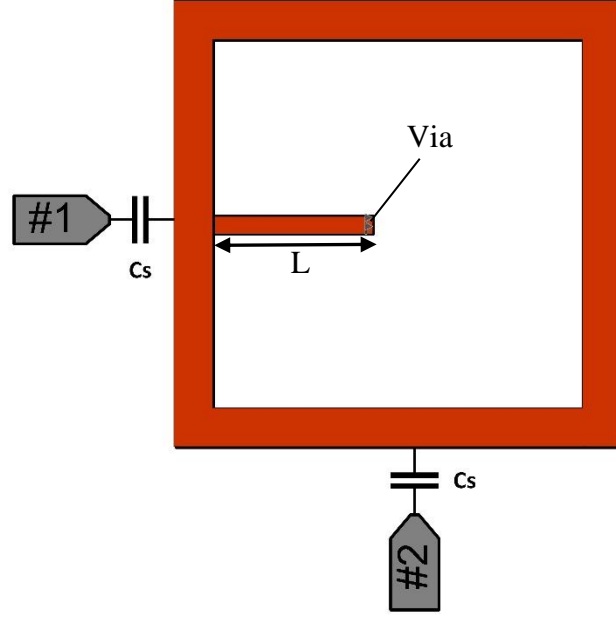
4. YAT HATLI KARE HALKA REZONATÖR TASARIMI

Yan hatlı filtre tasarımlarında açık devre ya da kısa devre sonlandırılmış mikroşerit hatlar kullanılır. Açık devre sonlandırılmış yan hatlı filtrelerde, mikroşerit hatlarının yan hatları ana hatla belirli bir açıyla kesişir ve her bir yan hattın sonunda açık devre sonlandırması yapılır. Bu sonlandırma, yan hat üzerinde yüksek empedanslı bir durum oluşturur ve belirli frekanslarda istenmeyen modların (harmoniklerin veya diğer yan modların) baskılanmasına yardımcı olur. Açık devre sonlandırılmış yan hatlı filtreler, genellikle bir veya daha fazla rezonans devresi içeren band geçiren veya band durduran filtrelerde kullanılır. Filtre tasarımında, yan hatların genişlikleri, uzunlukları ve konumları dikkatlice belirlenir ve süreksizliklerin etkileri hesaba katılır. Bu sayede filtre, istenilen frekans bantlarında yüksek performans sağlar.

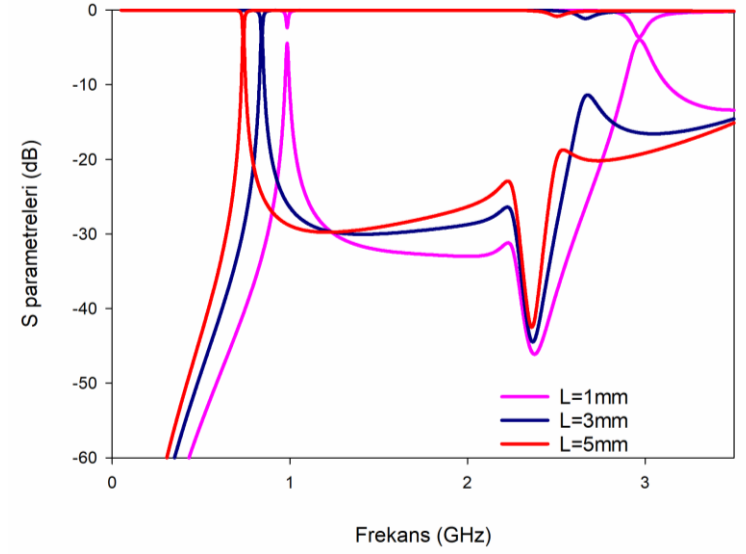
Kısa devre sonlandırılmış yan hatlı filtrelerde, yan hatlar ana hatla belirli bir açıyla kesişir ve her bir yan hattın sonunda kısa devre sonlandırması yapılır. Kısa devre sonlandırma, yan hat üzerinde düşük empedanslı bir durum oluşturur ve belirli frekans aralıklarında istenmeyen modların bastırılmasına yardımcı olur. Kısa devre sonlandırılmış yan hatlı filtreler, genellikle dar bantlı filtrelerde, kesme frekansları veya rezonans frekanslarına yönelik yüksek seçicilik gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu filtrelerde, yan hatların geometrisi ve konumlaması, filtrenin karakteristiklerini belirler ve filtre tasarımı için dikkatli bir analiz gerektirir.

4.1 Kısa Devre Sonlandırılmış Yan Hatlar İle Kare Halka Rezonatör Filtre Tasarımı

Bu bölümde ilk aşamada kare halka rezonatör üzerinde önce kısa devre sonlanmış tek bir hat kullanarak ve bu yan hat rezonatörün her bir kenarın orta noktasına yerleştirilerek dört farklı konum için incelenmiştir. Daha sonra kısa devre sonlandırılmış yan hatların sayısı artırılarak en son rezonatörün dört kenarlarının orta noktasında yan hatlar olacak şekilde tasarımı yapıp incelenmiştir. Sonrasında aynı işlemler açık devre sonlandırılmış yan hatlar ile gerçekleştirilmiştir. Kuplaj kapasitesi yapılan tüm analizlerde 0.55pF olarak alınmıştır.

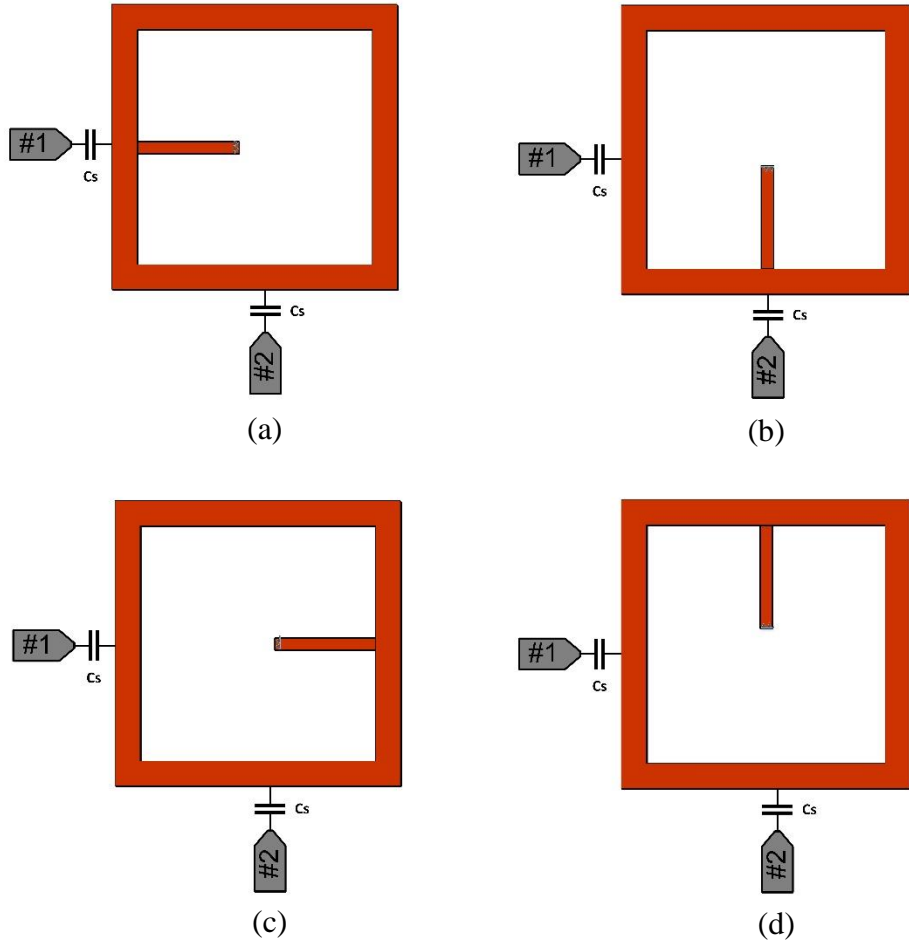


Şekil 4.1: Kısa devre sonlandırılmış tek yan hatlı kare halka rezonatör.

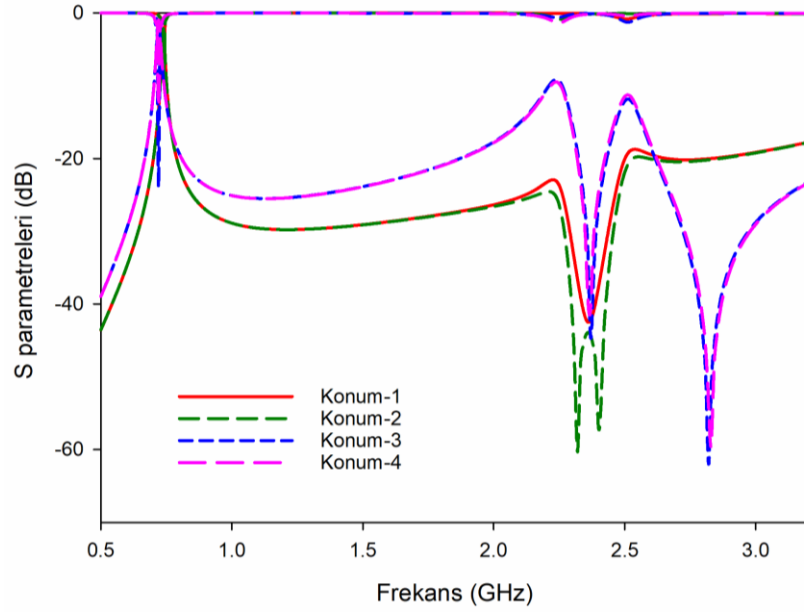


Şekil 4.2: Kısa devre sonlanmış yan hattın uzunluğunun frekans cevabına etkisi.

Şekil 4.2 ile verilen grafik ile kısa devre sonlanmış yan hattın uzunluğu arttıkça filtre cevabının daha düşük frekanslara kaydığı gözlemlenmiştir. Yan hat ile düşük frekanslarda tek mod band elde edilmiş oldu. Şekil 4.1’de verilen mikroşerit yan hattın konumu değiştirilerek yan hattın ana hatta bağlandığı yerin frekans cevabı üzerindeki etkisi Şekil 4.4’te gösterilmiştir. Tüm konumlarda hatların boyutu 5mm alınmıştır.

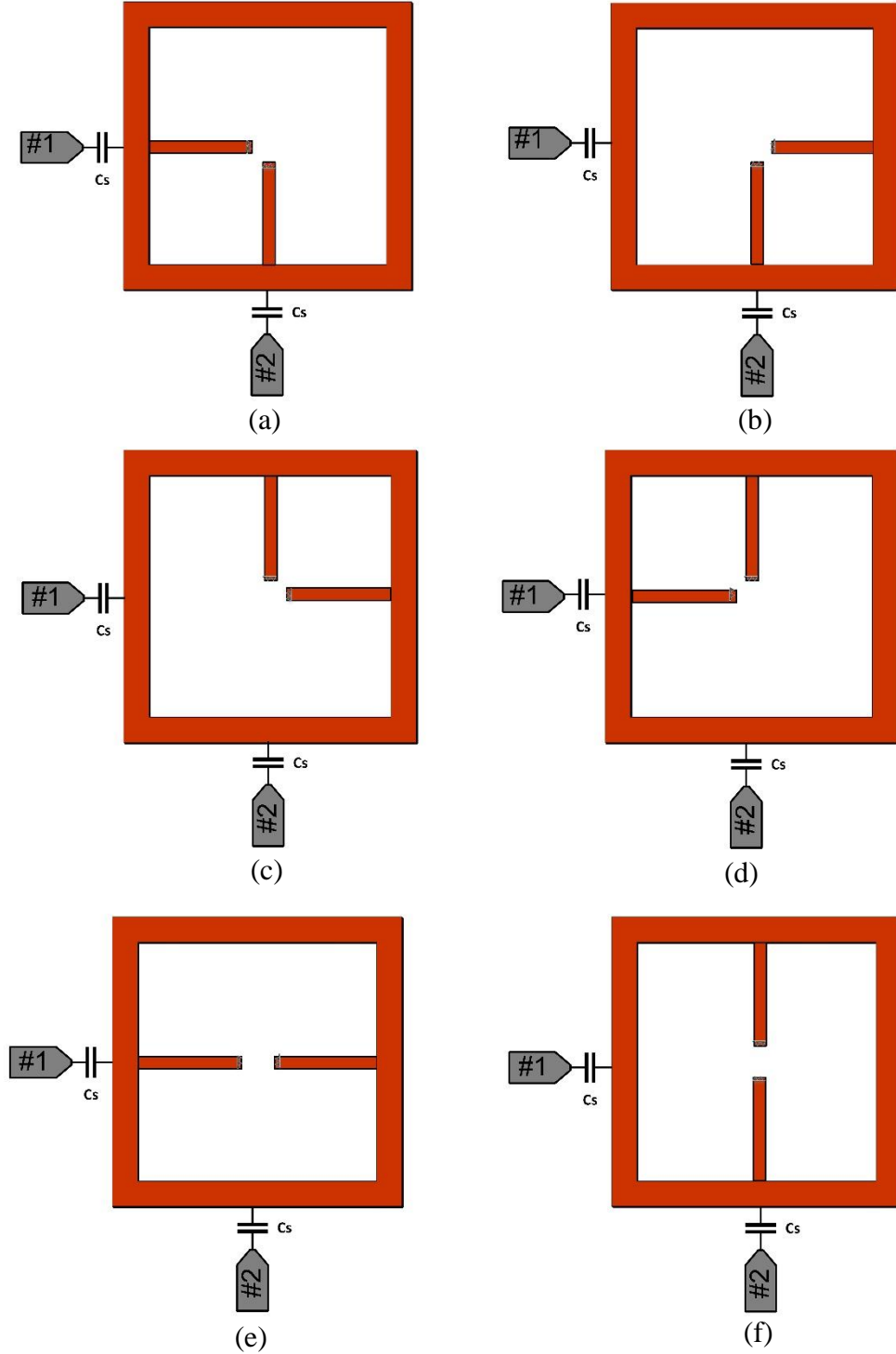


Şekil 4.3: Kısa devre sonlanmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4.

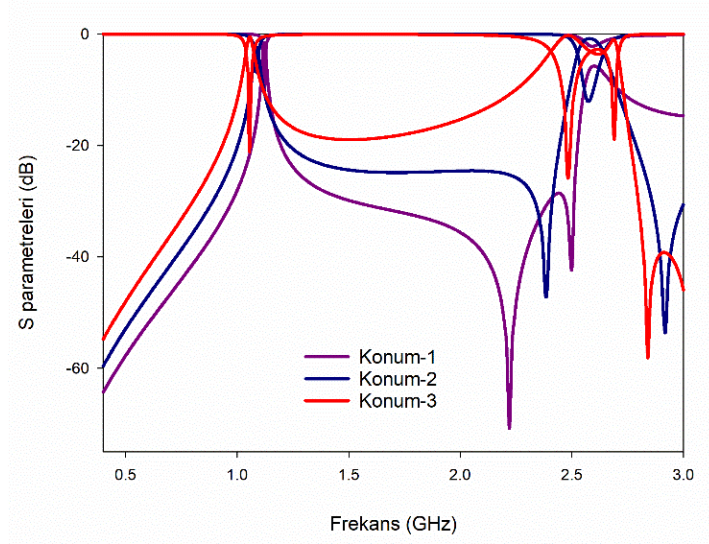


Şekil 4.4: Kısa devre sonlanmış yan hattın rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesinin frekans cevabına etkisi.

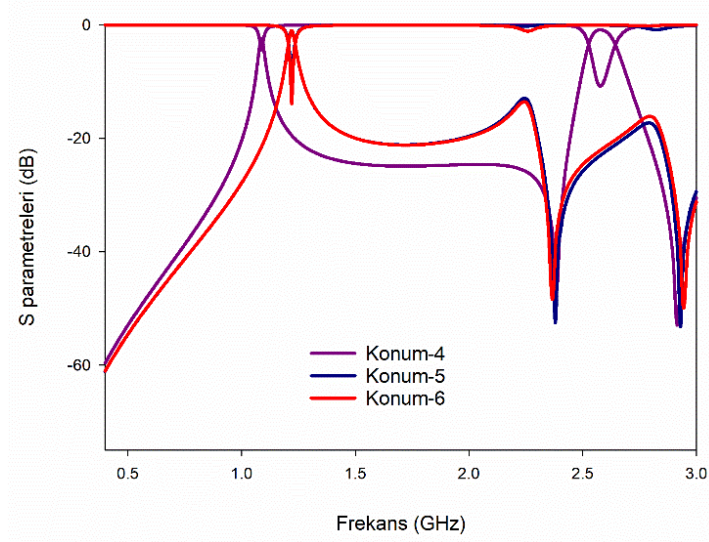
Yan hattın konumunun değişmesi tek modlu band üzerinde çok etkisinin olmadığı görülmektedir. Fakat frekans cevabı üzerinde yan hatların sıfırları oluşturduğu görülmektedir. Daha sonra iki kısa devre sonlanmış hat kullanılarak tasarım gerçekleştirilmiştir. İki yan hattın rezonatörde altı farklı konumu için frekans cevabı Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 'de verilmiştir.



Şekil 4.5: İki adet kısa devre sonlandırılmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4, (e) Konum 5, (f) Konum 6.

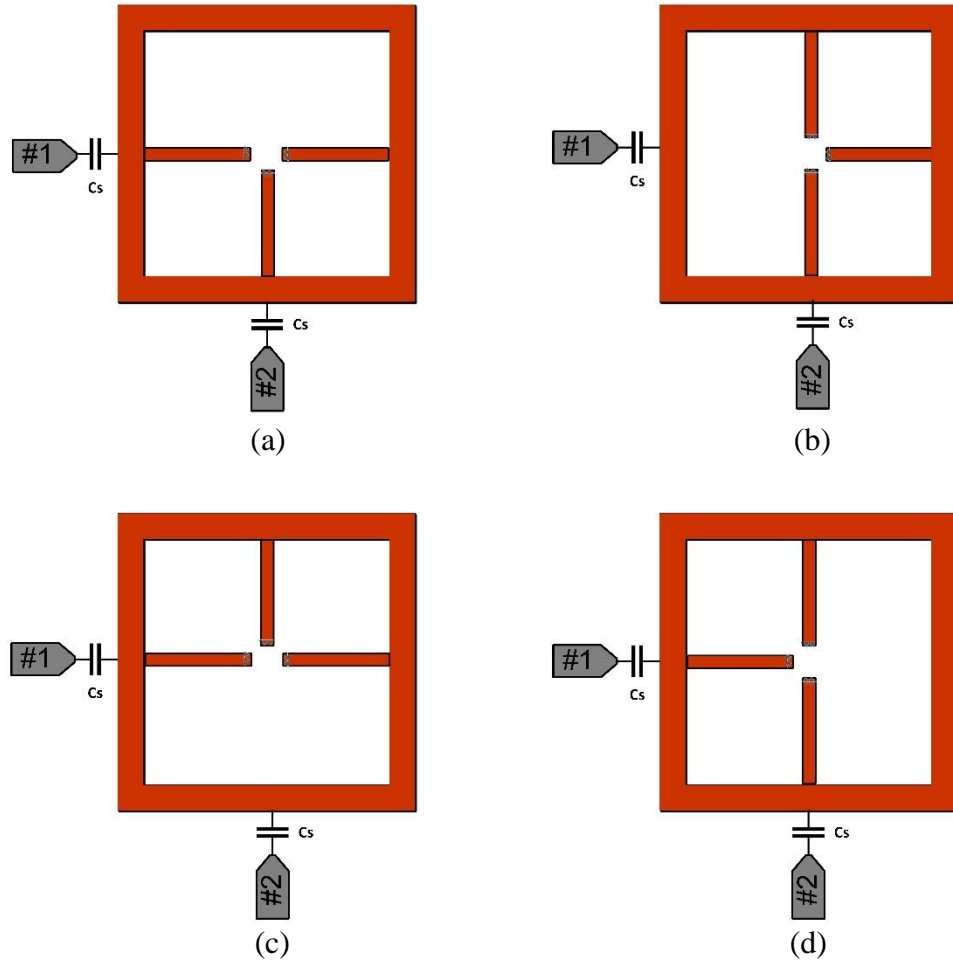


Şekil 4.6: İki kısa devre sonlanmış yan hattın ilk üç konum için frekans cevabı.

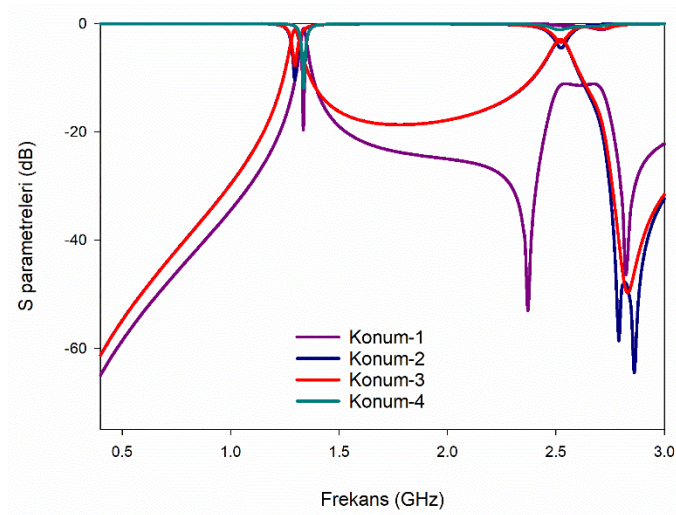


Şekil 4.7: İki kısa devre sonlanmış yan hattın son üç konum için frekans cevabı.

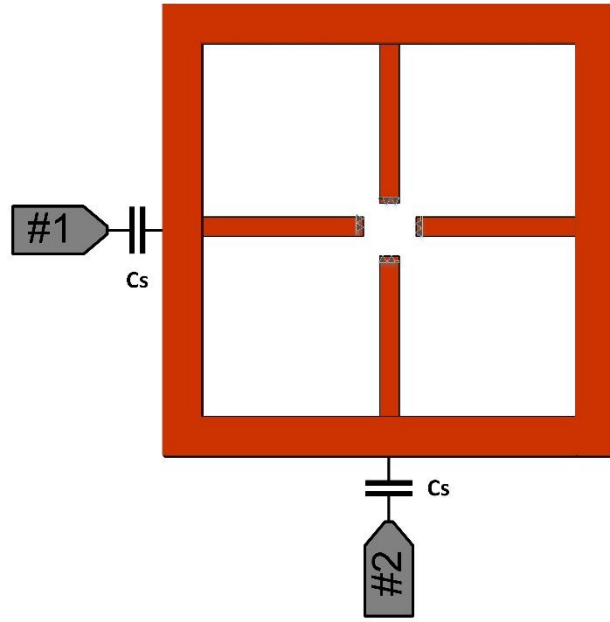
İki kısa devre sonlanmış yan hat tasarımlarında yan hatların boyutları bandların daha iyi gözlemlenmesi için 4mm olarak alınmıştır. İki yan hat kullanımında tek yan hatta olduğu gibi tek bandın oluştuğu görülürken aynı zamanda bazı konumlarda ikinci bir bandında oluştuğu görülmektedir. İkili yan hat çalışmaları verildikten sonra sırada üç adet kısa devre sonlandırılmış yan hatları kullanılmasıyla rezonatörde 4 farklı konumda filtre cevabı incelenmiştir. Üçlü kısa devre sonlandırılmış yan hat çalışmalarında yan hatların boyutu tekrar 5 mm olarak alınmıştır.



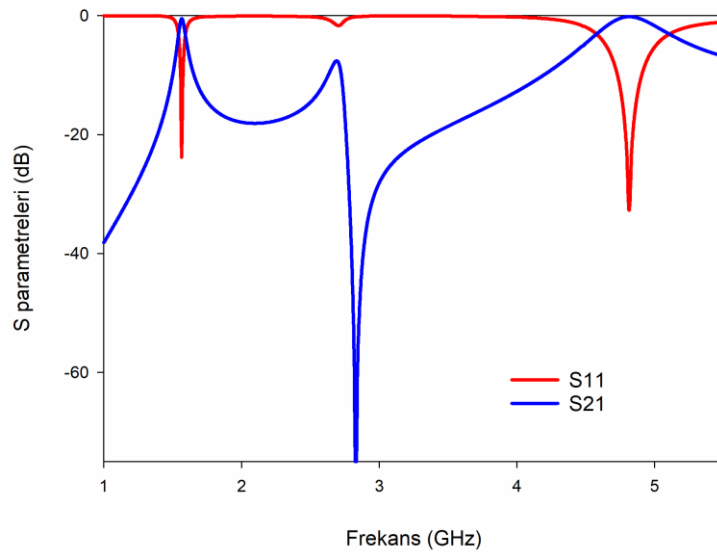
Şekil 4.8: Üç adet kısa devre sonlandırılmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4.



Şekil 4.9: Üç adet kısa devre sonlanmış yan hattın rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesinin frekans cevabına etkisi.

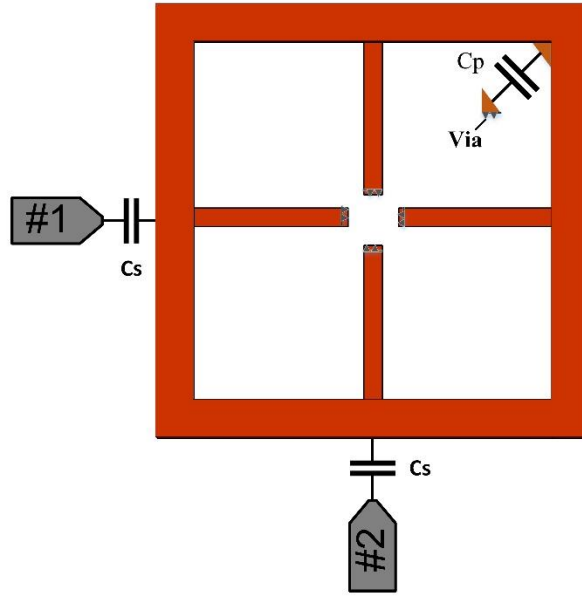


Şekil 4.10: Dört adet kısa devre sonlanmış yan hatlı kare halka rezonatör.

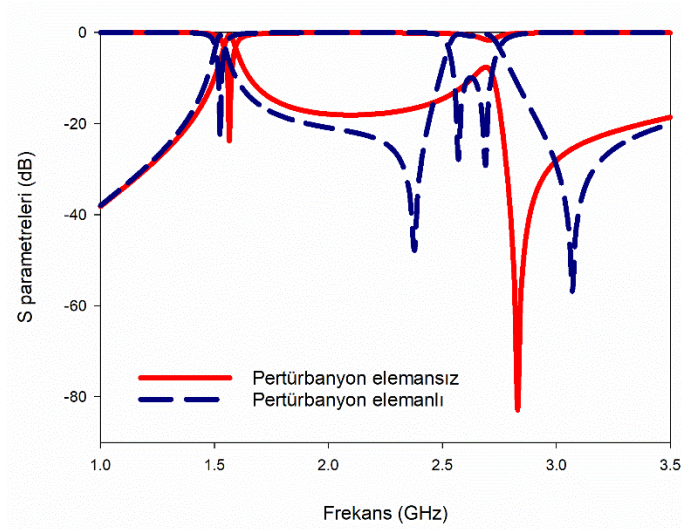


Şekil 4.11: Dört adet kısa devre sonlanmış yan hatlı kare halka rezonatör frekans cevabı.

Kısa devre yan hatlar ile tasarım tamamlandıktan sonra dört yan hatlı filtreye pertürbasyon elemanı eklenmiştir. Eklenen pertürbasyon kapasitesinin değeri 0.55pF olarak alınmıştır. Pertürbasyon elemanının eklenmesiyle bir adet tek mod, bir adet iki mod olmak üzere iki band elde edilmiştir. Pertürbasyon elemanının eklenmesi Şekil 4.11’de verilen grafikten yaklaşık 2.7GHz’lerde iki modlu band elde edilmiştir.



Şekil 4.12: Pertürbasyon elemanlı kısa devre sonlandırılmış yan hatlı kare halka rezonatör.

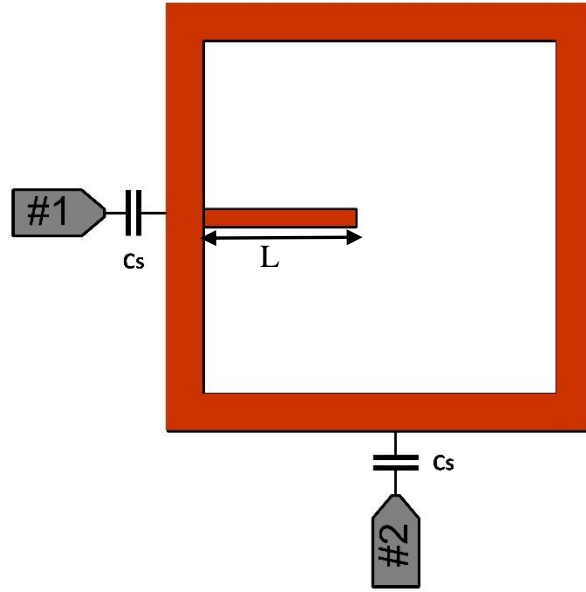


Şekil 4.13: Kısa devre sonlandırılmış yan hatlı kare halka rezonatörde pertürbasyon elemanının etkisi.

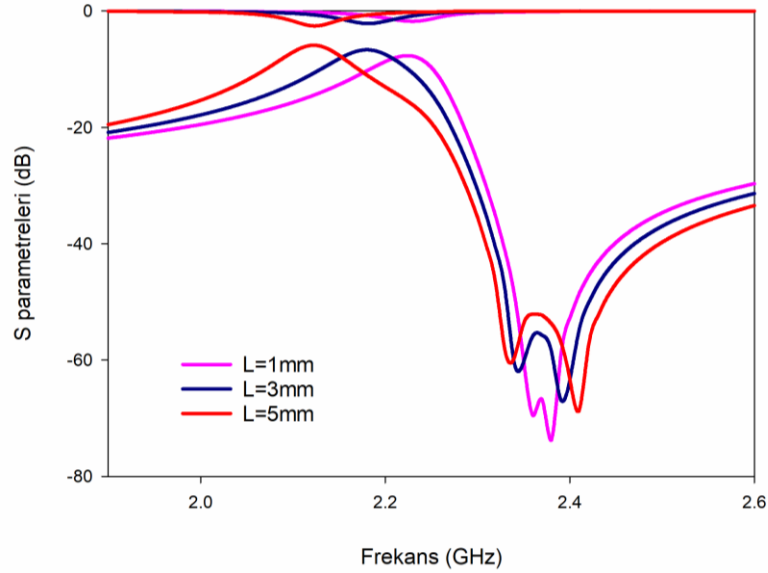
4.2 Açık Devre Sonlanmış Yan Hatlar İle Kare Halka Rezonatör Filtre Tasarımı

Çalışmanın bu kısmında bir önceki bölümde anlatılan kısa devre sonlandırılmış yan hatlar ile gerçekleştirilen çalışmalar, kısa devre sonlandırılmış hatlar yerine açık devre sonlandırılmış hatlar kullanılarak tekrar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak tek bir açık devre sonlanmış yan hat alınarak yan hattın uzunluğu değiştirilerek frekans cevabı

üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan tüm tasarımlarda yan hattın uzunluğu 5mm ve kalınlığı 0.6 mm alınmıştır.

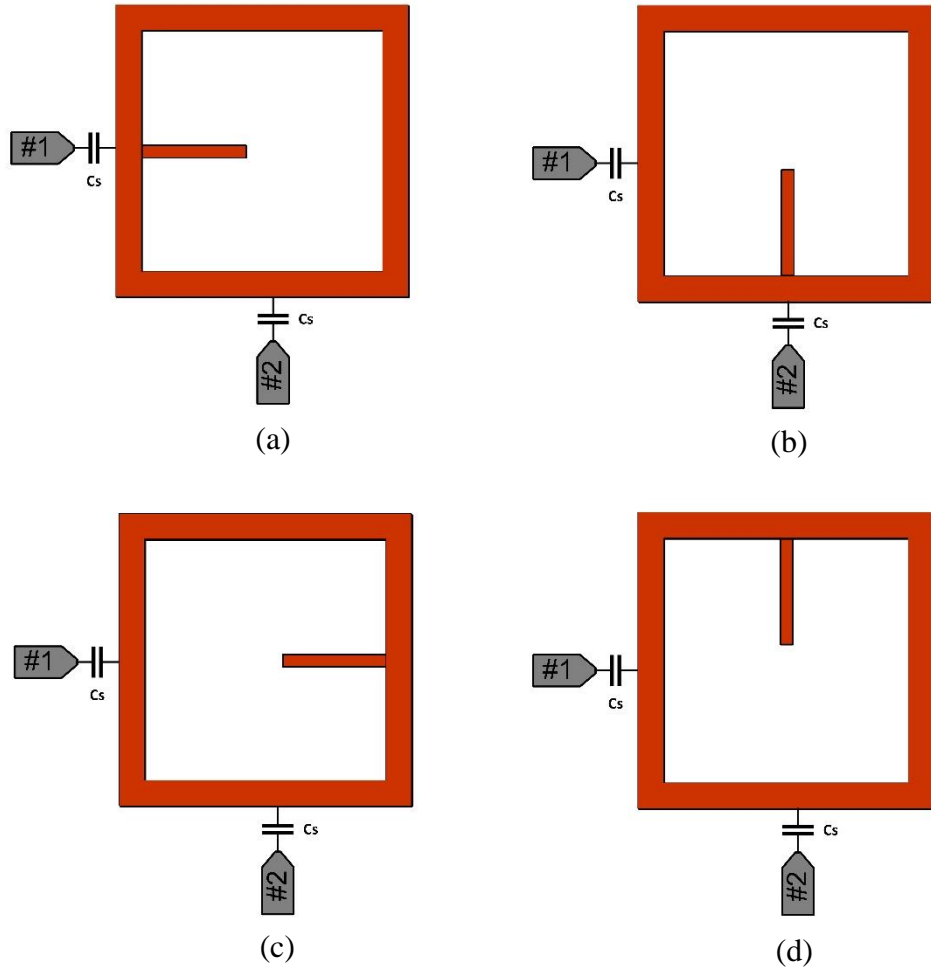


Şekil 4.14: Açık devre sonlanmış yan hattın uzunluğunun frekans cevabına etkisi.

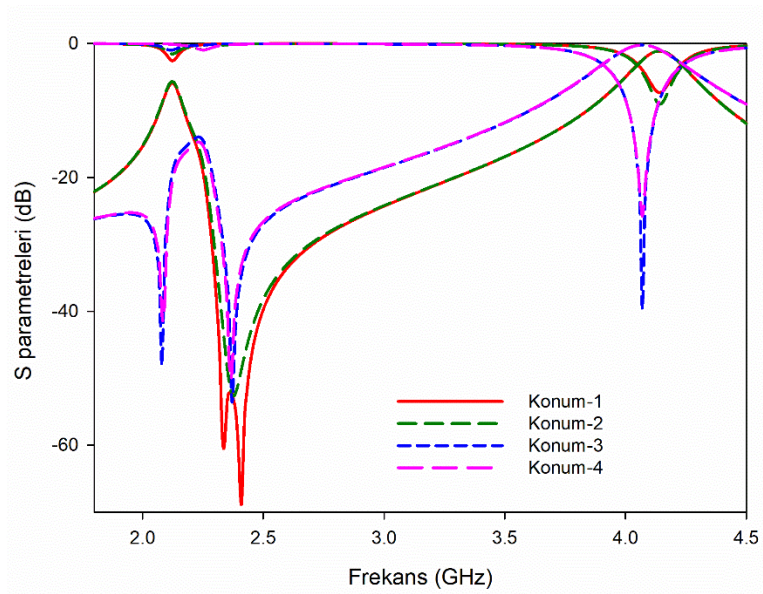


Şekil 4.15: Açık devre sonlanmış yan hattın uzunluğunun frekans cevabına etkisi.

Açık devre sonlandırılmış hattın uzunluğu arttıkça frekans cevabı daha küçük frekanslara kaymıştır. Daha sonra açık devre sonlandırılmış hat rezonatörde farklı konumlara yerleştirilerek frekans cevabı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

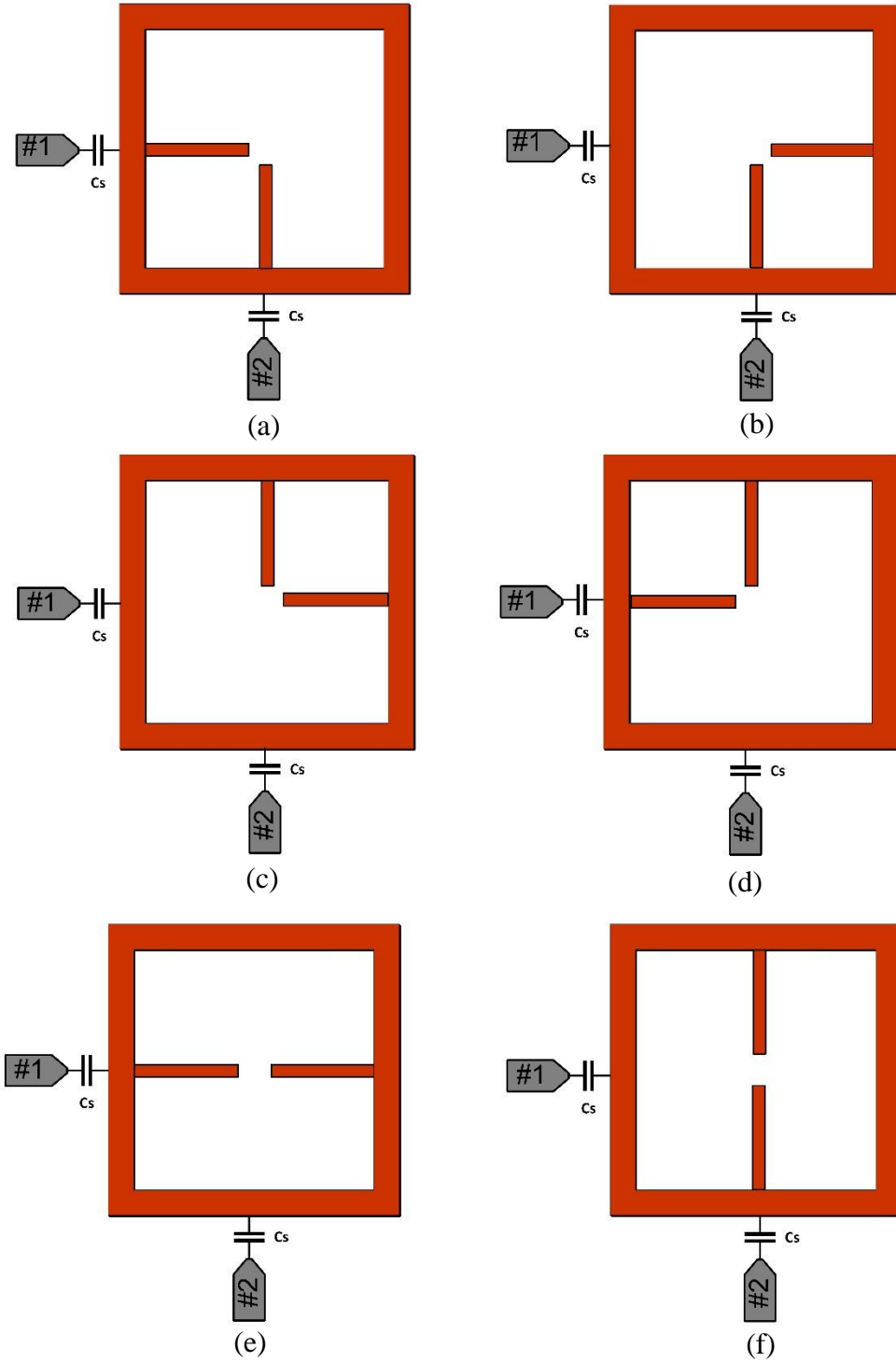


Şekil 4.16: Açık devre sonlanmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi
 (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4.

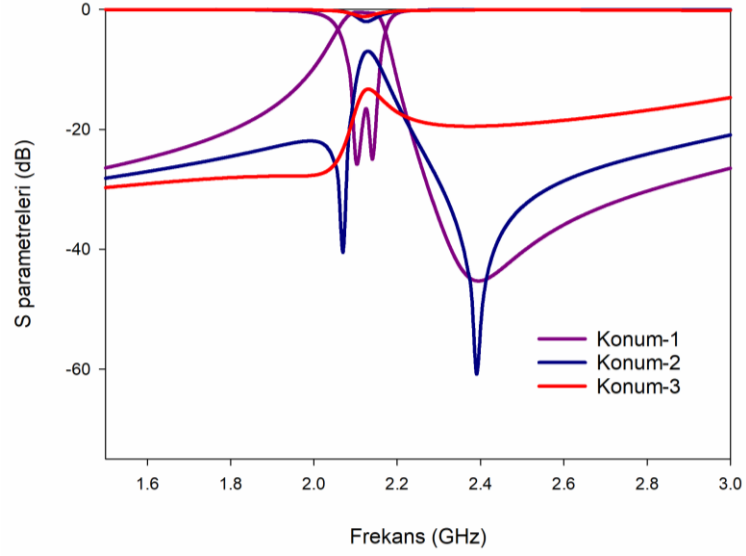


Şekil 4.17: Açık devre sonlanmış yan hattın rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesinin frekans cevabına etkisi.

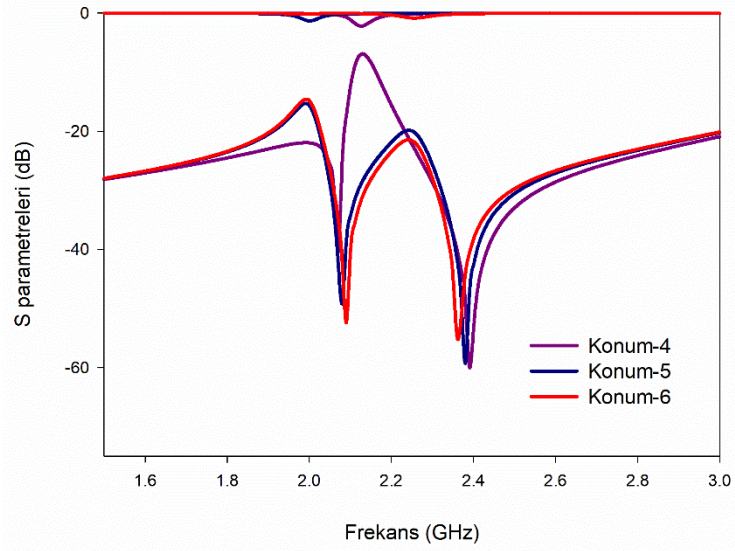
Bir sonraki aşamada iki adet açık devre sonlandırılmış yan hattın kullanılarak rezonatörde altı farklı konum için frekans cevabı incelenmiştir.



Şekil 4.18: İki adet açık devre sonlandırılmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4, (e) Konum 5, (f) Konum 6.

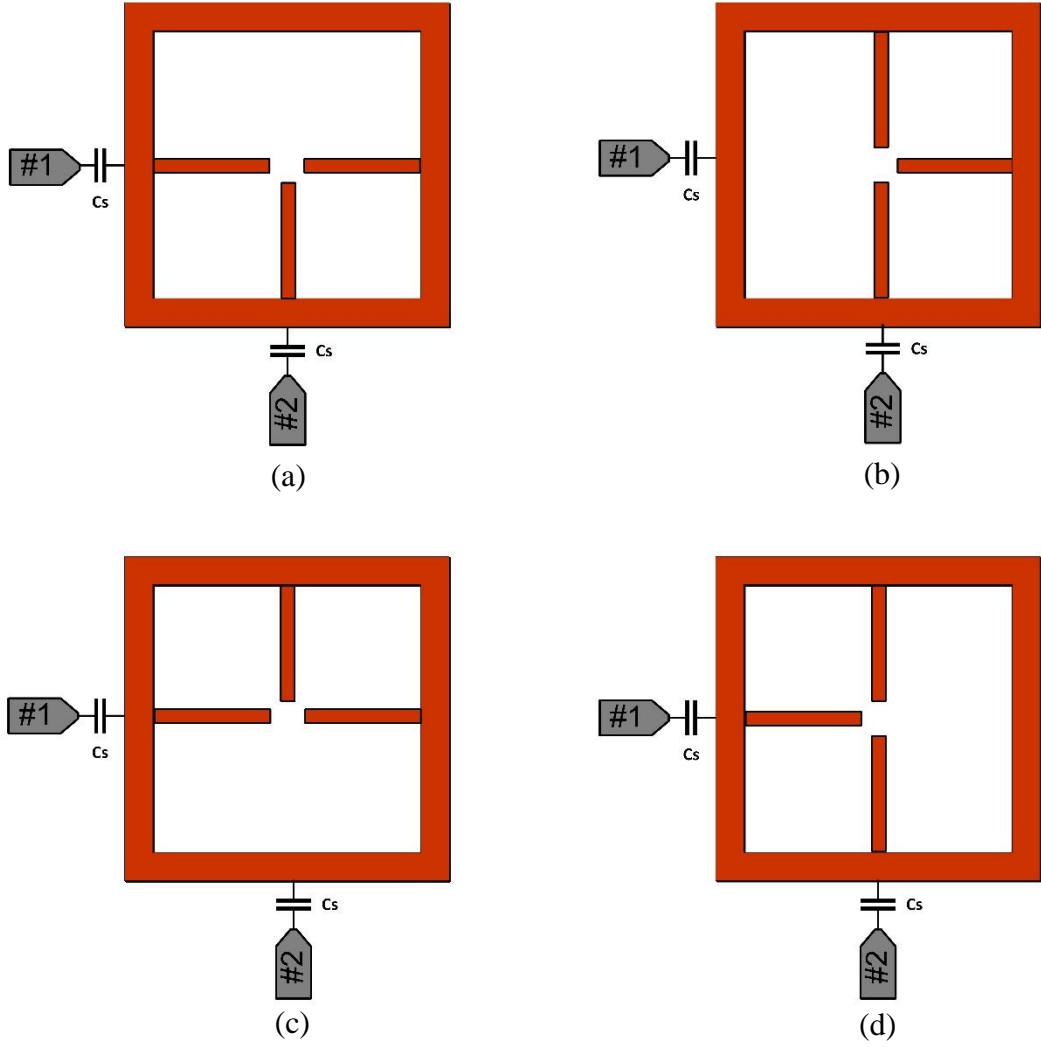


Şekil 4.19: İki açık devre sonlanmış yan hattın ilk üç konum için frekans cevabı.

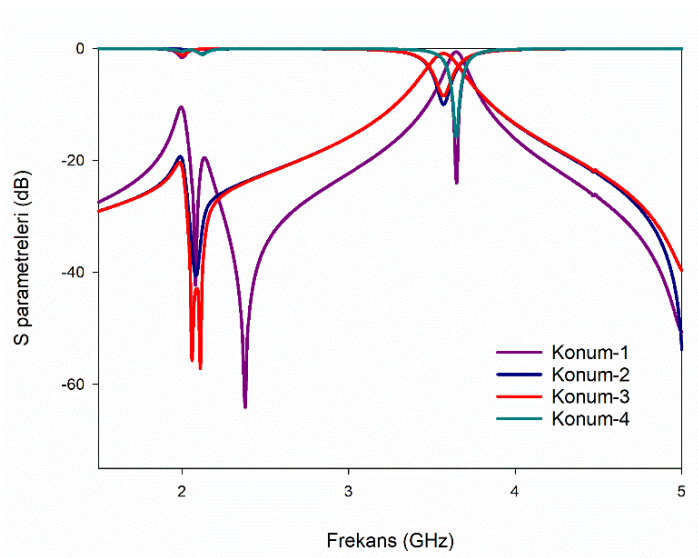


Şekil 4.20: İki açık devre sonlanmış yan hattın son üç konum için frekans cevabı.

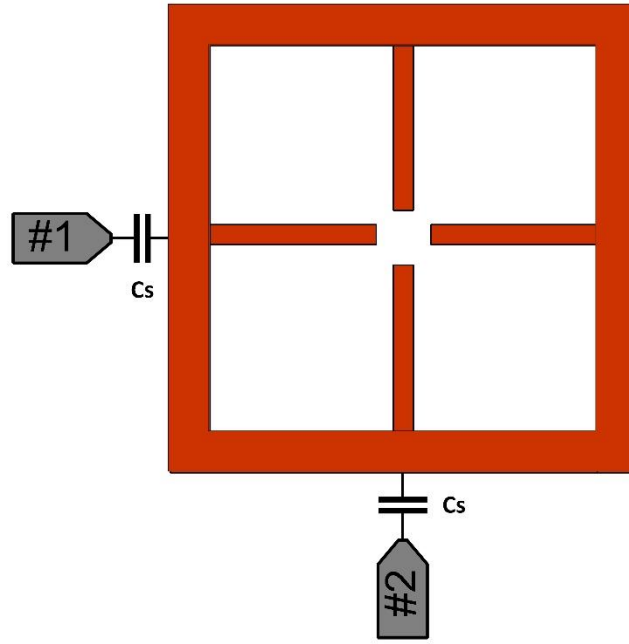
İki açık devre sonlandırılmalı yan hatlı tasarımda sadece konum-1 için band oluştuğu gözlemlenmiştir. Diğer konumlarda düzgün bir band gözükmemiştir. Aynı zamanda frekans cevabı olarak lineer faz, eliptik frekans cevaplarının oluşabileceği gözlemlenmiştir.



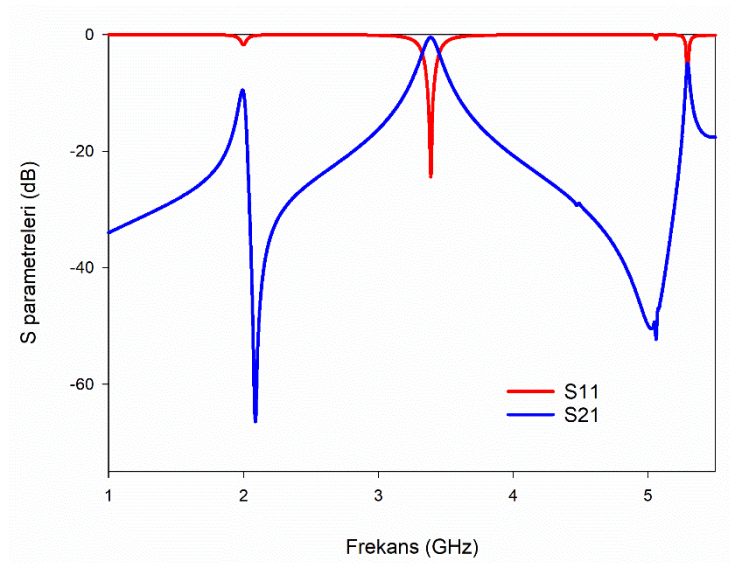
Şekil 4.21: Üç adet açık devre sonlandırılmış yan hattın kare halka rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesi (a) Konum 1, (b) Konum 2, (c) Konum 3, (d) Konum 4.



Şekil 4.22: Üç adet kısa devre sonlanmış yan hattın rezonatörde farklı konumlara yerleştirilmesinin frekans cevabına etkisi.

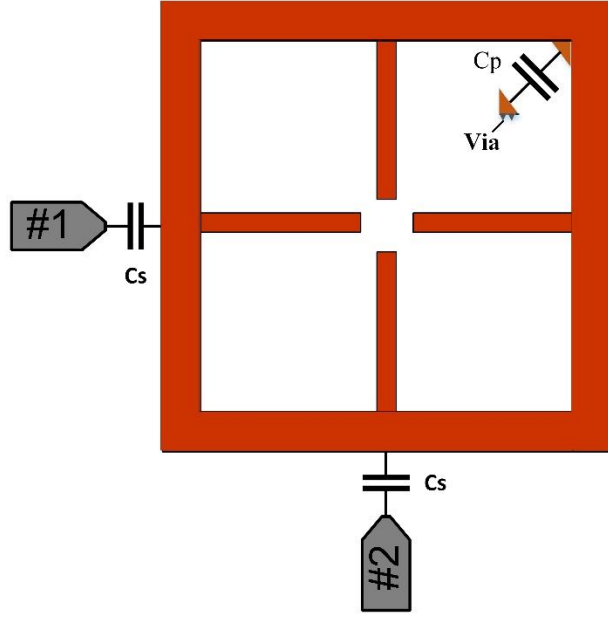


Şekil 4.23: Dört adet açık devre sonlanmış yan hatlı kare halka rezonatör.

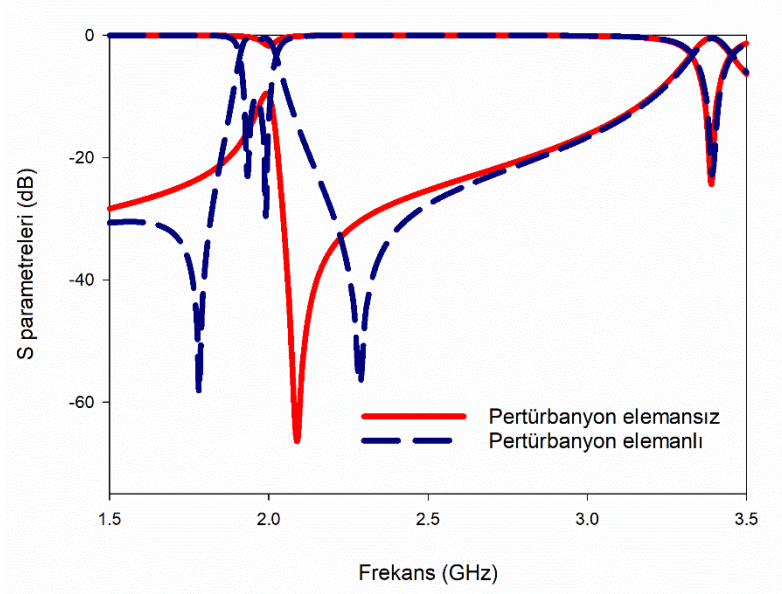


Şekil 4.24: Dört adet açık devre sonlanmış yan hatlı kare halka rezonatör frekans cevabı.

Kısa devre yan hatlar ile tasarım tamamlandıktan sonra dört yan hatlı filtreye pertürbasyon elemanı eklenmiştir. Eklenen pertürbasyon kapasitesinin değeri 0.55pF olarak alınmıştır. Pertürbasyon elemanının eklenmesiyle bir adet tek mod, bir adet iki mod olmak üzere iki band elde edilmiştir. Pertürbasyon elemanının eklenmesi Şekil 4.24'te verilen grafikten yaklaşık 2GHz'lerde iki modlu band elde edilmiştir.



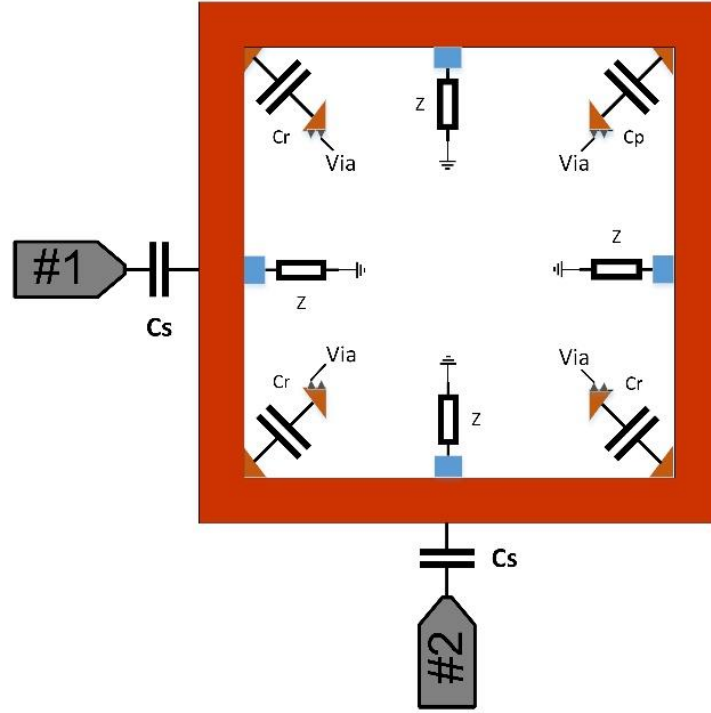
Şekil 4.25: Pertürbasyon elemanı açık devre sonlandırılmış yan hatlı kare halka rezonatör.



Şekil 4.26: Açık devre sonlandırılmış yan hatlı kare halka rezonatörde pertürbasyon elemanın etkisi

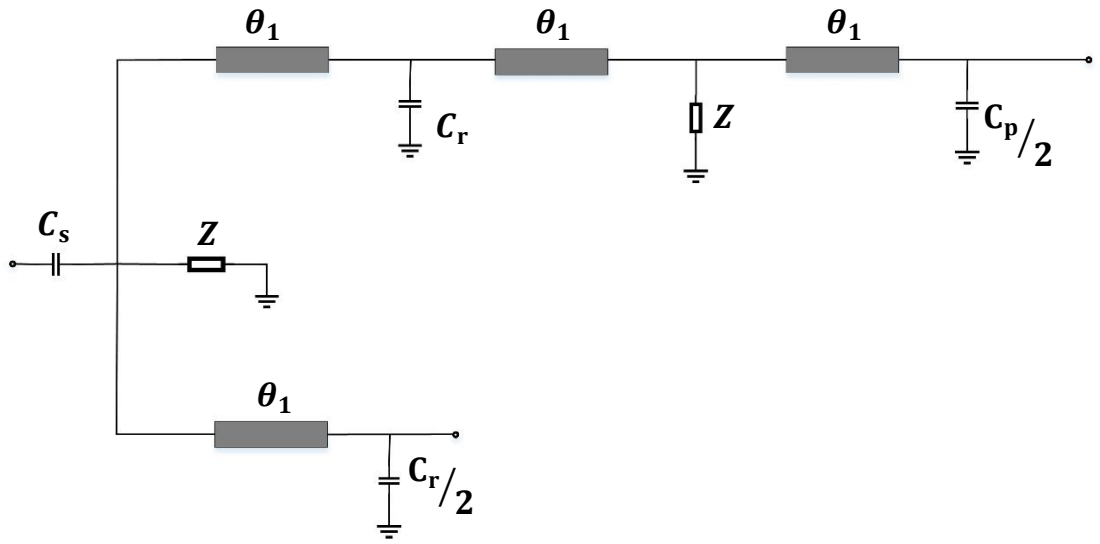
5. YAN HATLI REFERANS VE PERTÜRBASYON ELEMANLI FİLTRE TASARIMI VE ANALİZİ

Bu bölümde pertürbasyon ve referans elemanına sahip rezonatörün her bir kenarının orta noktasından yan hat yükü eklenmiştir. Bu filtrede yan hat yükü bir Z empedansı olarak ifade edilmiştir. Burada $Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$ olarak tanımlanmıştır. Daha sonra Z yükü için önce seri L-C devresi bağlanıp belirli kapasitans ve indüktans değerleri için frekans cevabı incelenmiştir. Sonrasında seri L-C devresi yerine paralel L-C devresi koyularak yine farklı indüktans ve kapasitans değerleri için frekans cevabı incelenmiştir.

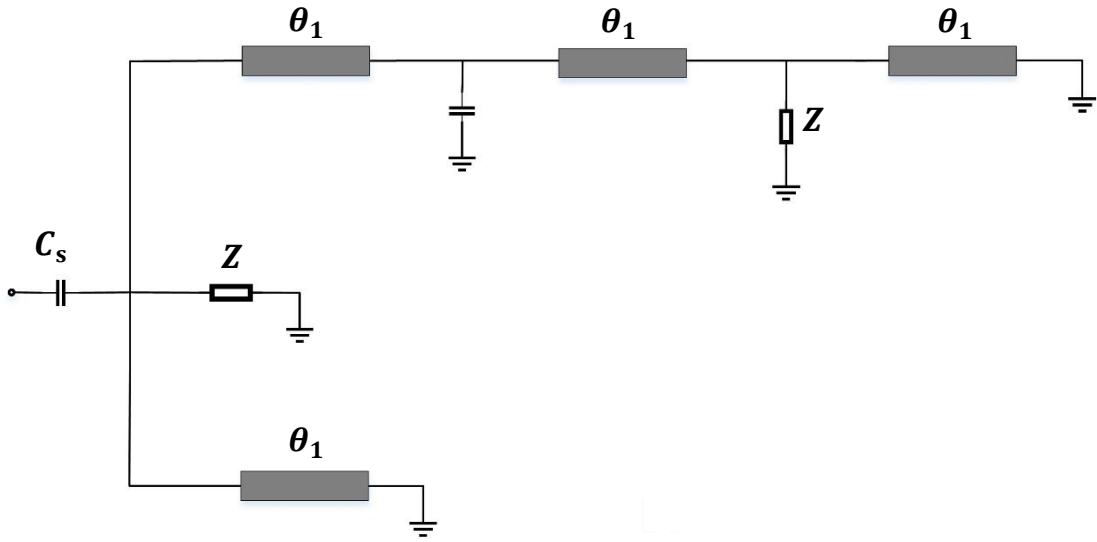


Şekil 5.1: Yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatör.

Bu filtrenin çift ve tek mod eşdeğer devreleri ve bu devreler ile bulunan çift ve tek mod empedansları üzerinden filtrenin teorik cevabı bulunmuştur. Z empedansı seri L-C devresi ve paralel L-C devresi olarak iki ayrı yük için incelenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.2: Yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün eşdeğer yarı devre modelleri (a) Çift mod, (b) Tek mod.

Bu eşdeğer devreler göz önüne alındığında çift mod empedansı hesaplanmıştır. Rezonatör yapısında pertürbasyon elemanı ve referans elemanları aynı kaldığından tekrar hesaplamaya gerek duyulmadan bir önceki rezonatör yapısının teorik cevabındaki formüller kullanılmıştır. İlk olarak üst kol incelendiğinde θ_1 uzunluğundaki hatta $\frac{C_p}{2}$ lik bir yükü sonlandırılmıştır bu durumda hattın girişinden gözükken admitans değeri hesaplanmıştır.

$$Y_1 = Y_0 \frac{Y_0 + jY_P \tan \theta_1}{Y_P + jY_0 \tan \theta_1} \quad (5.1)$$

Daha sonraki adımda iki paralel admitansın eşdeğer admitansı hesaplanır.

$$Y_2 = Y + Y_1 \quad (5.2)$$

Sıradaki adımda θ_1 uzunluğundaki hat Y_2 yüküyle sonlanmıştır. Bu durumda hattın girişinden gözüken admitans değeri ve bu admitansa paralel olan C_r ile birlikte eşdeğer admitans hesaplanır.

$$Y_3 = 2Y_r + Y_0 \frac{Y_0 + jY_2 \tan \theta_1}{Y_2 + jY_0 \tan \theta_1} \quad (5.3)$$

Son durumda üst kol admitansı θ_1 uzunluğundaki hat Y_3 yüküyle sonlanmıştır.

$$Y_{\text{üst}} = Y_0 \frac{Y_0 + jY_3 \tan \theta_1}{Y_3 + jY_0 \tan \theta_1} \quad (5.4)$$

Orta kol için admitans değeri yan hattın admitans değerine eşittir.

$$Y_{\text{orta}} = \frac{1}{Z} \quad (5.5)$$

Alt kolu için $\lambda/8$ uzunluğundaki hatta $\frac{C_r}{2}$ lik bir yüküyle sonlandırılmıştır. Hattın girişinden gözüken admitans değeri hesaplanmıştır.

$$Y_{\text{alt}} = Y_0 \frac{Y_r + jY_0 \tan \theta_1}{Y_0 + jY_r \tan \theta_1} \quad (5.6)$$

Bu sonuçlar göze alındığında çift mod empedansı, Denklem 3.23' de verildiği gibi hesaplanmış olur.

$$Z_{\text{even}} = Z_s + (Y_{\text{üst}} + Y_{\text{orta}} + Y_{\text{alt}})^{-1} \quad (5.7)$$

Tek mod empedansı ise pertürbasyon elemanı ve alt koldaki referans elemanı kısa devre olur. Üst kol için kısa devre sonlanmış θ_1 uzunluğundaki hattın girişinden gözüken admitans ve o admitansta paralel yan hat yükü ile eşdeğer admitans hesaplanır.

$$Y_1 = \frac{1}{jZ_0 \tan \theta_1} + \frac{1}{Z} \quad (5.8)$$

Sonraki adımda bulunan eşdeğer admitans θ_1 uzunluğundaki hattın yükü kabul edilip girişinden gözükten admitans Denklem 5.9'da verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$Y_2 = 2Y_r + Y_0 \frac{Y_1 + jY_0 \tan \theta_1}{Y_0 + jY_1 \tan \theta_1} \quad (5.9)$$

Son adım olarak üst kol admitansı Denklem 5.10'da verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$Y_{\text{üst}} = Y_0 \frac{Y_2 + jY_0 \tan \theta_1}{Y_0 + jY_2 \tan \theta_1} \quad (5.10)$$

Orta kol admitansı çift modda olduğu gibi hesaplanır.

$$Y_{\text{orta}} = \frac{1}{Z} \quad (5.11)$$

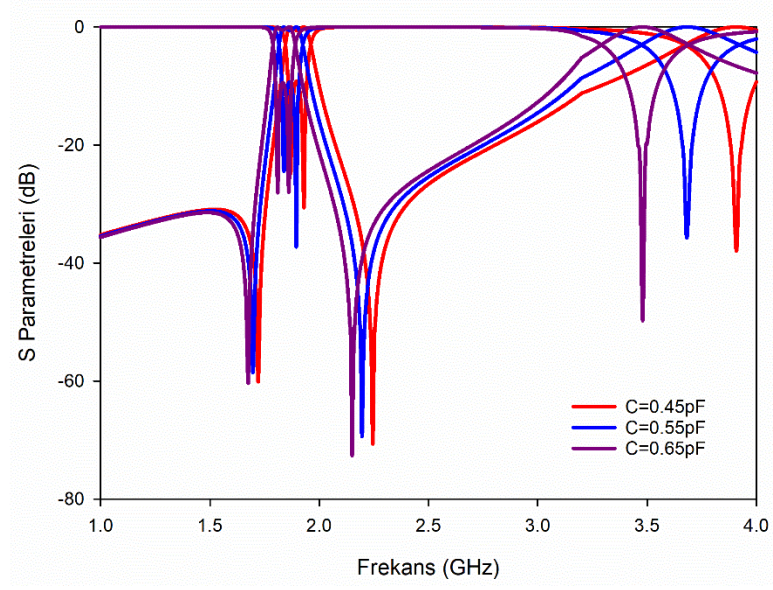
Alt kol admitansı ise kısa devre sonlandırılmış hattın girişinden gözükten admitansa eşit olur.

$$Y_{\text{alt}} = \frac{1}{jZ_0 \tan \theta_1} \quad (5.12)$$

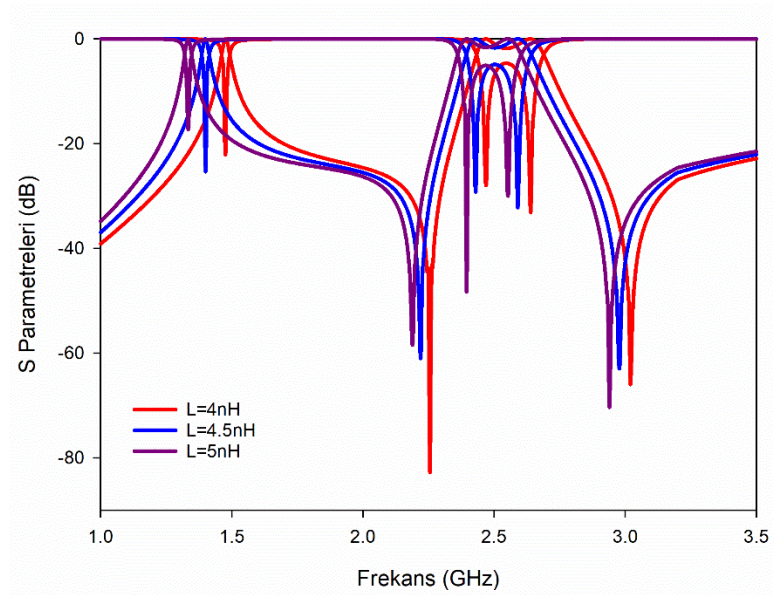
Böylelikle tek mod admitansı Denklem 5.13'te verildiği gibi hesaplanmış olur.

$$Z_{\text{odd}} = Z_s + (Y_{\text{üst}} + Y_{\text{orta}} + Y_{\text{alt}})^{-1} \quad (5.13)$$

Bu hesaplamaların ardından rezonatör devresinin teorik cevabı devrenin elektriksel uzunluğu ve besleme kapasiteleri değiştirilmeden farklı L ve C değerleri için teorik analizi yapılmıştır. Yan hat yükü olarak kapasite, bobin, paralel ve seri L-C devresi bağlayarak yan hattın frekans cevabına etkisi incelenmiştir. Öncelik olarak yan hat olarak sadece bir bobin ve kapasite bağlanarak farklı bobin ve kapasite değerleri için sonuçlar alınmıştır. Bu sonuçlar Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir. Daha sonrasında seri L-C devresinde $L = 0.45nH$ de sabit iken kapasitenin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi incelenmiştir. Daha sonra kapasite değeri $C = 0.85pF$ da sabit tutularak bobinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi incelenmiştir. Böylelikle yan hattın indüktif ya da kapasitif yüklü olmasının sonuçları analiz edilmiştir.

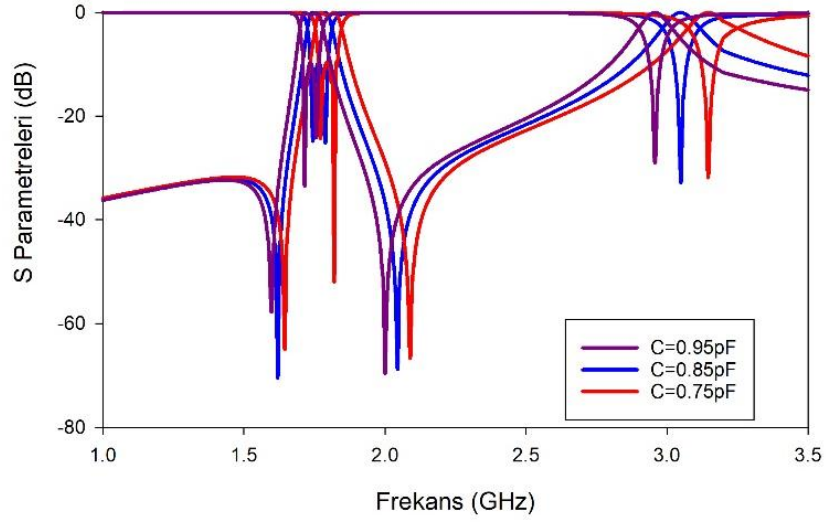


Şekil 5.3: Yan hat yükü kapasite olan filtrenin teorik frekans cevabı.

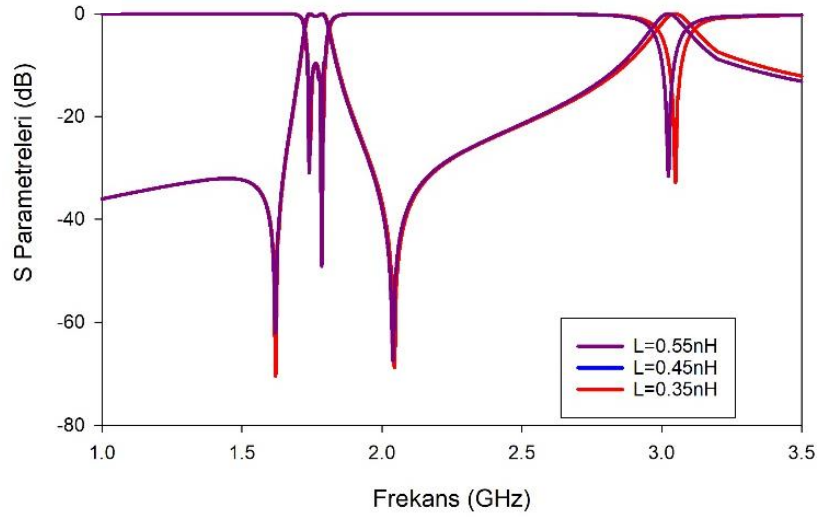


Şekil 5 4: Yan hat yükü bobin olan filtrenin teorik frekans cevabı.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4' te verilen grafiklerden yan hattın kapasitif olduğu durumda kapasitörün değeri arttırıldığında bandları düşük frekanslara ötelirken tek mod banttaki etkisi çift mod banda göre daha fazladır. Yan hattın indüktif olduğu durumda tek mod band çift modlu bandın soluna kaymıştır. Ayrıca bandlar yüksek bobin değerlerinde gözlemlenebilmiştir.



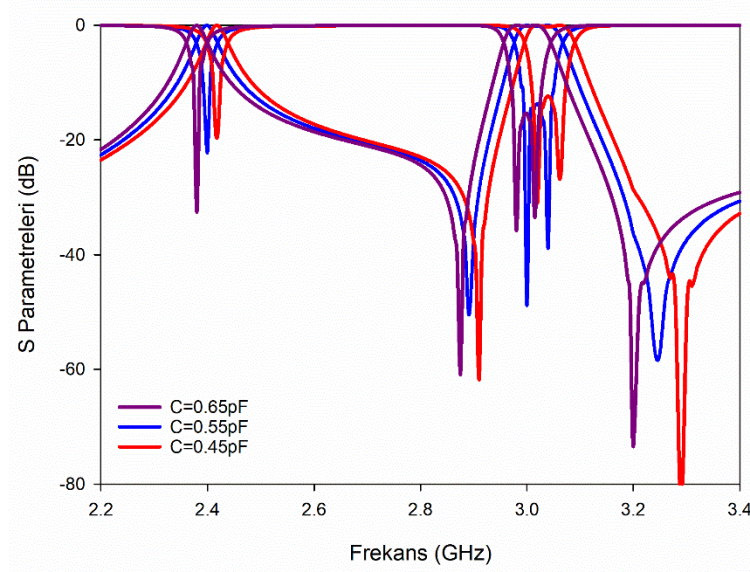
Şekil 5.5: Seri yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün farklı C değerleri için teorik frekans cevabı.



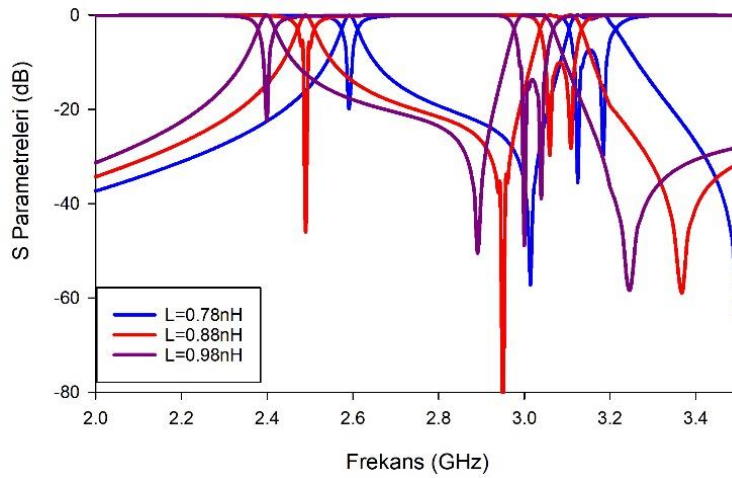
Şekil 5.6: Seri yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün farklı L değerleri için teorik frekans cevabı.

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'daki grafiklerden görüleceği üzere verilen teorik cevaplar üzerinden çift modlu band ile beraber yan yatlar ile tek mod yeni bir band oluşturulmuştur. Yan hat seri L-C devresinde kapasitif etkinin artması hem tek mod bandın merkez frekansını hem de çift modlu bandın merkez frekansını kaydırmıştır ve tek modlu bandı çift modlu banda yaklaştırmıştır. İndüktif etkinin artmasında yine merkez frekansları düşük frekanslara çekmiştir fakat kapasitif etki kadar etkili değildir. Paralel L-C devresinde ise $L=0.98nH$ de sabit iken kapasitenin değişiminin frekans

cevabı üzerine etkisi incelenmiştir. Daha sonra kapasite değeri $C=0.55\text{pF}$ da sabit tutularak bobinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi incelenmiştir.



Şekil 5.7: Paralel yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün farklı C değerleri için teorik frekans cevabı.



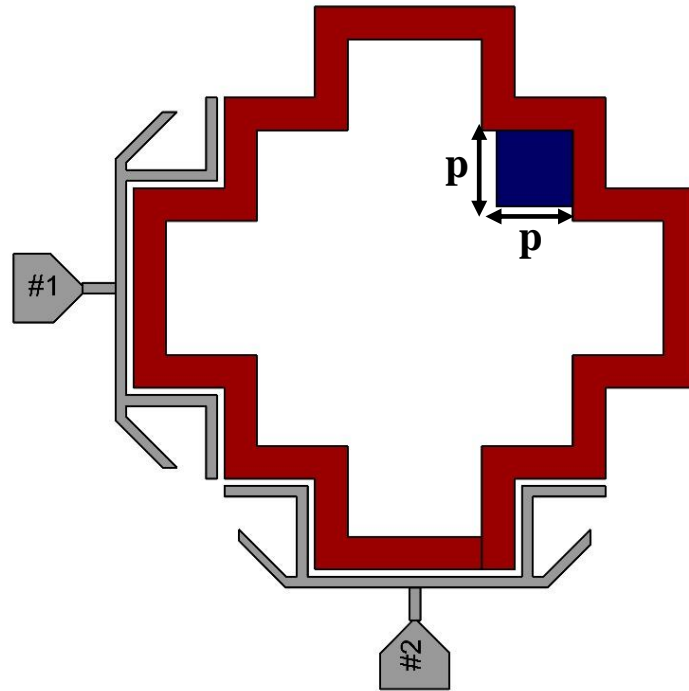
Şekil 5.8: Paralel yan hatlı Pertürbasyon ve referans elemanına sahip kare halka rezonatörün farklı L değerleri için teorik frekans cevabı.

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 ile verilen grafiklerde seri yan hatta indüktif etkinin daha etkin olduğunu indüktif etkideki ufak bir değişim ile iki bandın merkez frekansını daha yüksek frekans değerlerine çıkarmıştır. Kapasitif etki ise nispeten indüktif etkinin tersine merkez frekansı düşürmüştür.

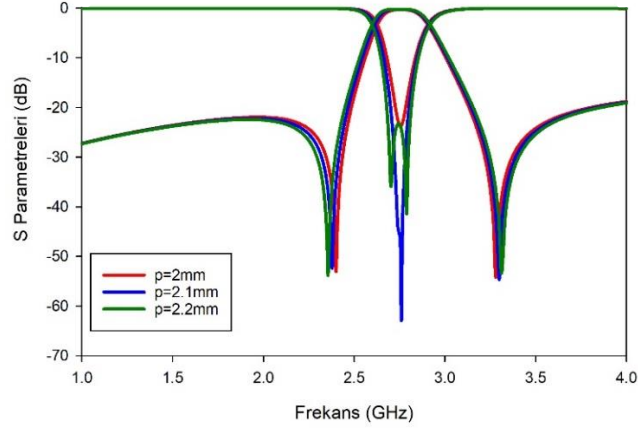
6. KOMPAKT YENİ YAN HAT KONFIGÜRASYONLU ÇOK BANDLI BAND GEÇİREN FİLTRE TASARIMI

Bu bölümde, iki farklı boyutta ve uygun kuplajda iç içe yerleştirilmiş iki rezonatörden oluşan filtre yapısı verilmiştir. İki rezonatör farklı pertürbasyon elemanına sahiptir. Ayrıca iç rezonatörde yeni yan hat tasarımı kullanılmıştır. Böylece, dış tarafta ve iç tarafta bulunan rezonatörler ile dört ayrı kontrol edilebilir band oluşturulur. Rezonatörlerin iç içe yerleştirilmesi için bir köprüye ihtiyaç duyulmuş ve iç içe yerleştirilen rezonatörler bu hava köprüleri sayesinde tamamlanabilmiştir.

İç rezonatör için sunulan tasarım kıvrımlı kare halka rezonatördür. Rezonatörün boyutları 15.5mm x 15.5mm'dir. Kalınlığı 0.9mm olarak ayarlanmıştır. Rezonatörde pertürbasyon etkisi köşesine koyulan bir kare yama elemanı ile sağlanmıştır. Burada p parametresi yama elemanının boyutunu değiştiren parametreyi ifade eder.



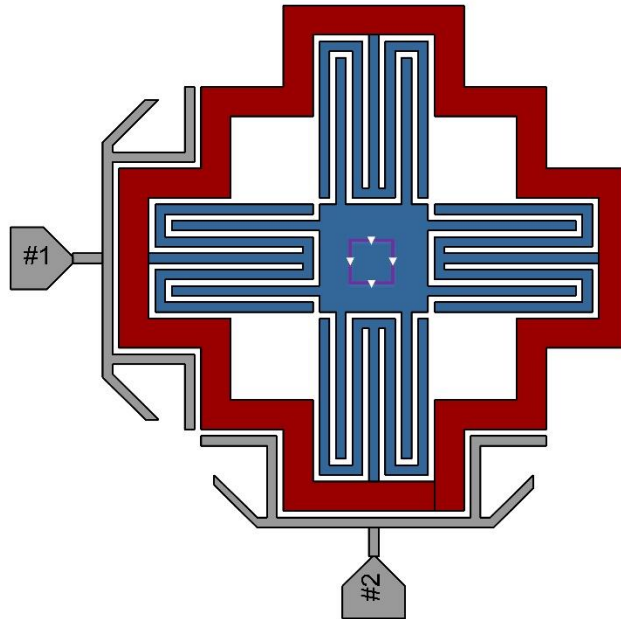
Şekil 6.1: Tasarlanan filtre yapısındaki pertürbasyon elemanlı iç rezonatör.



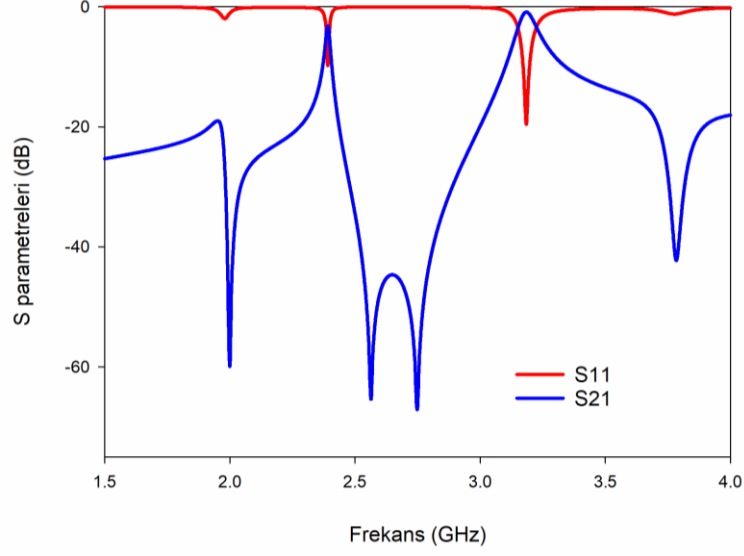
Şekil 6.2: Farklı pertürbasyon boyutları için frekans cevabı.

Şekil 6.2'den görüldüğü üzere iç rezonatör yapısı için uygun pertürbasyon boyutu 2.2mm olarak bulunmuştur. Merkez frekansı 2.745 GHz'dir. Bir sonraki aşamada rezonatöre yeni yan hat konfigürasyonu eklenmiştir ve yan hattın indüktif-kapasitif etkisi incelenerek filtre cevabındaki etkileri gösterilmiştir.

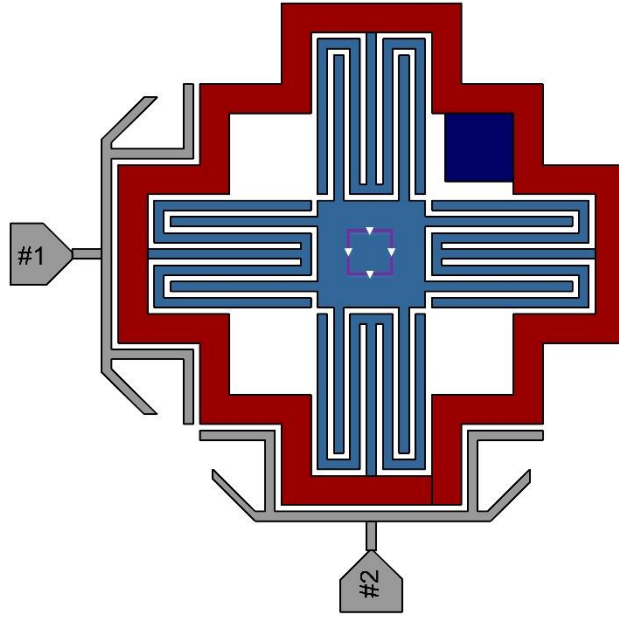
İç rezonatör için yeni bir mikroşerit yan hat konfigürasyonu tasarlanmıştır. Tasarlana yan hat yapısı rezonatörün orta noktasından ince bir hat ile bağlanan interdijital parmaklı bir yapı olarak tanımlanabilir. Bu yan hat ile iki adet tek mod band ortaya konulmuştur.



Şekil 6.3: Yeni yan hat konfigürasyonlu kıvrımlı kare halka rezonatör.



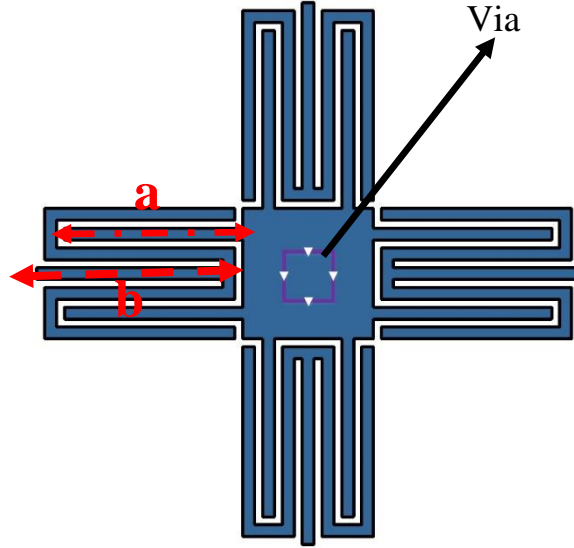
Şekil 6.4: Yeni yan hat konfigürasyonlu kıvrımlı kare halka rezonatör frekans cevabı.



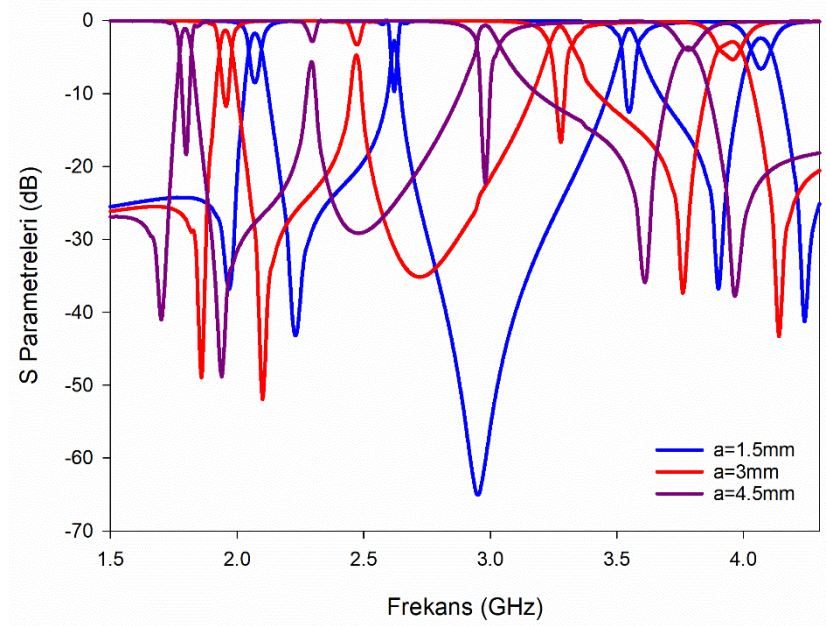
Şekil 6.5: Yeni yan hat konfigürasyonlu pertürbasyon elemanlı kıvrımlı kare halka rezonatör.

Şekil 6.5'te verilen rezonatör yapısında yeni yan hat yapısına pertürbasyon elemanı eklenmiştir. Bu yan hat mikroşerit yapıda rezonatörle bağlantısı olan düz ince hat devreye indüktif etki vereceğinden bir bobin ile temsil edilebilir. Diğer tarafta ise inter dijital parmak yapısı bir kapasite gibi düşünülebilir. Bu indüktif ve kapasitif etkilerin değişimi ise Şekil 6.6'da gösterilen parametreler ile sağlanmaktadır. Burada

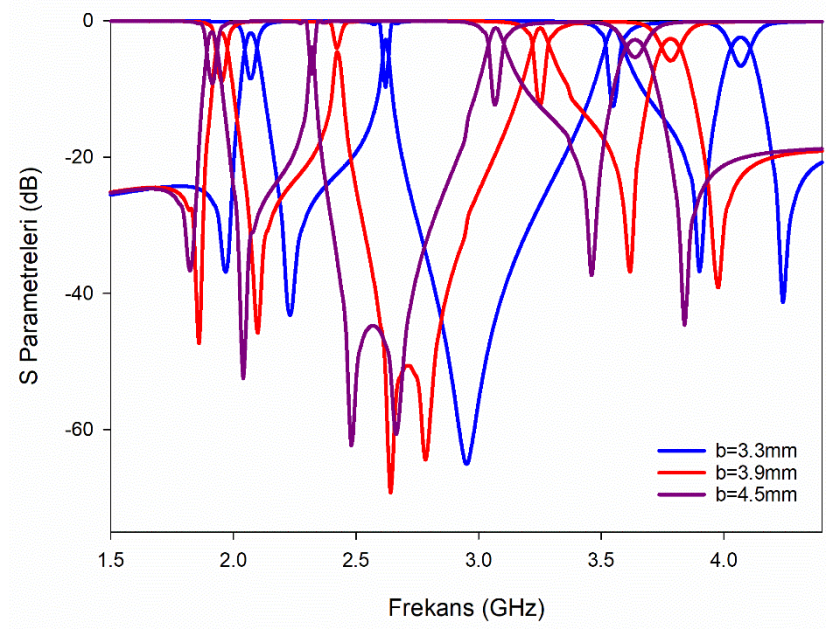
a parametresi ile interdijital yapının parmak uzunluğunu, b parametresi ile interdijital yapıyı iç rezonatöre bağlayan ince düz hattın uzunluğunu değiştirir.



Şekil 6.6: Rezonatörün yan hat yapısı ve yan hat parametreleri.

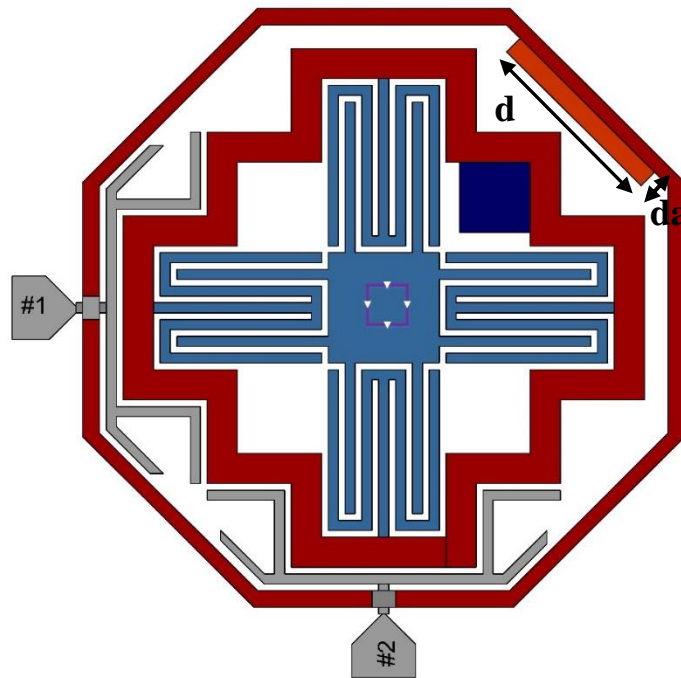


Şekil 6.7: İnterdijital parmak uzunluğunun frekans cevabına etkisi.



Şekil 6.8: İnterdijital yapıyı iç rezonatöre bağlayan hattın uzunluğunun frekans cevabına etkisi.

En son durumda ise kıvrımlı kare halka rezonatörün dışına kendi dikdörtgen şeklinde pertürbasyon elemanına sahip sekizgen rezonatör yapısı eklenmiştir. Dış rezonatörün boyutları 17.9mm x 17.9mm'dir ve dikdörtgen şeklinde bir pertürbasyon elemanı kullanılmıştır. Böylece iç içe yerleştirilmiş iki rezonatörlü yapı elde edilmiştir. Filtre yapısı Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



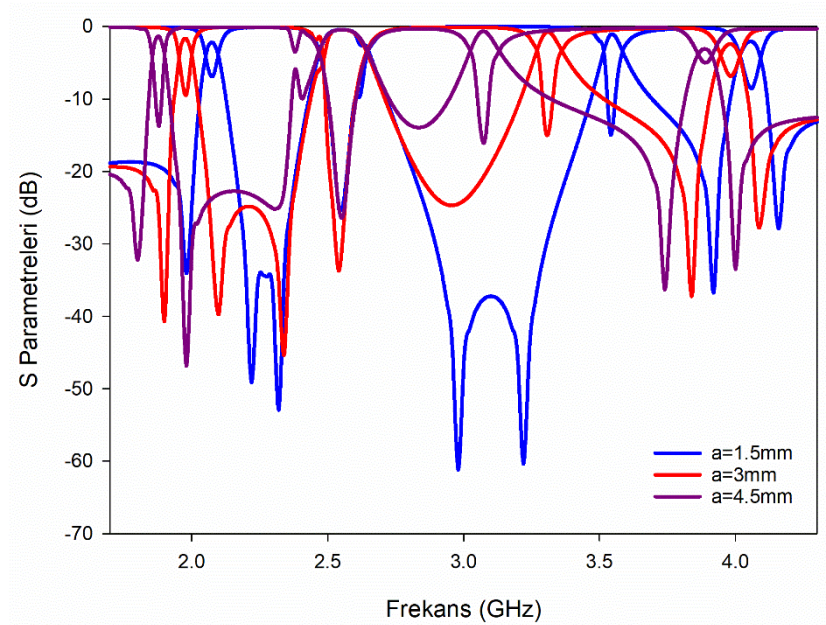
Şekil 6.9: Tasarlanan kompakt yeni yan hatlı dört band band geçiren filtre yapısı.

Dış rezonatörün eklenmesiyle birlikte d parametresi dikdörtgen şeklindeki yama elemanının uzunluğunu da parametresi ise bu yama elemanının genişliğini ayarlayan parametre olarak tanımlanır.

6.1 Önerilen Tasarımda Kullanılan Konfigürasyon Parametrelerinin Frekans Cevabı Üzerindeki Etkileri

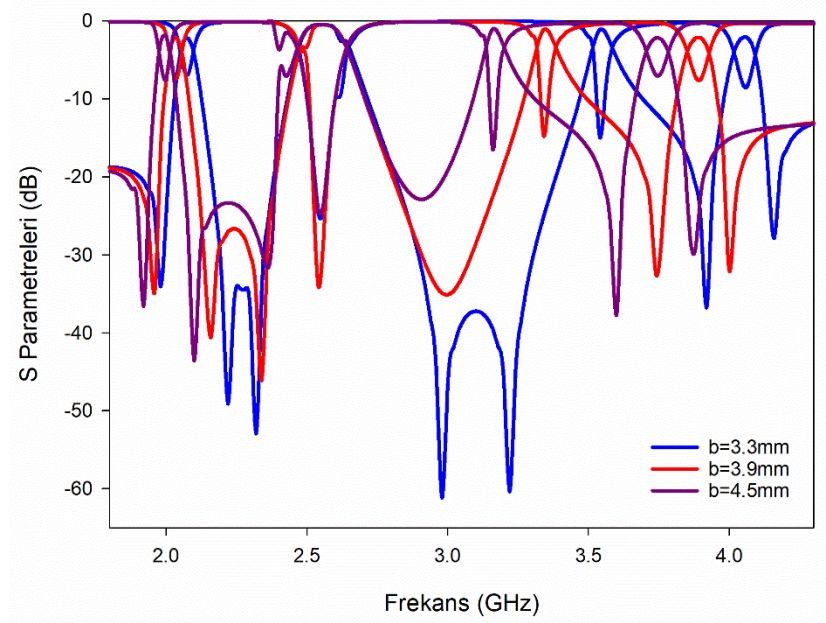
Önerilen çok bantlı filtre tasarım amacıyla belirlenen ve filtrenin konfigürasyonu için kullanılan farklı parametrelerin frekans cevabı üzerindeki etkileri bu bölümde incelenmiştir. İncelemelerde bir parametrenin değişimi karşın diğer parametre değerleri sabit tutulmuş olup her bir parametrenin devre üzerindeki etkisi ayrı ayrı incelenmiştir.

İlk olarak a parametresinin frekans cevabına etkisi incelenmiştir. Burada $b=3.3\text{mm}$, $d=2\text{ mm}$, $d_a=0.4\text{mm}$, $p=1.5\text{mm}$ olarak belirlenirken a parametresi sırasıyla 1.5mm , 3mm ve 4.5mm değerleri için sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 6.10: a parametresinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi.

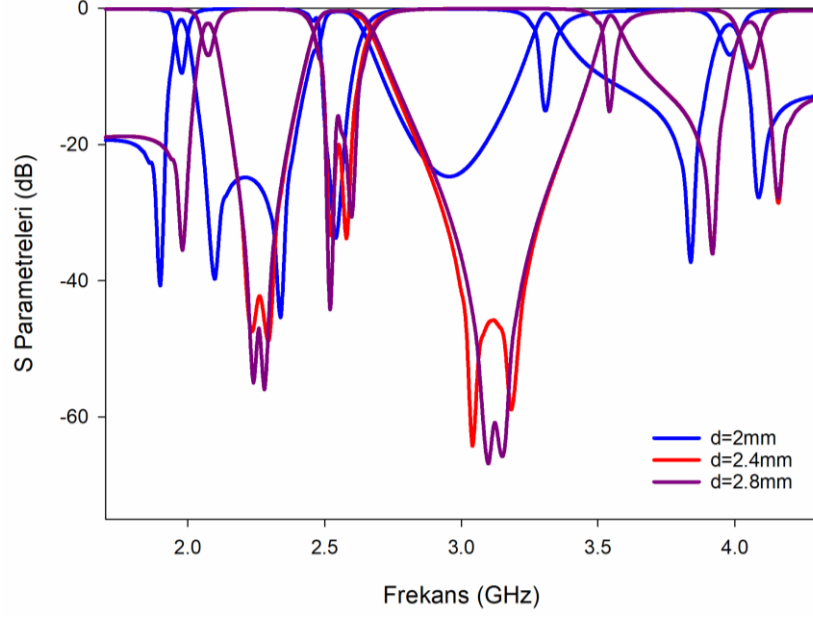
b parametresinin frekans cevabına etkisi incelenirken $a=1.5\text{mm}$, $d=2\text{mm}$, $da=0.4\text{mm}$, $p=1.5\text{mm}$ olarak belirlenirken b parametresi sırasıyla 3.3mm , 3.9mm ve 4.5mm değerleri için sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 6.11: b parametresinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi.

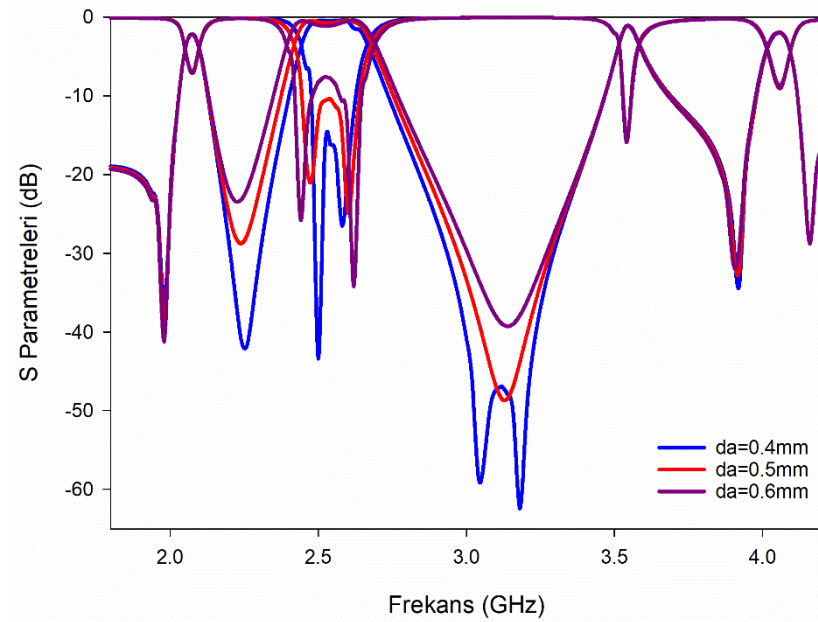
İnterdijital parmak uzunluğunu ayarlayan a parametresinin değişimi dört geçme bandın da merkez frekansında kaymaya sebep olmuştur. İnterdijital parmakların uzunluğunun artması dört bandı daha düşük frekanslara ötelemiştir. İnterdijital parmakları rezonatör bağlayan hattın uzunluğunu ayarlayan b parametresinin değişimi içteki rezonatörden gelen üçüncü ve dördüncü geçme bandında daha etkin olduğu söylenebilir. Ayrıca pertürbasyon elemanlarının boyut değişimi incelendiğinde daha net gözükecek olan ikinci ve dördüncü geçme bandlarında pertürbasyonun yetersiz geldiği tam bir çift modlu bandın oluşmadığı görülmektedir.

d parametresinin frekans cevabına etkisi incelenirken $a=1.5\text{mm}$, $b=3.3\text{mm}$, $da=0.4\text{mm}$, $p=1.5\text{mm}$ olarak belirlenirken d parametresi sırasıyla 2mm , 2.4mm ve 2.8mm değerleri için sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 6.12: d parametresinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi.

da parametresinin frekans cevabına etkisi incelenirken $a=1.5\text{mm}$, $b=3.3\text{mm}$, $d=2\text{mm}$, $p=1.5\text{mm}$ olarak belirlenirken d parametresi sırasıyla 0.4mm, 0.5mm ve 0.6mm değerleri için sonuçlar incelenmiştir.



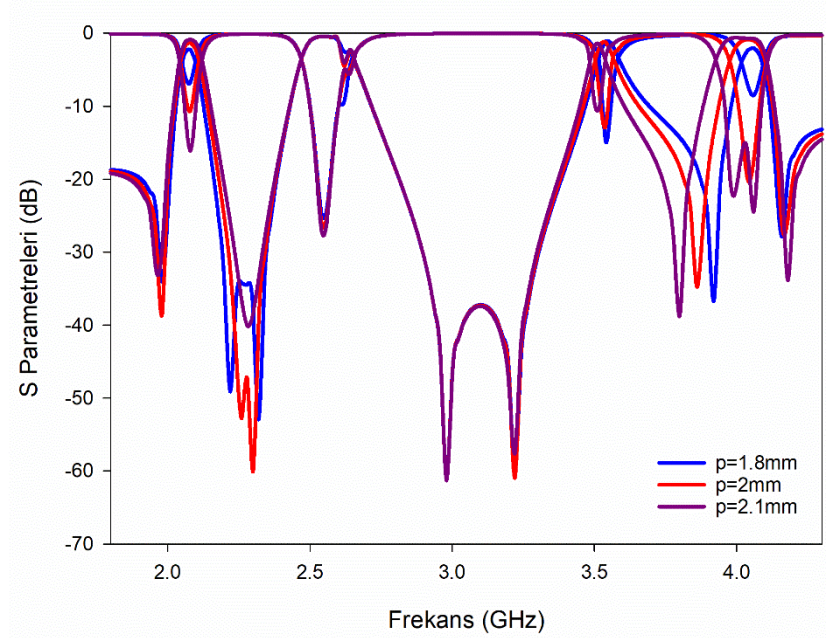
Şekil 6.13: da parametresinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi.

Dış rezonatörün pertürbasyon elemanının boyut parametreleri olan da ve d parametrelerinin değişimi incelendiğinde parametrelerdeki değişim üçüncü ve

dördüncü geçme bandında herhangi bir etki göstermiyor. Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'ten de görüldüğü gibi d ve a parametrelerinin değişimi sadece ikinci geçme bandı için etkisini gösteriyor ve mod ayrışımı gerçekleşiyor. Bu da bize gösteriyor ki ilk 2.55 GHz merkez frekanslı çift mod band dış rezonatörden gelen frekans cevabıdır. Bununla beraber dış rezonatörün pertürbasyon elemanının boyutunun artması dördüncü geçme bandının da merkez frekansını daha düşük frekanslara çekmiştir.

İç rezonatörün pertürbasyon elemanının boyutlarının değişmesinin frekans cevabına etkisi Şekil 6.14'te verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere pertürbasyon elemanının boyutlarının değişmesi yani pertürbasyon etkisinin artması azalması tek modlu bandlar ile dördüncü geçme bandında etkisini göstermektedir. Ayarlanan pertürbasyon etkisi ile çift modlu dördüncü geçme bandı içe yerleştirilen rezonatörün frekans cevabı olduğu görülmektedir.

p parametresinin frekans cevabına etkisi incelenirken $a=1.5\text{mm}$, $b=3.3\text{mm}$, $d_a=0.4\text{mm}$, $d=2\text{mm}$ olarak belirlenirken p parametresi sırasıyla 1.8mm, 2mm ve 2.2mm değerleri için sonuçlar incelenmiştir.



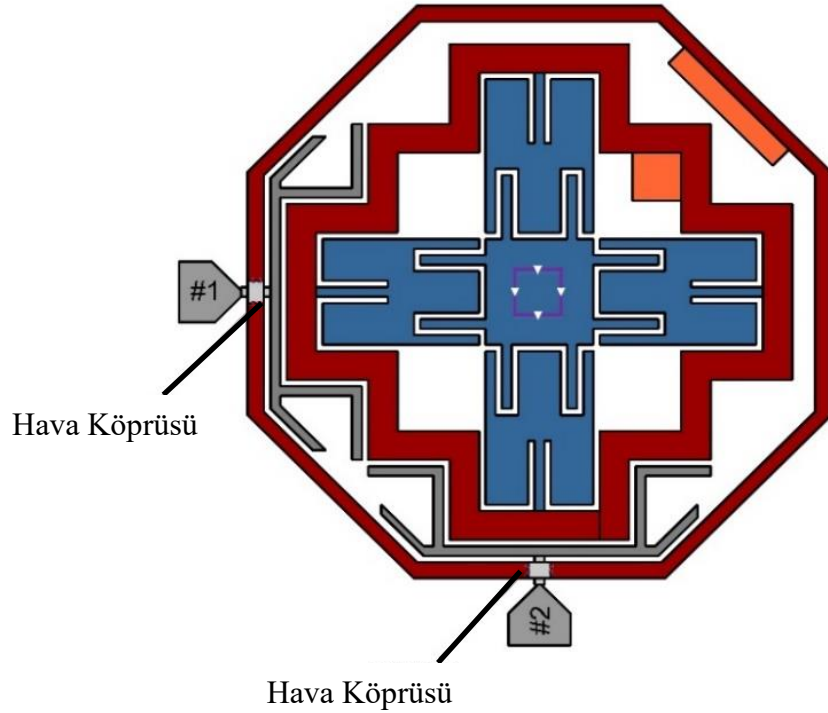
Şekil 6.14: p parametresinin değişiminin frekans cevabı üzerine etkisi.

Yapılan parametrik çalışmaların sonunda her bir parametrenin frekans cevabı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu incelemelerin sonucunda en uygun filtre cevabına

ulaşıldığı parametre değerleri seçilerek filtre tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalatı yapılan filtrenin ölçümleri bir sonraki bölümde verilmiştir.

6.2 Deneysel Sonuçlar

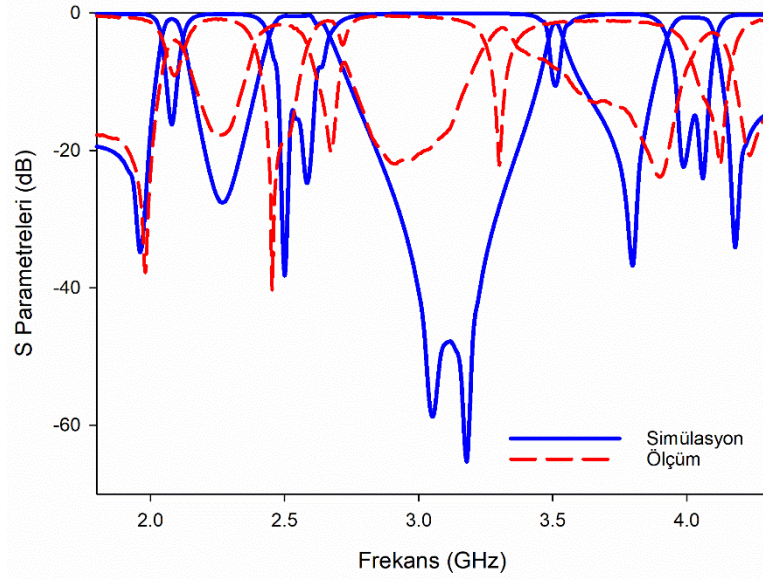
Yapılan parametrik çalışmaların sonunda bağıl dielektrik sabiti 6.15 ve kalınlığı 1.524mm olan RT6006 taban malzemesi kullanılarak tasarlanmıştır. . Parametrik çalışmalardan sonra filtre devresi en uygun frekans cevabı parametre değerleri $p = 2.1\text{mm}$, $a = 1.5\text{mm}$, $b = 3.3\text{mm}$, $d = 2\text{mm}$ ve $da = 0.4\text{mm}$ alınarak devre bu değerlere göre tasarımı yapılmıştır. İç rezonatörün boyutları $15.5 \times 15.5\text{mm}^2$ dir. Dış rezonatörün boyutları ise $17.9 \times 17.9\text{mm}^2$ dir. Toprak düzleme geçiş yolu $1.1 \times 1.1\text{mm}^2$ dir. Kuplaj beslemesi dış rezonatörde hava köprüsü ile sağlanmıştır. Tasarımı yapılan filtre ve frekans cevabı sırasıyla Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.15: Yeni yan hat konfigürasyonuna sahip kompakt dört band band geçiren rezonatör.

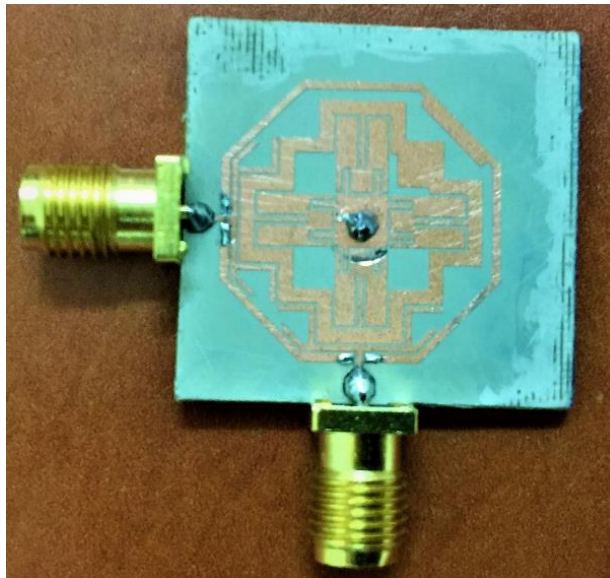
Tablo 6.1: Simülasyon ve ölçüm sonuçlarının özeti.

	SİMÜLASYON			ÖLÇÜM		
	f_0 (GHz)	Band Genişliği (MHz)	RL (dB)	f_0 (GHz)	Band Genişliği (MHz)	RL (dB)
1.band	2.08	80	-16.24	2.08	70	-9.25
2.band	2.54	230	-15.36	2.48	200	-19.72
3.band	3.52	40	-9.52	3.3	20	-22.66
4.band	4.02	190	-16.03	4.07	150	-15.56

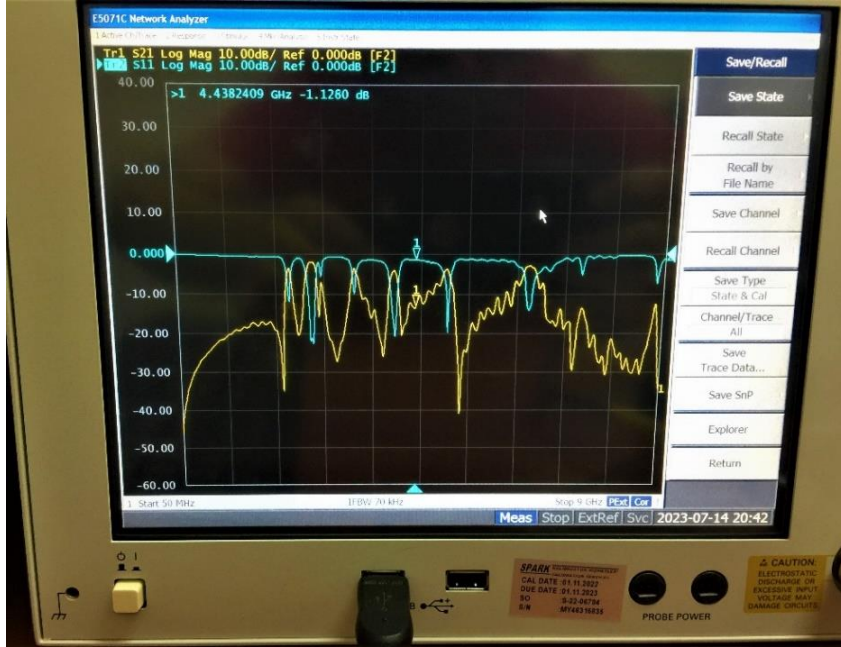
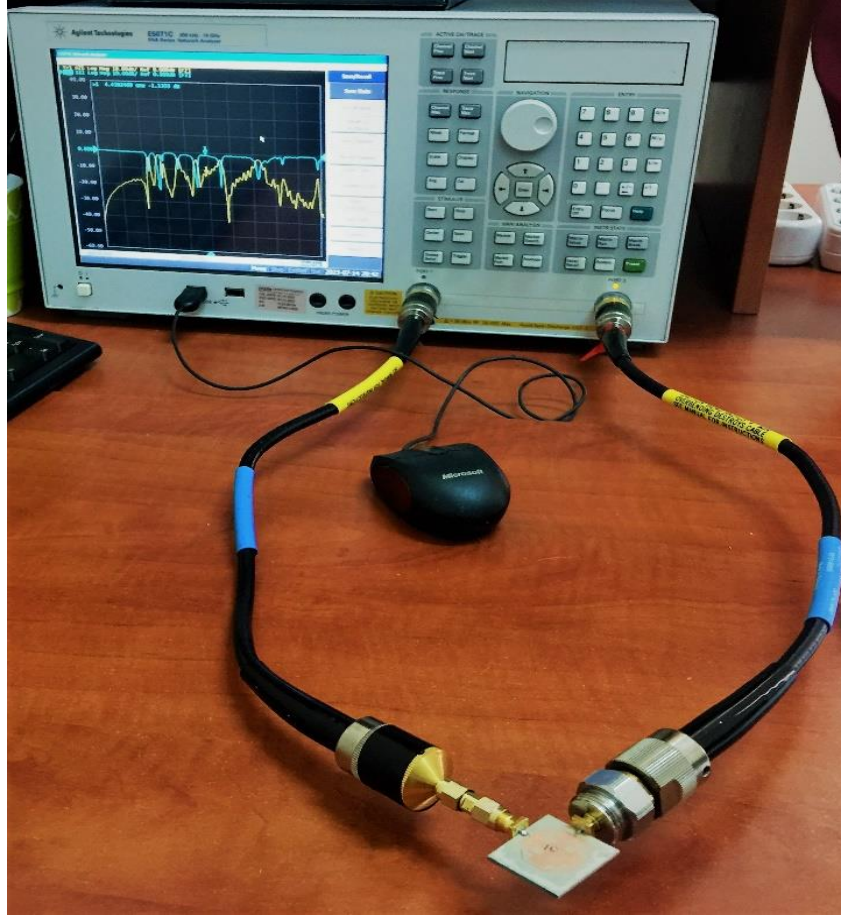


Şekil 6.16: Tasarımı verilen filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

İmal edilen filtrenin ve Network Analyzer vasıtasıyla yapılan ölçümünün fotoğrafları Şekil 6.18’de verilmiştir.



Şekil 6.17: İmal edilen çok bandlı filtre.



Şekil 6.18: Network Analyzer ile yapılan ölçümler ve örnek bir ölçüm sonucu.

7. KIVRIMLI BASAMAK TİPİ EMPEDANS REZONATÖRLER KULLANILARAK YARI MOD ÜÇ BAND FİLTRE TASARIMI

Bu bölümde kıvrımlı basamak tipi empedans rezonatörler kullanılarak gerçekleştirilen yarı mod üç bantlı bir bant geçiren filtre tasarımı sunulmaktadır. Önerilen yarı mod devre eşdeğer bir manyetik duvar olarak kabul edilebilecek simetrik düzlem boyunca filtre devresinin tam ortadan kesilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Yarı mod konfigürasyonu ana yapı ile aynı alan dağılımını sergilemektedir. Devre boyutlarının hemen hemen yarı yarıya azaltılıyor olması sebebiyle geleneksel filtre devresi yerine yarı mod filtre devreleri kullanımı oldukça popüler hale gelmiştir. Önerilen yarı mod filtre, iki kısa devre sonlandırılmış basamak tipi yan hat ve giriş çıkış portları arasında yer alan bir bağlantı hattından oluşmaktadır. Devreye interdiijital bir yapı ile ince bir film kapasitör eklemek suretiyle üçlü band performansı elde edilmektedir. Bu durum aynı zamanda yavaş dalga etkisi ile ekstra bir minyatürleşme de sağlanmaktadır.

7.1 Tasarım Metodolojisi

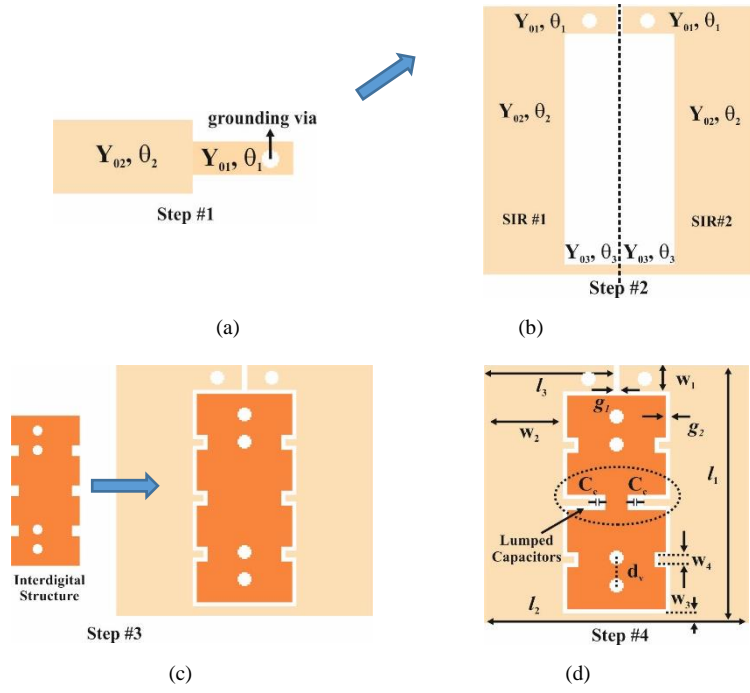
Tasarımın ilk adımı kısa devre sonlandırılmış basamak tipi empedans rezonatör analizi ile başlamaktadır. Şekil 7.1(a)'da verildiği üzere basamak tipi empedans rezonatör iki farklı elektriksel uzunluğa (θ_1 ve θ_2) ve admitans değerine (Y_{01} ve Y_{02}) sahip iki hat ile oluşturulmuştur. Bu durumda önerilen rezonatörün girişinden gözükten admitans değeri Denklem 7.1'de verilen eşitlik yardımıyla belirlenmektedir.

$$Y_{in} = Y_{02} \frac{Y_{01} - Y_{02} \tan(\theta_1) \tan(\theta_2)}{jY_{02} \tan(\theta_1) + jY_{01} \tan(\theta_2)} \quad (7.1)$$

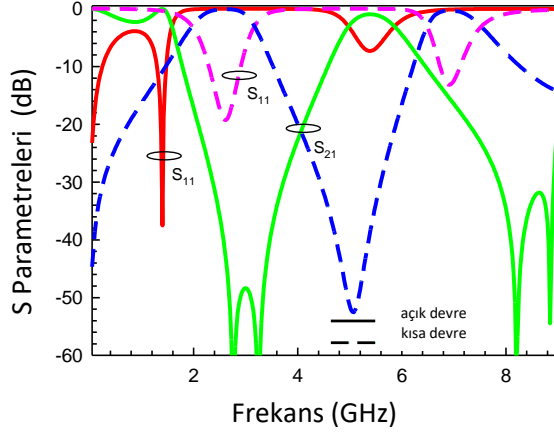
Bu durumda admitans oranı (K) rezonans şartından faydalanılarak Denklem 7.2 eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu durum geçme bandının yerleşimi tasarımıda kullanılan geometrik parametreler aracılığıyla kontrol edilebildiğini göstermektedir.

$$K = \frac{Y_{01}}{Y_{02}} = \tan(\theta_1) \tan(\theta_2), \quad (f = f_0) \quad (7.2)$$

Çift bandlı band geçiren filtre cevabını elde edebilmek amacıyla analizi gerçekleştirilen kısa devre sonlandırılmış basamak tipi empedans rezonatörlerin giriş/çıkış portlarını birbirine bağlayacak şekilde kullanıldığı konfigürasyonu Şekil 7.1(b)'de verilmektedir. Şekil 7.1(b)'den görülebileceği gibi, kısa devre sonlandırılmış rezonatörler devre boyutlarını azaltabilmek amacıyla kıvrımlı formda kullanılmaktadır. Topraklama için kullanılan geçiş yollarının etkisini göstermek için, kısa ve açık devre sonlandırılmış iki katlanmış rezonatör yapısı, bir tam dalga elektromanyetik simülasyon tarafından simüle edilmiş ve elde edilen frekans cevabı Şekil 7.2'de gösterilmiştir.

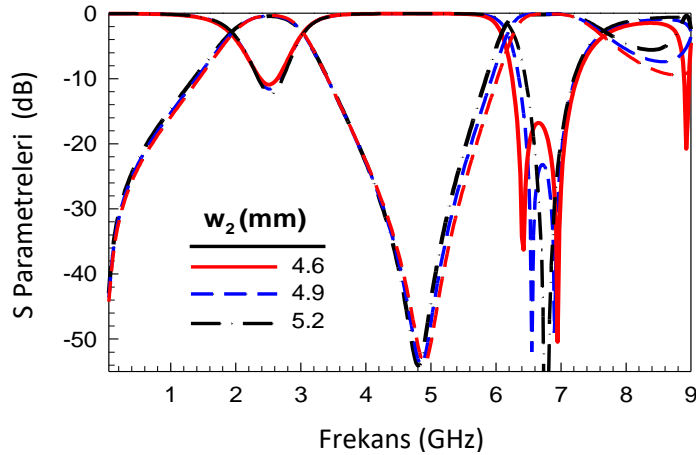


Şekil 7.1: Filtrenin tasarım adımları ve düzeni. a) kısa devre sonlandırılmış basamak tipi empedans rezonatör yapısı b) çift bandlı band geçiren filtre konfigürasyonu c) inter dijital yan hat ile yüklenmiş çift bandlı band geçiren filtre konfigürasyonu d) inter dijital yan hat ile yüklenmiş üç bandlı band geçiren filtre konfigürasyonu.



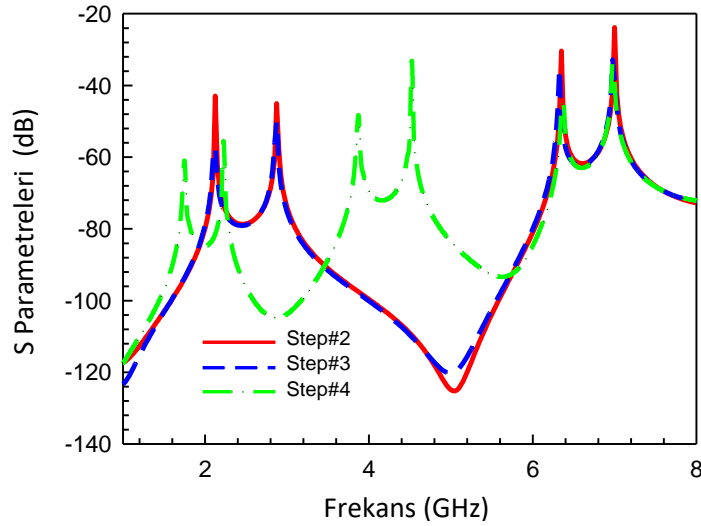
Şekil 7.2: Toprak düzleme geçiş yollarının kullanılmasının frekans cevabına etkisi.

K admitans oranını belirleyen tüm parametreler (Y_{01} , Y_{02} , Y_{03} ve θ_1 , θ_2 , θ_3) temel rezonans frekanslarının belirlenmesinde çok etkilidir. Farklı karakteristik admitanslara (Y_{02}) karşı simüle edilmiş frekans cevapları, rezonans frekansı ile admitans oranı arasındaki ilişkileri göstermek için Şekil 7.3'te incelenmiştir. İlgili hattın genişliği azalır, birim uzunluk başına kapasite azaldığından, hattın karakteristik admitansının azaldığı iyi bilinmektedir. Bu nedenle, Şekil 7.3'te farklı w_2 değerlerine bağlı olarak Y_{02} karakteristik admitansının değişimi incelenmiştir. Karşılaştırmayı basitleştirmek için sadece bir parametre (w_2) değiştirilirken diğer parametreler sabit tutulmuştur. Ayrıca, her iki band genişliği de Şekil 7.3'te gösterildiği gibi geçme bandının sol tarafından kontrol edilebileceğini göstermektedir. İkinci geçme bandının band genişliğinin daha hızlı bir şekilde değiştiğine dikkat edilmelidir.



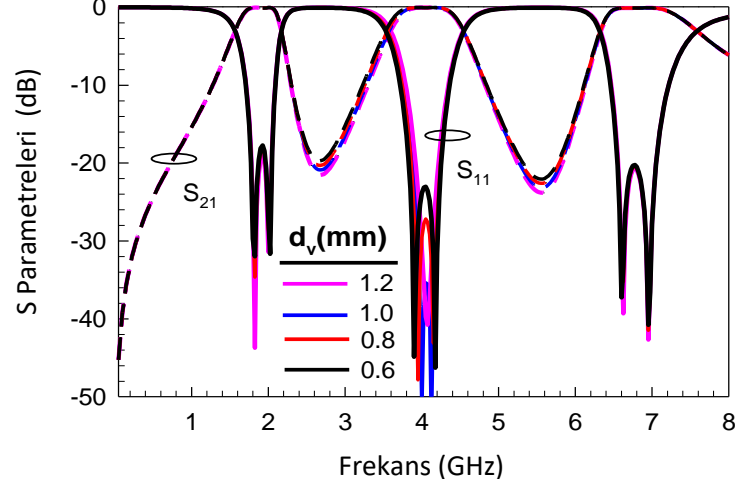
Şekil 7.3: w_2 değişimine bağlı olarak elde edilen frekans cevabı.

Önerilen üç bandlı filtre devresi, bir iletim hattı ile birbirine bağlı iki kısa devre sonlandırılmış basamak tipi empedans rezonatörler ile elde edilen yan hatlardan, belirli noktalarda toprak düzleme geçiş yollarının bulunduğu bir interdijital yapıdan ve interdijital yapı ile rezonatörü birbirine bağlayan ince film kapasitörlerden oluşmaktadır. Tasarımın adımlarını daha iyi açıklamak için, Şekil 7.1'e bağlı olarak geliştirme aşamalarının simüle edilmiş sonuçları Şekil 7.4'te verilmiştir. Adım #2'den Adım #3'e geçerken filtreleme özelliğinin çalışma frekansı aralığında korunduğuna dikkat edilmelidir. Özetlemek gerekirse, tasarımdaki admitans oranına bağlı olarak konfigüre edilen kıvrımlı basamak tipi empedans rezonatörler üzerine eklenen toprak düzleme geçiş yolları vasıtasıyla iki geçme bandı elde edilmektedir. İnterdijital yüklemeye, yavaş dalga etkisini kullanarak rezonatörün kapasitif etkisini arttırdığından, daha yüksek modların aşağı kaymasına katkıda bulunmaktadır.



Şekil 7.4: Tasarım adımları için zayıf kuplaj altında elde edilen frekans cevaplarının karşılaştırılması.

İnterdijital yapı üzerine yerleştirilen toprak düzleme geçiş yolları arasındaki mesafe Şekil 7.5'te görüldüğü gibi sadece ikinci geçme bandını etkilemektedir. Bu, ikinci geçme bandının bağımsız olarak kontrol edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 7.5: İnterdijital yapı üzerindeki toprak düzleme geçiş yolları arasındaki mesafenin değişimine bağlı olarak elde edilen frekans cevabı.

7.2 Ölçüm Çalışmaları

Önerilen yarı mod üç bandlı filtre tasarımının geçerliliğini göstermek için kalınlığı 0.51 mm ve bağıl dielektrik sabiti 2.2 olan bir RT/Duroid 5880 dielektrik taban üzerinde devre tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen filtrenin bir fotoğrafı Şekil 7.6(a)'da gösterilmektedir. Tasarlanan filtrenin toplam boyutu yaklaşık $0.215\lambda_g \times 0.175\lambda_g$ 'dir. λ_g , ilk geçme bandının ölçülen merkez frekansında hesaplanan dalga boyudur. Filtrenin tüm fiziksel boyutları Tablo 7.1'de verilmektedir. Toprak düzleme geçiş yollarının çapı 1.0 mm'dir. İnce film kapasitörün kapasitansı 2.0 pF olarak alınmıştır.

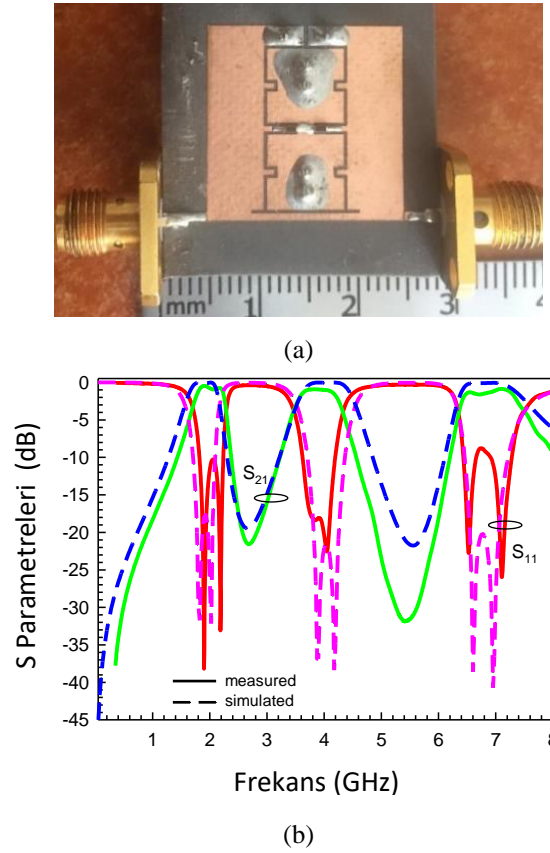
Tablo 7.1: Üretilen yarı mod üç band filtre devresi boyutları.

w_1	w_2	w_3	w_4	l_1	l_2	l_3	g_1	g_2	d_v
1.9	5.6	0.7	0.5	18.8	18.5	9.2	0.4	0.3	1.0

(Tüm birimler mm cinsinden alınmalıdır)

Ölçüm, Keysight N5222A PNA analizör ile gerçekleştirilmiştir. Ölçülen ve simüle edilen sonuçların karşılaştırması Şekil 7.6(b)'de gösterilmektedir. Ölçülen sonuçlara göre, geçme bandlarının merkez frekansları sırasıyla 2,07 GHz, 3,93 GHz ve 6,83 GHz ve ekleme kayıpları ise yaklaşık olarak -0.93 dB, -0.97 dB ve 1.42 dB'dir. Şekil 7.6(a)'da kırmızı kesikli çizgi ile işaretlenen boşluk, tüm geçiş bantlarının

merkez frekansındaki geri dönüş kaybı seviyesini ayarlamak için rezonatöre doğru uzatılır.



Şekil 7.6: (a) Üretilen yarı mod üç bandlı band geçiren filtre devresinin fotoğrafı (b) simüle edilen ve ölçülen sonuçların karşılaştırılması.

Önerilen konfigürasyon ile ekstra bir rezonatör devresine ihtiyaç duymadan aynı yüzey alanını kullanarak iki geçme bandına (birinci ve üçüncü) ulaşmak mümkündür. Bu özellik, mikrodalga bileşenlerinin boyutunu küçültmek için oldukça kritiktir. Ayrıca interdijital yapı ile rezonatör arasına yerleştirilen kapasitörler sayesinde birim uzunluk başına kapasitans etkisi artırılır. Böylece, iki yüksek mod çalışma frekans aralığına taşınarak ekstra (ikinci) bir geçme bandının daha elde edilmesi sağlanmaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yeni bir pertürbasyon ve yan hat konfigürasyonuna sahip çift modlu rezonatör tasarlanmıştır. Önerilen yapı kısa devre sonlandırılmış yan hatlara sahip dışarıdan içeriye doğru kuplajlı besleme hatlarıyla oluşturulmuş iç içe yerleştirilmiş iki rezonatörden oluşmaktadır. Dışarıdan içeriye doğru besleme yapılırken dış rezonatör için kesilen noktalarından hava bağlantı köprüleri kullanılmıştır. Her iki rezonatörde mod uyarımı simetri eksenine yerleştirilen bir adet yama elemanı ile sağlanmıştır. Böylelikle iki ayrı rezonatörün oluşturacağı çift modlu bandların kontrolü ayrı ayrı sağlanmış oldu. İç rezonatör yapısı için kıvrımlı kare halka rezonatör kullanılmıştır. Bu yapı ile rezonatörün boyutlarını arttırmadan elektriksel uzunluğu artırılmıştır. Böylece minyatürizasyon ile beraber elektriksel uzunluğun artmasıyla merkez frekansta artacaktır.

Tasarlanan rezonatörün çift-tek mod empedans analizi yapılırken, filtrenin eşdeğer devre modeli çıkarılmıştır. Bununla beraber yan hat yapısını içe düz hattı bir bobin ve bobine bağlı interdiijital parmak kapasite olarak düşünerek hesaplamalar yapıldı. Elde edilen sonuçlar gösteriyor ki 2Ghz ile 4.3GHz frekans aralığında dört adet band oluşturulmuştur ve bu dört adet band kontrol edilebilirdir. Böylelikle hem pertürbasyon etkisinin ayarlanması hem yan hat yapısının ayarlanması ile bandlar istenilen merkez frekansta oluşturulabileceği gibi bir anahtarlama ile iç ve dış rezonatörün ikisinin aktif çalıştığı durumdan birinin çalışıp diğerinin çalışmadığı durumu kontrol etme imkanı çalışmalarına da referans olabilecek durumdadır.

Bu tez çalışmasında önerilen filtre yapısının sahip olduğu yeni yan hat düzenlemeleri ve kullanılan pertürbasyon elemanlarla ileride yapılabilecek çalışmalara ışık tutabilecek niteliktedir. Çünkü yapılan tasarımda tüm bantlar ayrı bir rezonatör tasarından ayarlanabilir durumdadır. Bu uygulama çoklu rezonatör yapıları içinde uygulanabilir.

9. KAYNAKLAR

Eryılmaz, G. M., Güntürkün, E., Görür, A. and Karpuz, C., "Microstrip bandstop filter using a dual-mode square loop resonator", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 51: 147-150. <https://doi.org/10.1002/mop.23967>, (2009).

Fu-Chang Chen, Jin Yin, Qing-Xin Chu, "Tri-band filter using single stub loaded resonator", *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, Taiwan, (23-27 July), 96-99, (2012).

Görür, A., Karpuz, C. and Eryılmaz, G. M., "Asymmetric Dual-Mode Microstrip Filters with Adjustable Transmission Zero", *Asia-Pacific Microwave Conference*, Bangkok, Thailand, pp. 1-4, doi: 10.1109/APMC.2007.4554643, (2007).

Görür A., "A novel dual-mode bandpass filter with wide stopband using the properties of microstrip open-loop resonator", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 12, no. 10, pp. 386-388, doi: 10.1109/LMWC.2002.804560, (Oct. 2002).

Görür, A., "Realization of a dual-mode bandpass filter exhibiting either a Chebyshev or an elliptic characteristic by changing perturbation's size", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 118-120, (March 2004).

Görür, A., "Description of coupling between degenerate modes of a dual-mode microstrip loop resonator using a novel perturbation arrangement and its dual-mode bandpass filter applications", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 2, pp. 671-677, (Feb. 2004).

Görür, A. K. and Karpuz, C., "A novel perturbation arrangement for dual-mode resonators and its dual-band bandpass filter applications", *41st European Microwave Conference*, Manchester, UK, pp. 468-471, (2011).

Görür, A. K. and Karpuz, C., "Design of compact multi-band microstrip bandpass filter having simultaneously excited passbands by using open-circuited stubs," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, Seattle, WA, USA, pp. 1-3, (2013).

Görür, A. K. and Karpuz, C., "A novel perturbation arrangement for dual-mode resonators and its dual-band bandpass filter applications," 41st European Microwave Conference, Manchester, UK, pp. 468-471, doi: 10.23919/EuMC.2011.6101720, (2011).

Görür, A. K., Karpuz, C. and Görür, A., "Electronically switchable compact quad-band microstrip bandpass filter using varactor perturbed dual-mode resonators", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 32:8, 1029-1039, DOI: 10.1080/09205071.2017.1414000, (2018).

Görür, A. K., Emur, M., Karpuz, C. and Özek, A., "Design of high-selectivity microstrip bandpass filter using triple-mode stub loaded resonator", *European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, pp. 809-812, doi: 10.1109/EuMC.2015.7345887, (2015).

Görür, A. K., Karpuz, C., Özek, A., Özdemir, P. Ö. and Karaca Z., "A novel compact microstrip dual-mode wideband bandpass filter design using tuning stubs", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, pp. 47-49, <https://doi.org/10.1002/mop.28078>, (2014).

Görür, A. K., Karpuz, C., Özdemir, P. Ö. and Karaca, Z., "A novel compact triple-mode microstrip bandstop filter with adjustable reflection zeros", *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, Seoul, Korea (South), pp. 621-623, doi: 10.1109/APMC.2013.6694884, (2013).

Görür, A. K. and Karpuz, C., "A novel microstrip triplexer based on meandered loop resonators", *IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 1242-1245, doi: 10.1109/APMC.2017.8251685, (2017).

Görür, A. K., "Çift modlu mikroşerit bant geçiren filtre tasarımı.", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, (2011).

Hong, J. S., *Microstrip Filters For Rf/Microwave Applications* John Wiley & Sons, Inc, (2011).

Karpuz, C., Görür, A. K., Özek, A. and Karaca, Z., "Design of quad-band bandpass filter using nested dual-mode square loop resonators," *44th European Microwave Conference*, Rome, Italy, pp. 945-948, doi: 10.1109/EuMC.2014.6986592, (2014).

Karpuz, C., Görür, A. K. and Sahin, E., "Dual-mode dual-band microstrip bandpass filter with controllable center frequency", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, pp. 639-642, <https://doi.org/10.1002/mop.28914>, (2015).

Karpuz, C., Görür, A., Görür, A. K. and Özek, A., "A novel compact quad-band microstrip bandstop filter design using open-circuited stubs", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, Seattle, WA, USA, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2013.6697483, (2013).

Karpuz, C., Görür, A. K., Basmacı, A. N. and Özek, A., "Design and analysis of a compact dual-mode dual-band microstrip bandpass filter", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, pp. 180-190, DOI: 10.1080/09205071.2013.743209, (2013).

Nguyen, C., *Analysis Methods for RF, Microwave, and Millimeter-Wave Planar Transmission Line Structures* John Wiley & Sons, Inc, (2001).

Pozar, D. M., " *Microwave Engineering* " John Wiley & Sons, Inc., (2012).

Ramazan, S., "Mikrodalga filtrelerin optimizasyonu için bulanık mantık modelleri ve geniş bantlı yan hatlı filtre uygulaması.", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, (2001)

Tsai, L.-C. and Huse, C.-W., "Dual-band bandpass filters using equallength coupled-serial-shunted lines and Z-transform techniques", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 52 (4),1111–1117, (2004).

Wolff, Il., "Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator.", *Electronics letters*, pp. 302-303, (1972).

Xiu Yin Zhang, Jian-Xin Chen, Quan Xue, Si-Min Li, "Dual-band bandpass filter using stub loaded resonators", *Microwave and Wireless Components Letters*, IEEE, 17(8), (2007).

Zühra, Ç., "Yeni düzlemsel yan hat konfigürasyonları kullanılarak ayarlanabilir mikrodalga filtre tasarımları ve wlan/wimax uygulamaları.", Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2015).

Zverev, A. I., " *Handbook of Filter Synthesis*", United States of America, John Wiley & Sons, Inc, (1967).