

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

**BANT GEÇİREN-BANT TUTAN GEÇİŞİ MEKANİK VEYA  
ELEKTRONİK OLARAK ANAHTARLANABİLİR FİLTRE  
TASARIMI VE METAMALZEME KARAKTERİSTİĞİ  
GÖSTEREN REZONATÖRLER KULLANARAK ÇOK  
BANTLI MİKROŞERİT FİLTRE UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MURAT EMÜR**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2015**

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



**BANT GEÇİREN-BANT TUTAN GEÇİŞİ MEKANİK VEYA  
ELEKTRONİK OLARAK ANAHTARLANABİLİR FİLTRE  
TASARIMI VE METAMALZEME KARAKTERİSTİĞİ  
GÖSTEREN REZONATÖRLER KULLANARAK ÇOK  
BANTLI MİKROŞERİT FİLTRE UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MURAT EMÜR**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2015**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Murat EMÜR tarafından hazırlanan “**Bant Geçiren-Bant Tutan Geçiş Mekanik veya Elektronik Olarak Anahtarlanabilir Filtre Tasarımı ve Metamalzeme Karakteristiği Gösteren Rezonatörler Kullanarak Çok Bantlı Mikroşerit Filtre Uygulamaları**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 29.07.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

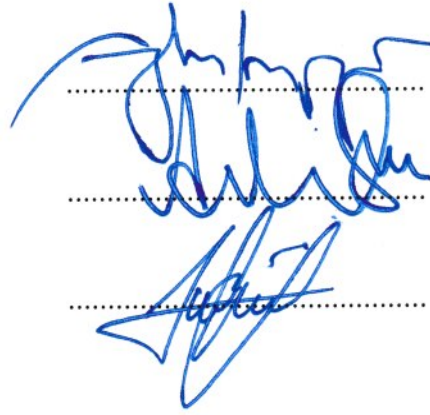
Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof. Dr. Ceyhun KARPUZ

Üye  
Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZEK

Üye  
Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
20/08/2015 tarih ve ...31/10.... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 112E041 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.**

Murat EMÜR



## ÖZET

**BANT GEÇİREN-BANT TUTAN GEÇİŞİ MEKANİK VEYA  
ELEKTRONİK OLARAK ANAHTARLANABİLİR FİLTRE TASARIMI  
VE METAMALZEME KARAKTERİSTİĞİ GÖSTEREN  
REZONATÖRLER KULLANARAK ÇOK BANTLI MİKROŞERİT  
FİLTRE UYGULAMALARI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MURAT EMÜR  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. CEYHUN KARPUZ)  
DENİZLİ, TEMMUZ - 2015**

Bu tez kapsamında çok bantlı bant geçiren/bant tutan mikroşerit filtre tasarımları ile bant tutan-bant geçiren geçişine sahip mikroşerit filtre tasarımları gerçekleştirilmektedir. Bu doğrultuda öncelikle iki farklı metamalzeme davranışlı çift modlu rezonatör tasarlanmaktadır. Tasarlanan rezonatörler iki farklı tipte beslenerek rezonatörlerin karakteristik özellikleri ortaya koyulmaktadır. Rezonatörlerin düz bir iletim hattından beslenmesi durumunda bant tutan filtre tasarımı, topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumunda ise bant geçiren filtre tasarımı gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan rezonatörlerin her iki beslenme durumundaki teorik analizlerini gerçekleştirebilmek için eşdeğer devre modelleri çıkarılmaktadır. Bu eşdeğer devrelere tek-çift (odd-even) mod analizi uygulanarak saçılma parametreleri (iletim ( $S_{21}$ ) ve yansıma ( $S_{11}$ )) elde edilip simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma sonucunda simülasyon ve teorik sonuçların mükemmel bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Önerilen rezonatörlerin farklı elektriksel uzunlukta kullanılmaları veya rezonatörlerin herbir modundan (tek-çift modlar) farklı bandlar oluşturmak suretiyle çok bantlı bant geçiren ve bant tutan filtreler tasarlanmaktadır. Tasarlanan filtre parametrelerinin (kapasitör değerleri, fiziksel uzunluklar, vb.) saçılma parametreleri üzerine etkileri incelenmektedir. Tasarlanan filtre yapıları yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımları için oldukça uygun bir geometriye sahiptir. Bu geometri kullanılarak tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrenin vereceği frekans cevabı kullanılan rezonatörlere, besleme hatlarının tipine (topraklanmış veya düz bir iletim hattı) ve anahtarların pozisyonuna göre çeşitlilik göstermektedir. Bu çeşitlilikler bir tablo halinde tezde sunulmaktadır. Tasarlanan yapılardan dört bantlı bant tutan filtre ve bant tutan - bant geçiren - tüm tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtre RT/Duroid taban malzeme kullanılarak imal edilmektedir. Deney sonuçları ile simülasyon sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Tez kapsamındaki çift modlu rezonatörler ve yeniden yapılandırılabilir filtreler için sunulan genel tasarım prosedürü ileride yapılacak çalışmalara önemli derecede yol gösterici niteliktedir.

**ANAHTAR KELİMELEER: Çift modlu rezonatör, metamalzeme, çok bantlı, bant geçiren, bant tutan, mikroşerit filtre, yeniden yapılandırılabilir, anahtarlama.**

## **ABSTRACT**

### **MECHANICALLY OR ELECTRONICALLY SWITCHABLE BANDPASS TO BANDSTOP FILTER DESIGN AND MULTIBAND MICROSTRIP FILTER APPLICATIONS USING RESONATORS HAVING METAMATERIAL CHARACTERISTIC**

**MSC THESIS**

**MURAT EMÜR**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:PROF. DR. CEYHUN KARPUZ)**

**DENİZLİ, JULY 2015**

In this thesis, designs of multi-band microstrip bandpass/bandstop filters and bandpass-to-bandstop filters are achieved. For this purpose, firstly, two different dual-mode resonators having metamaterial behaviour are designed. Characteristic features of the designed resonators in two different feeding types are introduced. Bandstop filter design can be achieved by feeding the resonators with a straight transmission line, whereas bandpass filter design can be achieved by feeding the resonators with a grounded transmission line. Equivalent circuit models of the designed resonators are extracted in order to realize the theoretical analysis for both feeding arrangement. Scattering parameters (transmission ( $S_{21}$ ) and reflection ( $S_{11}$ )) are obtained by applying even-odd mode analysis and they are also compared with the simulated results. It is observed that the simulated and theoretical results are in an excellent agreement. Multi-band bandpass and bandstop filters are designed by forming different bands from each mode (even-odd modes) of the resonators or by using the proposed resonators in different electrical lengths. Effects of various parameters (capacitance values, physical dimensions, etc.) of the designed filters on the frequency responses are also investigated. The designed filter structures have a quite suitable geometry for the design of reconfigurable filters. Frequency response of the designed reconfigurable filter constructed by using the mentioned geometry varies depending on the resonators, types of feeding lines (grounded or straight transmission line) and switching positions. These variations are presented as a table in this thesis. The designed quad-band bandstop filter and bandpass-to-bandstop filters are fabricated by using RT/Duroid substrates. Theoretical, simulated and experimental results are observed in a good agreement. The general procedure proposed in this thesis for dual-mode resonators and reconfigurable filters is thought to be a directive concept for future works.

**KEYWORDS: Dual mode resonator, metamaterial, multi-band, bandpass, bandstop, microstrip filter, reconfigurable, switching**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1    Literatür Taraması .....	2
<b>2. METAMALZEME KARAKTERİSTİĞİ GÖSTEREN REZONATÖRLER</b> .....	<b>13</b>
2.1    Tek ve Çift Modlu Rezonatörler .....	13
2.1.1    İletim ve Yansıma Katsayılarının İfadelerinin Türetilmesi .....	19
2.1.2    Çift Modlu Rezonatörün Metamalzeme Özelliği.....	26
2.2    Alternatif Çift Modlu Rezonatör .....	28
2.2.1    Alternatif Çift Modlu Rezonatörün Metamalzeme Özelliği .....	30
<b>3. ÇOK BANDLI MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMLARI</b> .....	<b>32</b>
3.1    İki Bantlı Filtre Tasarımları.....	32
3.1.1    İki Bantlı Bant Tutan Filtre Tasarımları .....	32
3.1.2    İki Bantlı Bant Geçiren Filtre Tasarımları.....	36
3.2    Üç Bantlı Filtre Tasarımları.....	40
3.2.1    Üç Bantlı Bant Tutan Filtre Tasarımları .....	41
3.2.2    Üç Bantlı Bant Geçiren Filtre Tasarımları.....	43
3.3    Dört Bantlı Filtre Tasarımları.....	45
3.3.1    Dört Bantlı Bant Tutan Filtre Tasarımları .....	45
3.3.1    Dört Bantlı Bant Geçiren Filtre Tasarımları .....	46
<b>4. ANAHTAR KULLANILARAK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR FİLTRE TASARIMLARI</b> .....	<b>48</b>
4.1    Bant Tutan-Bant Tutan Geçişli Yeniden Yapılandırılabilir Filtre Tasarımları.....	49
4.2    Bant Geçiren-Bant Geçiren Geçişli Yeniden Yapılandırılabilir Filtre Tasarımları.....	51
4.3    Bant Tutan-Bant Geçiren Geçişli Yeniden Yapılandırılabilir Filtre Tasarımları.....	52
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>54</b>
<b>6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER</b> .....	<b>59</b>
<b>7. KAYNAKLAR</b> .....	<b>61</b>
<b>8. ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>69</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: a)Çift modlu rezonatör yapısı ve b) çift modlu rezonatör kullanılarak tasarlanan çift bantlı filtre yapısı.....	3
Şekil 1.2: Rezonatörün fiziksel ölçütlerindeki değişimin filtrenin frekans cevabına etkisi .....	4
Şekil 1.3: (a) İmal edilen filtrenin fotoğrafı ve (b) Tasarlanan filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	4
Şekil 1.4: (a) Tasarlanan dört modlu rezonatör yapısı ve b) tasarlanan dört modlu rezonatörün zayıf kuplaj altında frekans cevabı.....	4
Şekil 1.5: (a) Tasarlanan dört bantlı bant geçiren filtre yapısı ve (b) tasarlanan filtrenin ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	5
Şekil 1.6: (a) Önerilen yan hat yüklü rezonatör yapısı, (b) üç tane iletim sıfırına sahip ve (c) dört tane iletim sıfırına sahip iki bantlı filtre yapıları.....	5
Şekil 1.7: Önerilen yan hat yüklü rezonatör kullanılarak tasarlanan (a) üç tane iletim sıfırına sahip ve (b) dört tane iletim sıfırına sahip iki bantlı filtre yapılarının frekans cevapları .....	6
Şekil 1.8: Asimetrik basamak empedans rezonatör kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant geçiren filtre yapısı ve S parametreleri .....	6
Şekil 1.9: Geleneksel açık halka rezonatör ve kıvrımlı açık halka rezonatör kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre a) yapısı ve b) frekans cevabı.....	7
Şekil 1.10: İmal edilen filtrenin a) fotoğrafı ve b) ölçüm ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırması.....	7
Şekil 1.11: (a) Yan hat yüklü rezonatör kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant tutan filtre ve (b) S parametreleri .....	7
Şekil 1.12: a) İnterdijital varaktörün fabrikasyon aşamaları ve b) üretilen interdijital varaktörün kapasitansının ve kayıp tanjantının uygulanan gerilime göre değişimi.....	8
Şekil 1.13: Tasarlanan filtrenin a) yapısı, b) eklemler arası kaybı ve c) dönme kaybı.....	9
Şekil 1.14: Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrenin (a) yapısı, (b) anahtar ON durumundayken frekans cevabı ve (c)anahtar OFF durumundayken frekans cevabı.....	9
Şekil 1.15: a) Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtre yapısı b) pin diyot OFF ve c) pin diyot on durumundayken frekans cevabı .....	10
Şekil 1.16: a) Tasarlanan bant geçiren/bant tutan dönüşümlü filtre yapısı, b) $V_{aw}=0V$ ve c) $V_{aw}=1.5V$ durumlarında frekans cevabı.....	10
Şekil 1.17: a) Metamalzeme davranışlı filtrenin birim hücre yapısı ve b) toplu elemanlarla eşdeğer devresi .....	11
Şekil 1.18: a) Metamalzeme davranışlı filtre yapısı ve b) frekans cevabı .....	12
Şekil 1.19: Metamalzeme davranışlı filtrenin birim hücre yapısı .....	12
Şekil 1.20: a) Metamalzeme davranışlı filtre yapısı ve b) frekans cevabı .....	12
Şekil 2.1: Tek modlu rezonatörün a) iki boyutlu ve b) üç boyutlu görünümü.....	14
Şekil 2.2: Tek modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslenmesi.....	14
Şekil 2.3: Düz bir iletim hattının ve düz bir iletim hattından beslenen tek modlu rezonatörün oluşturduğu yapının iletim ve yansıma katsayıları.....	15

Şekil 2.4: Tek modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansıma katsayılarının genliğinin (a) $C_a$ parametresine göre ( $l_a=4.2\text{mm}$ ) ve (b) $l_a$ parametresine göre ( $C_a=0.2\text{pF}$ ) değişim grafikleri.....	15
Şekil 2.5: Tek modlu rezonatörün topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi.....	16
Şekil 2.6: Topraklanmış bir iletim hattının ve topraklanmış bir iletim hattından beslenen tek modlu rezonatörün oluşturduğu yapının iletim ve yansıma katsayılarının genlikleri .....	16
Şekil 2.7: Tek modlu rezonatörün topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin (a) $C_a$ parametresine göre ( $l_a=4.2\text{mm}$ ) ve (b) $l_a$ parametresine göre ( $C_a=0.2\text{pF}$ ) değişim grafikleri.....	17
Şekil 2.8: Çift modlu rezonatörün (a) iki boyutlu ve (b) üç boyutlu görünümü .....	17
Şekil 2.9: Çift modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin (a) $C_b$ parametresine göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ , $l_a=4.2\text{mm}$ ) ve (b) $C_a$ parametresine göre ( $C_b=7.0\text{pF}$ , $l_a=4.2\text{mm}$ ) değişim grafikleri .....	18
Şekil 2.10: Çift modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslenmesi durumunda (a) iletim ve yansıma katsayılarının $l_a$ parametresine göre değişimi ( $C_a=0.2\text{pF}$ , $C_b=2.0\text{pF}$ ) ve (b) eliptikten lineer faza geçiş ( $C_a=0.0\text{pF}$ , $l_a=4.2\text{mm}$ ).....	18
Şekil 2.11: Çift modlu rezonatörün topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin (a) $C_b$ parametresine göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ , $l_a=4.2\text{mm}$ ) ve (b) $C_a$ parametresine göre ( $C_b=10.0\text{pF}$ , $l_a=4.2\text{mm}$ ) değişim grafikleri .....	19
Şekil 2.12: Çift modlu rezonatörün topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin $l_a$ parametresine göre değişimi ( $C_a=0.2\text{pF}$ , $C_b=2.0\text{pF}$ ).....	19
Şekil 2.13: ÇMR' nin düz bir iletim hattından beslendiği durumdaki tek ve çift mod eşdeğer devreleri .....	20
Şekil 2.14: Çift modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslendiği durumda iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin teorik ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ( $C_a=7.5\text{pF}$ , $C_b=0.0\text{pF}$ ) (a) geniş bant ve (b) dar bant .....	23
Şekil 2.15: Elde edilen teorik ifadeler kullanılarak iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin (a) $C_b$ kapasitansına göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ ) ve (b) $C_a$ kapasitansına göre ( $C_b=8.0\text{pF}$ ) değişim grafikleri.....	24
Şekil 2.16: Eliptik karakteristiğinden lineer faz karakteristiğine geçiş.....	24
Şekil 2.17: ÇMR' nin topraklanmış bir iletim hattından beslendiği durumdaki tek ve çift mod eşdeğer devreleri .....	25
Şekil 2.18: İletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin teorik ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ( $C_a=0.0\text{pF}$ , $C_b=10.0\text{pF}$ ) (a) geniş bant ve (b) dar bant .....	26
Şekil 2.19: Elde edilen teorik ifadeler kullanılarak iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin (a) $C_b$ kapasitansına göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ ) ve (b) $C_a$ kapasitansına göre ( $C_b=10.0\text{pF}$ ) değişim grafikleri.....	26

Şekil 2.20: Çift modlu rezonatörün (a) düz ve (b) topraklanmış bir iletim hattından beslendiği durumlarda dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenliğin saçılma parametreleriyle birlikte değişimi.....	28
Şekil 2.21: Alternatif çift modlu rezonatörün a) iki boyutlu ve b) üç boyutlu görünümü .....	29
Şekil 2.22: Geleneksel açık halka rezonatörün topraklanmasıyla çift modlu rezonatör oluşturulması (a) dar bant ve (b) geniş bant.....	29
Şekil 2.23: Yansıma ve iletim katsayılarının genliğinin $l_c$ parametresine göre değişimi ( $C_a=0.0pF$ , $C_b=0.0pF$ ) .....	30
Şekil 2.24: Yansıma ve iletim katsayılarının genliğinin (a) $C_a$ parametresine göre ( $C_b=0.0pF$ , $l_c=2.4mm$ ) ve (b) $C_b$ parametresine göre ( $C_a=0.0pF$ , $l_c=2.4mm$ ) değişim grafikleri.....	30
Şekil 2.25: Alternatif çift modlu rezonatörün (a) düz bir iletim hattından ve (b) topraklanmış bir iletim hattından beslendiği durumda dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenliğin saçılma parametreleriyle birlikte değişimi.....	31
Şekil 3.1: ÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısı.....	33
Şekil 3.2: ÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısının iletim ve yansıma katsayılarının genliğinin (a) $C_a$ parametresine göre ( $C_b=4.7pF$ , $d_r=4.0mm$ ) ve (b) $C_b$ parametresine göre ( $C_a=0.8pF$ , $d_r=4.0mm$ ) değişim grafikleri .....	33
Şekil 3.3: ÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısının iletim ve yansıma katsayılarının genliğinin $d_r$ parametresine göre değişimi ( $C_a=0.6pF$ , $C_b=4.7pF$ ) (a) geniş bant, (b) ve (c) dar bant .....	34
Şekil 3.4: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısı.....	35
Şekil 3.5: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısının iletim ve yansıma katsayılarının $l_c$ parametresine göre değişimi ( $C_a=0.0pF$ , $C_b=0.0pF$ , $d_r=2.0mm$ ) .....	35
Şekil 3.6: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısının iletim ve yansıma katsayılarının genliğinin (a) $C_a$ parametresine göre ( $C_b=0.0pF$ , $l_c=1.2mm$ , $d_r=2.0mm$ ) ve (b) $C_b$ parametresine göre ( $C_a=0.0pF$ , $l_c=1.2mm$ , $d_r=2.0mm$ ) değişim grafikleri.....	35
Şekil 3.7: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısının iletim ve yansıma katsayılarının genliğinin $d_r$ parametresine göre değişimi ( $C_a=0.0pF$ , $C_b=0.0pF$ , $l_c=1.2mm$ ) (a) geniş bant (b) ve (c) dar bant.....	36
Şekil 3.8: ÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısı.....	37
Şekil 3.9: ÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısının iletim ve yansıma katsayılarının genliğinin (a) $C_a$ parametresine göre ( $C_b=2.8pF$ , $d_r=3.6mm$ ) ve (b) $C_b$ parametresine göre ( $C_a=0.3pF$ , $d_r=3.6mm$ ) değişim grafikleri .....	37
Şekil 3.10: ÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısının iletim ve yansıma katsayılarının genliğinin $d_r$ parametresine göre değişimi ( $C_a=0.1pF$ , $C_b=2.8pF$ ) (a) geniş bant (b) ve (c) dar bant.....	38
Şekil 3.11: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısı.....	39
Şekil 3.12: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısının iletim ve yansıma katsayılarının genliğinin (a) $C_a$ parametresine göre ( $C_b=0.0pF$ , $l_c=2.0mm$ , $d_r=2.0mm$ ) ve (b) $C_b$ parametresine göre ( $C_a=0.0pF$ , $l_c=2.0mm$ , $d_r=2.0mm$ )değişim grafikleri.....	39

Şekil 3.13: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısının iletim ve yansıma katsayılarının $l_c$ parametresine göre değişimi ( $C_a=0.0pF$ , $C_b=0.0pF$ , $d_r=2.0mm$ ) .....	39
Şekil 3.14: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısının iletim ve yansıma katsayılarının genişliğinin $d_r$ parametresine göre değişimi ( $C_a=0.0pF$ , $C_b=0.0pF$ , $l_c=2.0mm$ ) (a) geniş bant (b) ve (c) dar bant.....	40
Şekil 3.15: (a) TMR ve ÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre yapısı ve (b) üç bantlı bant tutan filtre tasarımının aşamaları(filtre parametreleri: $l_a=4.2mm$ , $l_b=10.0mm$ , $l_d=3.4mm$ , $w_r=0.8mm$ , $g=1.2mm$ , $d=0.2mm$ , $d_{pr}=0.2mm$ , $d_r=4.0mm$ , $C_a=0.8pF$ , $C_b=3.8pF$ , $C_d=0.3pF$ ) .....	41
Şekil 3.16: TMR ve ÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeysel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı .....	41
Şekil 3.17: (a) TMR ve AÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre yapısı ve (b) üç bantlı bant tutan filtre tasarımının aşamaları(filtre parametreleri: $l_a=4.0mm$ , $l_b=10.0mm$ , $l_d=4.0mm$ , $l_c=1.2mm$ , $w_r=0.6mm$ , $g=1.2mm$ , $d=0.2mm$ , $d_{pr}=0.2mm$ , $d_r=2.0mm$ , $C_a=0.0pF$ , $C_b=0.0pF$ , $C_d=0.0pF$ ) .....	42
Şekil 3.18: TMR ve AÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeysel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı .....	42
Şekil 3.19: (a) TMR ve ÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtre yapısı ve (b) üç bantlı bant geçiren filtre tasarımının aşamaları(filtre parametreleri: $l_a=5.8mm$ , $l_b=10.0mm$ , $l_d=3.4mm$ , $w_r=0.8mm$ , $g=1.2mm$ , $d=0.2mm$ , $d_{pr}=0.2mm$ , $d_r=3.6mm$ , $C_a=0.6pF$ , $C_b=2.8pF$ , $C_d=0.3pF$ ) .....	43
Şekil 3.20: TMR ve ÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeysel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı .....	43
Şekil 3.21: (a) TMR ve AÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtre yapısı ve (b) üç bantlı bant geçiren filtre tasarımının aşamaları(filtre parametreleri: $l_a=4.6mm$ , $l_b=10.0mm$ , $l_d=4.0mm$ , $l_c=2.0mm$ , $w_r=0.6mm$ , $g=1.2mm$ , $d=0.2mm$ , $d_{pr}=0.2mm$ , $d_r=2.0mm$ , $C_a=0.0pF$ , $C_b=1.0pF$ , $C_d=0.0pF$ ) .....	44
Şekil 3.22: TMR ve AÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeysel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı .....	44
Şekil 3.23: (a) ÇMR kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant tutan filtre yapısı ve (b) dört bantlı bant tutan filtre tasarımının aşamaları (filtre parametreleri: $l_a=6.0mm$ , $l_b=10.0mm$ , $l_d=4.2mm$ , $w_r=0.8mm$ , $g=1.2mm$ , $d=0.2mm$ , $d_{pr}=0.2mm$ , $d_r=4.0mm$ , $C_a=0.2pF$ , $C_b=8.2pF$ , $C_d=0.8pF$ , $C_e=4.8pF$ ) .....	45
Şekil 3.24: ÇMR kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant tutan filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeysel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı.....	46
Şekil 3.25: (a) ÇMR kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant geçiren filtre yapısı ve (b) Dört bantlı bant geçiren filtre tasarımının aşamaları(filtre parametreleri: $l_a=6.0mm$ , $l_b=10.0mm$ , $l_d=4.2mm$ , $w_r=0.8mm$ ,	



g=1.2mm, d=0.2mm, dpr=0.2mm, dr=4.0mm, Ca=0.1pF, Cb=8.2pF, Cd=0.6pF, Ce=4.8pF) .....	47
Şekil 3.26: ÇMR kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant tutan filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeysel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı.....	47
Şekil 4.1: Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrelerin genel şematik diyagramı	48
Şekil 4.2: Bant tutan-bant tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımı .....	50
Şekil 4.3: Tasarlanan bant tutan-bant tutan-tüm tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtrenin farklı anahtar pozisyonlarına göre frekans cevapları (la=4.2mm, lb=10.0mm, ly=4.2mm, lhh=4.0mm, dr1=2.0mm, dr2=1.0mm, dpr1=3.6mm, dpr2=4.1mm, d=0.2mm, g=1.2mm, wr=0.8mm, Ca=0.6pF, Cb=15.0pF, Cy=0.2pF, Cz=4.7pF )	50
Şekil 4.4: Bant geçiren-bant geçiren geçişli yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımı .....	51
Şekil 4.5: Tasarlanan bant geçiren-bant geçiren-tüm tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtrenin farklı anahtar pozisyonlarına göre frekans cevapları (la=4.8mm, lb=10.0mm, ly=4.2mm, lhh=4.0mm, dr1=2.0mm, dr2=2.4mm, dpr1=2.6mm, dpr2=2.4mm, d=0.2mm, g=1.2mm, wr=0.8mm, Ca=0.2pF, Cb=2.8pF, Cy=0.0pF, Cz=2.0pF ) ..	52
Şekil 4.6: Bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımı .....	53
Şekil 4.7: Tasarlanan bant tutan-bant geçiren geçişli yeniden yapılandırılabilir filtrenin farklı anahtar pozisyonlarına göre frekans cevapları (la=4.8mm, lb=10.0mm, ly=4.2mm, lhh=4.0mm, dr1=2.0mm, dr2=2.0mm, dpr1=2.6mm, dpr2=2.6mm, d=0.2mm, g=1.2mm, wr=0.8mm, Ca=0.2pF, Cb=2.8pF, Cy=0.6pF, Cz=15.0pF ).....	53
Şekil 5.1: İmal edilen dört bantlı bant tutan filtrenin (a) fotoğrafı ve (b) network analizör ile yapılan ölçümüne dair bir fotoğraf.....	55
Şekil 5.2: Dört bant bant tutan filtrenin ölçüm ve simülasyon sonuçları a) geniş bant ve b) dar bant.....	55
Şekil 5.3: İmal edilen tek bantlı bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin (a) fotoğrafı ve (b) network analizör ile yapılan ölçümüne dair bir fotoğraf.....	56
Şekil 5.4: Bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırması (a) S1 ve S2 anahtarları: A konumunda, (b) S1 ve S2 anahtarları: B konumunda (c) S1 anahtarı: A konumunda, S2 anahtarı: B konumunda ve (d) S1 anahtarı: B konumunda, S2 anahtarı: A konumunda .....	56
Şekil 5.5: (a) İmal edilen bant tutan-bant geçiren-tüm durduran geçişli filtrenin fotoğrafı ve (b) imal edilen bant tutan-bant geçiren-tüm durduran geçişli filtrenin network analizör ile yapılan ölçümüne dair bir fotoğraf.....	57
Şekil 5.6: Bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırması (a) S1 ve S2 anahtarları: A konumunda, (b) S1 ve S2 anahtarları: B konumunda (c) S1 anahtarı: A konumunda, S2 anahtarı: B konumunda ve (d) S1 anahtarı: B konumunda, S2 anahtarı: A konumunda .....	58

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 4.1: Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrenin farklı durumlarda verdiği frekans cevapları. ....	49
Tablo 5.1: Dört bantlı bant tutan filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarına dair sayısal değerler. ....	55
Tablo 5.2: Bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarına dair bazı sayısal değerler.....	57
Tablo 5.3: Bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarına dair bazı sayısal değerler.....	58

## SEMBOL LİSTESİ

<b>TMR</b>	:	Tek modlu rezonatör
<b>ÇMR</b>	:	Çift modlu rezonatör
<b>AÇMR</b>	:	Alternatif çift modlu rezonatör
<b>elp.</b>	:	Eliptik
<b>l.f.</b>	:	Lineer faz
<b>RL</b>	:	Return loss (dönme kaybı)
<b>IL</b>	:	Insertion loss (eklemler arası kayıp)
<b>BW</b>	:	Bandwidth (bant genişliği)
<b>f<sub>c</sub></b>	:	Merkez frekans

## ÖNSÖZ

Öncelikle, beni yetiştiren, her an maddi ve manevi olarak destekleyen anama, babama ve kardeşlerime ayrı ayrı teşekkür ediyorum. Bu çalışma süresince beni yönlendiren ve yardımlarını benden esirgemeyen, tez danışmanım Prof. Dr. Ceyhun KARPUZ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hiç bir konuda yardımını benden esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZEK, Araş. Gör. Ali Kürşad GÖRÜR ve Araş. Gör. Pınar ÖZTÜRK ÖZDEMİR' e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması sırasında desteklerinden dolayı tüm arkadaşlarıma tek tek teşekkür ediyorum. Devrelerin basımını yapan Teknisyen Hakan BİLGE' ye teşekkür ederim.

# 1. GİRİŞ

Mikrodalga, frekansı 300MHz ile 300GHz arasındaki elektromanyetik dalgalara verilen genel bir adlandırma değildir. Bu frekans sahasına düşen dalga boyları ise 1mm ile 1m arasında değişmektedir. Dalga boyu 1cm'den küçük olan elektromanyetik dalgalara milimetrik dalgalar da denmektedir. Diğer elektromanyetik dalgalarda da olduğu gibi mikrodalgalar ve milimetrik dalgalar da yüklerin ivmeli hareketi neticesinde oluşabilmektedir.

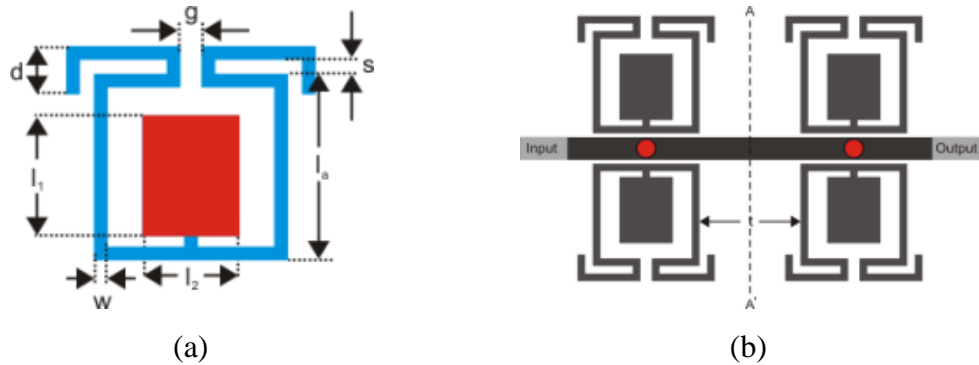
Yüksek frekans (veya kısa dalga boyu) etkilerinden dolayı standart devre teorisi mikrodalga problemlerinde doğrudan kullanılamaz. Zaten standart devre teorisi Maxwell denklemlerini içeren elektromanyetik teorisinin özel bir yaklaşımıdır. Mikrodalga yapılarında ilgilenilen yapının ölçütleri ile dalga boyu aynı mertebede olduğundan dolayı akımın ve gerilimin fazı yapı boyunca önemli derecede değişir. Bu yüzden mikrodalga yapılar dağılmış elemanlar gibi davranmaktadır.

RF ve mikrodalga mühendisliğindeki problemlerin çözümü Maxwell denkleminin çözümüne dayanmaktadır. Fakat Maxwell denklemi uzay ve zamana bağlı diferensiyel veya integral işlemleri içerdiğinden dolayı matematiksel olarak çözümü genelde zordur. Maxwell denklemlerinin çözümü neticesinde ilgilenilen yapının tüm noktalarındaki elektrik alan ve manyetik alan değerleri tanımlanmış olur. Fakat çoğu mikrodalga probleminde tüm noktadaki değerlerden ziyade sadece uç noktadaki değerlerin bilinmesi problemin çözümü için yeterlidir. Bu doğrultuda, doğrudan Maxwell denklemlerinin çözümüne gitmeksizin iletim hatları gibi dağılmış elemanları ve saçılma parametreleri gibi kavramları içerecek biçimde genişletilmiş basit bir mikrodalga devre teorisi sıklıkla kullanılmaktadır.

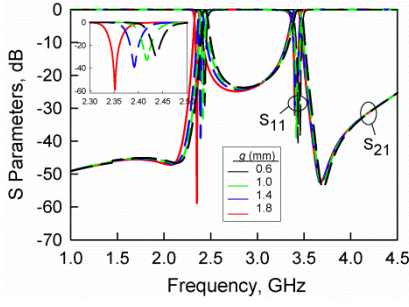
## 1.1 Literatür Taraması

Filtre, belli bir frekans bölgesindeki sinyalleri geçiren belli bir frekans bölgesindeki sinyalleri durduran iki portlu bir sistemdir. Özel olarak mikrodalga filtre, mikrodalga frekans bölgesinde filtreleme işlevi yapan iki portlu sistemdir. Mikrodalga filtreler istenilen özelliklere bağlı olarak dielektrik rezonatörler, dalga kılavuzu, koaksiyel hat veya mikroşerit hat gibi yapılar kullanılarak tasarlanabilmektedir. Koaksiyel hat kullanımına dayanan filtreler düşük eklemler arası kayba ve kompakt boyutlara sahiptir, fakat fabrikasyonu zordur. Dielektrik rezonatör kullanımına dayanan filtreler düşük boyutlara ve düşük eklemler arası kayba sahiptir, fakat fiyat pahalılığı ve işlem tekniklerinin kompleksliği açısından dezavantajlara sahiptir. Dalga kılavuzu filtreler uzun ömür, düşük eklemler arası kayıp, yüksek güç kapasitesi ve 100GHz'e kadar uygulanabilirlik açısından avantajlıdır, fakat diğer tip iletim hatlarını kullanan filtrelere kıyasla boyutları çok büyüktür. Mikroşerit hat kullanımına dayanan filtreler düşük boyut, kolay imalat, düşük fiyat ve diğer aktif veya pasif cihazlarla kolay entegre edilebilmesi açısından avantajlara sahiptir, fakat eklemler arası kayıplar diğer iletim hatlarını kullanan filtrelere göre yüksektir. Mikroşerit hat kullanan filtrelerdeki bu dezavantaj, yüksek kritik sıcaklığa sahip süperiletken malzemeler ve fabrikasyon teknolojilerindeki son gelişmelerle birlikte ortadan kaldırılabilir(Talisa ve diğ. 1991), (Kang ve diğ. 1995), (Liu ve diğ. 2013), (Liu ve diğ. 2014). Çok bantlı mikroşerit filtreler eş zamanlı olarak birden fazla frekans bölgesi üzerinde işlem yapabildiği içinkablosuz, mobil ve uydu haberleşme sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürde çok bantlı filtre tasarımları farklı yöntemlerle gerçekleştirilmekte olup bu filtre tasarım metodlarında, çok modlu rezonatörler (Liu ve diğ. 2010),(Chen 2012), (Gorur ve diğ. 2014), (Karpuz ve diğ. 2013), (Liu ve diğ. 2013), (Weng ve diğ. 2014), (Tsou ve Tu 2011), (Hong ve diğ. 2007), (Athukorola ve Budimir 2009), (Doan ve diğ. 2012), (Xu ve diğ. 2012), (Chen 2013), (Haiwen ve diğ. 2014), çoklu rezonatörler (Wu ve Yang 2011), yan hat yüklü rezonatörler (Wei ve diğ. 2014), (Wu ve diğ. 2011), (Zhang 2010), (Chen ve diğ. 2008), (Zhu ve diğ. 2014), (Koh ve Lum 2012), (Chen ve Qiu 2012), (Zhang ve diğ. 2007), (Mondal ve Mandal 2008) basamak empedans tipi rezonatörler (Wu ve Yang 2011), (Chu ve Chen 2008), (Mashhadi ve Komjani 2014), (Chu ve Lin 2008), (Deng ve diğ. 2011), (Wu ve diğ. 2008), (Lee ve diğ. 2006), (Choi ve diğ. 2013), (Liu ve diğ. 2013), (Kim ve Chang. 2011), (Wu ve diğ.

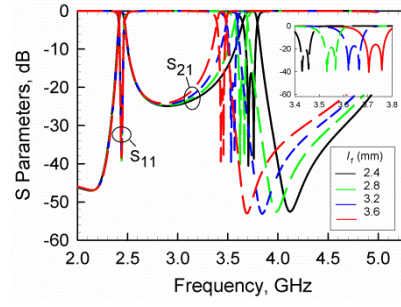
2014), (Chen ve diğ. 2011), (Hsu ve diğ. 2008), (Ahumada ve diğ. 2010), (Zhang ve Sun 2006), (Liu ve Tung 2011), (Ghatak ve diğ. 2011), (Li ve diğ. 2014) ve çok katmanlı dielektrik (Wu ve diğ. 2012), (Hsu ve Tu 2009), (Weng ve Hsiao 2009), (Rebenaque ve diğ. 2010) sıklıkla kullanılmaktadır. Çok modlu rezonatörlerde birden fazla rezonans frekansı elde edilebildiği için, çok modlu rezonatörler çok bantlı filtre tasarımlarında devre boyutlarında önemli derecede minyatürizasyon sağlamaktadır. Gorur ve diğ. tarafından çift modlu rezonatör kullanılarak çift bantlı filtre tasarlanmıştır (Gorur ve diğ. 2014). Bu filtre tasarımında simetri ekseninin hem sol hem de sağ kısmına özdeş çift modlu rezonatörler yerleştirilmiştir. Bu yerleşim filtrenin her bir bandında çift kutup elde edilip filtrenin seçiciliğini artırmıştır. Rezonatörün odd modu filtrenin ikinci geçirme bandını oluştururken, rezonatörün even modu filtrenin birinci geçirme bandını oluşturmaktadır. Tasarlanan rezonatör ve filtre yapısı sırasıyla Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Tasarlanan çift modlu rezonatörde, kıvrımlar arası boşluk kapasitansı rezonatörün birinci rezonans frekansını kontrol ederken rezonatörün dikey simetri eksenine yerleştirilmiş yüklem elemanının boyutları rezonatörün ikinci rezonans frekansını kontrol etmektedir. Rezonatörün fiziksel ölçütlerindeki bu değişimlerin filtrenin frekans cevabı üzerine etkisi Şekil 1.2'de gösterilmektedir. Tasarlanan filtrenin geçirme bantlarının merkez frekansları 2.45GHz(WLAN) ve 3.50GHz(WiMAX) frekanslarına ayarlanmıştır. Tasarlanan filtre imal edilmiş ve tasarlanan filtrenin ölçüm sonuçlarıyla simülasyon sonuçları iyi bir uyum içindedir. İmal edilen filtrenin fotoğrafı ile simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırması ise Şekil 1.3'te gösterilmektedir. Ayrıca tasarlanan filtre metamalzeme davranışı göstermektedir.



Şekil 1.1: a)Çift modlu rezonatör yapısı ve b) çift modlu rezonatör kullanılarak tasarlanan çift bantlı filtre yapısı

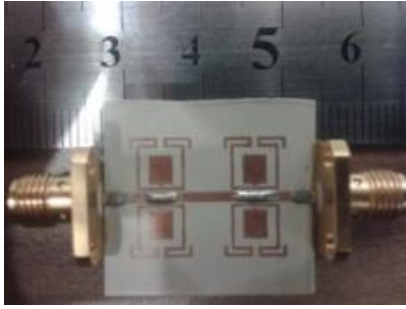


(a)

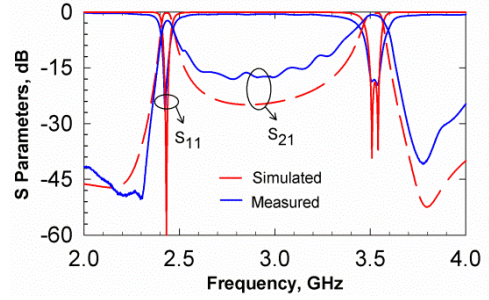


(b)

Şekil 1.2: Rezonatörün fiziksel ölçütlerindeki değişimin filtrenin frekans cevabına etkisi



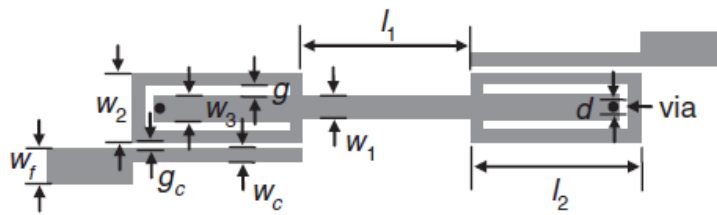
(a)



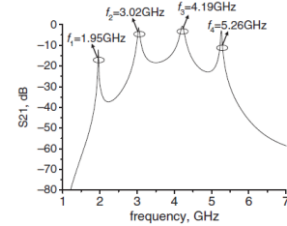
(b)

Şekil 1.3: (a) İmal edilen filtrenin fotoğrafı ve (b) Tasarlanan filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Xu ve diğ. tarafından dört modlu rezonatör kullanılarak dört bantlı filtre tasarlanmıştır (Xu ve diğ. 2012). Tasarlanan dört modlu rezonatör yapısı ve rezonatörün zayıf kuplaj altında frekans cevabı Şekil 1.4'de verilmektedir. Tasarlanan rezonatörün mod frekansları rezonatörün fiziksel ölçütlerinin değişimiyle ayarlanabilmektedir. Fakat fiziksel ölçütlerden biri değiştirildiğinde birden fazla mod frekansı değişmektedir. Dört modlu rezonatör kullanılarak tasarlanan dört bantlı band geçiren filtre Şekil 1.5'de gösterilmektedir. Tasarlanan filtrenin geçirme bantlarının merkez frekansları 1.9/2.8/4.3/5.2GHz frekanslarına ayarlanmıştır. Zhang ve diğ. tarafından yan hat yüklü rezonatör kullanılarak çift bantlı band geçiren filtre tasarımı yapılmıştır (Zhang ve diğ. 2007). Önerilen yan hat yüklü rezonatör Şekil



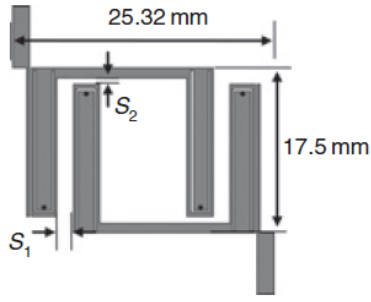
(a)



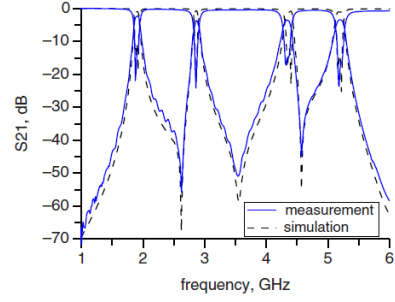
(b)

Şekil 1.4: a) Tasarlanan dört modlu rezonatör yapısı ve b) tasarlanan dört modlu rezonatörün zayıf kuplaj altında frekans cevabı





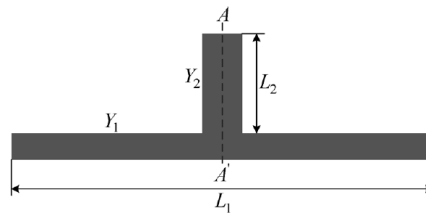
(a)



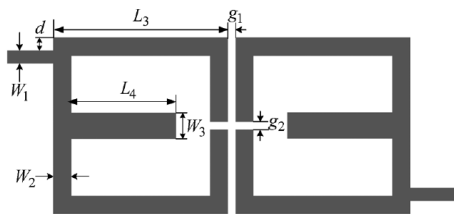
(b)

Şekil 1.5: (a) Tasarlanan dört bantlı bant geçiren filtre yapısı ve (b) tasarlanan filtrenin ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

1.6(a)'da gösterilmektedir. Önerilen rezonatörün even mod rezonans frekansı yan hat uzunluğunun değişimiyle geniş bir frekans ölçeğinde kaydırılabilmektedir. Önerilen rezonatör kullanılarak üç ve dört tane iletim sıfırına sahip iki bantlı iki farklı bant geçiren filtre tasarımı yapılmıştır. Şekil 1.6(b) ve Şekil 1.6(c)'de bahsedilen filtre yapıları gösterilmektedir. Tasarlanan filtrelerin frekans cevapları Şekil 1.7'de gösterilmektedir. Wu ve Yang tarafından asimetrik basamak empedans rezonatörler kullanılarak dört bantlı bant geçiren filtre tasarlanmıştır (Wu ve Yang 2011). Filtrede iki farklı ölçütte asimetrik basamak empedans rezonatör kullanılmaktadır. Asimetrik basamak empedans rezonatörlerden bir tanesi filtrenin birinci ve üçüncü geçirme bandını oluştururken diğer ölçütteki asimetrik basamak empedans rezonatör ikinci ve dördüncü geçirme bandını oluşturmaktadır. Tasarlanan filtre yapısı ve filtrenin frekans cevabı Şekil 1.8'de gösterilmektedir.



(a)

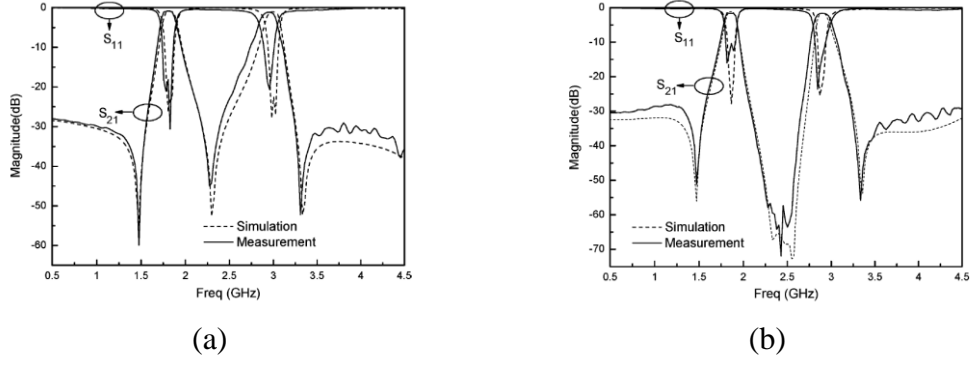


(b)

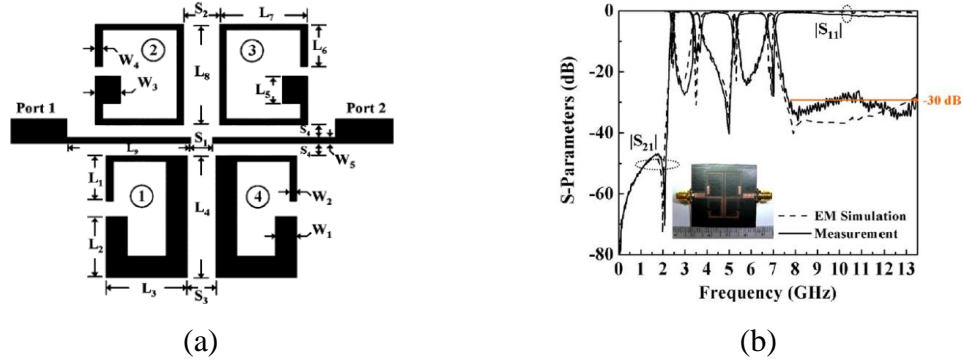


(c)

Şekil 1.6: (a) Önerilen yan hat yüklü rezonatör yapısı, (b) üç tane iletim sıfırına sahip ve (c) dört tane iletim sıfırına sahip iki bantlı filtre yapıları



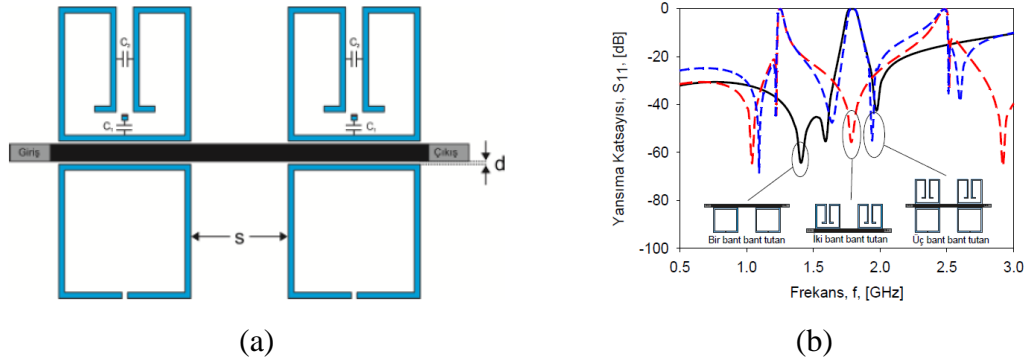
Şekil 1.7: Önerilen yan hat yüklü rezonatör kullanılarak tasarlanan (a) üç tane iletim sıfırına sahip ve (b) dört tane iletim sıfırına sahip iki bantlı filtre yapılarının frekans cevapları



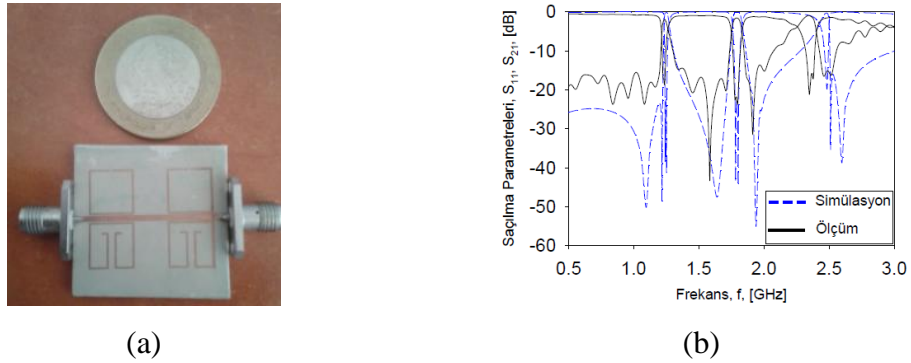
Şekil 1.8: Asimetrik basamak empedans rezonatör kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant geçiren filtre yapısı ve S parametreleri

Literatürde bant durdurucu filtreler genelde bir ve iki bantlı olup üç ve dört bantlı bant tutucu filtrelerin nispeten daha az olduğu görülmektedir (Ning ve diğ. 2012), (Adhikari ve Kim 2015), (Karpuz ve diğ. 2013), (Xiao ve diğ. 2010), (Huang ve Cheng 2010), (Karpuz ve diğ. 2014). Bunun başlıca sebepleri yüksek seçicilik elde edilememesi, son bantın kaybının yüksek olması, istenilen filtreleme karakteristiğinin elde edilememesi şeklinde sıralanabilir. Karpuz ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmada iki tür açık halka rezonatör tanıtılmaktadır (Karpuz ve diğ. 2014). Bunlardan biri geleneksel açık halka rezonatör olup bu rezonatör kullanılarak tek bantlı bant tutucu filtre tasarımı yapılmaktadır. Tasarlanan tek bantlı bant tutucu filtrenin bant merkez frekansı geleneksel açık halka rezonatörün toplam elektriksel uzunluğunun değişimiyle değiştirilebilmektedir. Bu çalışmada tanıtılan açık halka rezonatörlerden diğeri kıvrımlı açık halka rezonatör olup bu rezonatör geleneksel açık halka rezonatörün içe doğru kıvrılmasıyla oluşturulmaktadır. Kıvrımlı açık halka rezonatörün iki farklı bölgesindeki kapasitansın değiştirilmesiyle temel rezonans frekansı ve temel rezonans frekansının birinci harmonik frekansı kontrol edilebilmektedir. Bu sayede bu rezonatör kullanılarak iki bantlı bant tutucu filtre tasarlanabilmektedir. Geleneksel açık halka rezonatör ve kıvrımlı açık halka

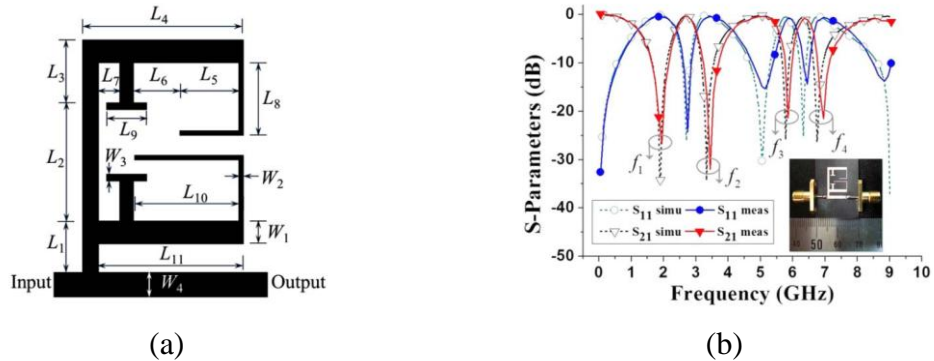
rezonatör birlikte kullanılarak üç bantlı bant tutan filtre tasarlanabilmektedir. Tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre yapısı ve filtre cevabı Şekil 1.9'da gösterilmektedir. İmal edilen devrenin fotoğrafı ve ölçüm sonuçları ise Şekil 1.10'da gösterilmektedir. Adhikari ve Kim tarafından yapılan bir çalışmada yan hat yüklü rezonatör kullanılarak dört bantlı bant tutan filtre tasarlanmıştır(Adhikari ve Kim 2015). Tasarlanan filtre yapısı ve tasarlanan filtrenin frekans cevabı Şekil 1.11'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi her bir durdurma bandı bir tane kutba sahiptir.



Şekil 1.9: Geleneksel açık halka rezonatör ve kıvrımlı açık halka rezonatör kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre a) yapısı ve b) frekans cevabı



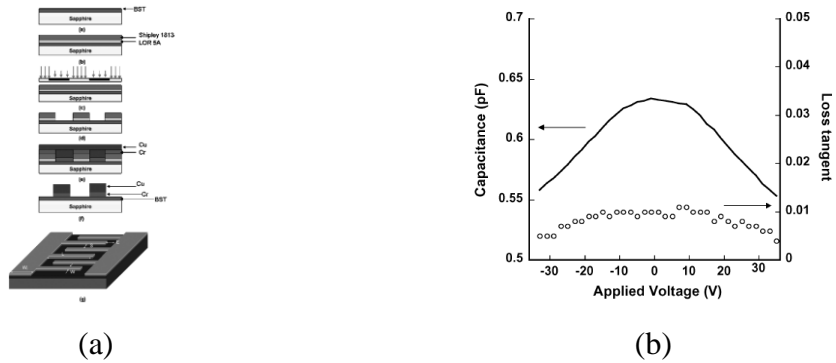
Şekil 1.10: İmal edilen filtrenin a) fotoğrafı ve b) ölçüm ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırması



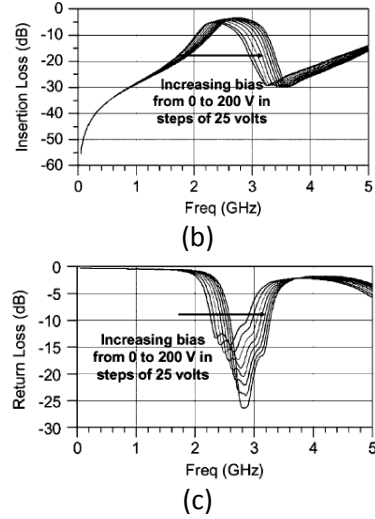
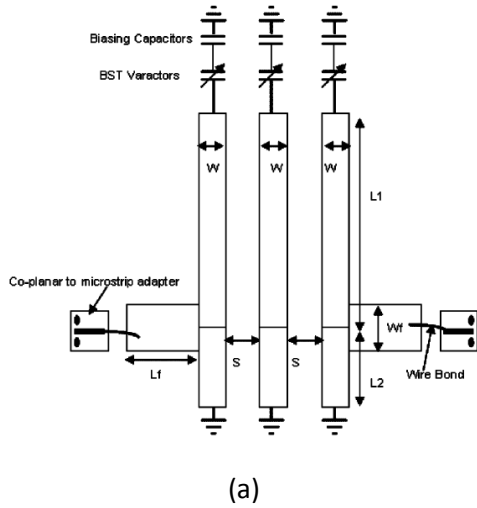
Şekil 1.11: (a) Yan hat yüklü rezonatör kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant tutan filtre ve (b) S parametreleri

Mikrodalga filtrelerde bant merkez frekansının aktif bir elemanla değiştirilebilmesi filtrenin kullanım alanını genişletmektedir (Jia ve diğ. 2013, Nath ve diğ. 2005), (Chaudhary ve diğ. 2013), (Tang ve Hong 2010), (Zhang ve diğ. 2014). Bu tür filtrelerde bant merkez frekansını değiştirmek için varaktör diyot sıklıkla kullanılmaktadır. Varaktör diyot, üzerine uygulanan elektriksel gerilimin değiştirilmesiyle kapasitansı değişebilen aktif bir devre elemanıdır. Jia ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmada, tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtrenin birinci bandının merkez frekansı varaktör diyot sayesinde değiştirilebilmektedir (Jia ve diğ. 2013). Chaudhary ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmada iki bantlı bant geçiren filtre tasarlanmıştır (Chaudhary ve diğ. 2013). Bu filtrenin her bir bandının merkez frekansı varaktör diyotlarla değiştirilebilmektedir. Ayrıca her bir bandın bant genişliği de değiştirilebilmektedir. Nath ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmada, ferroelektrik malzeme olan barium strontium titanate (BST) kullanılarak RF püskürtme yöntemiyle ince film inter dijital varaktör üretilip filtre uygulaması gerçekleştirilmiştir (Nath ve diğ. 2005). Şekil 1.12'de ince film varaktörün fabrikasyon aşamaları ve üretilen inter dijital varaktörün kapasitans ve kayıp tanjantının uygulanan gerilime göre değişimi gösterilmektedir. Şekil 1.13'de tasarlanan filtre ve tasarlanan filtrenin saçılma parametreleri gösterilmektedir.

Yeniden yapılandırılabilir (reconfigurable) filtreler, filtredeki bir veya birden fazla parametrenin durum değiştirmesi sayesinde farklı karakteristikte frekans cevapları verebilen yapılardır (Mohamed ve diğ. 2013), (Chen 2013), (Zhang ve Chen 2006), (Mutairi ve diğ. 2008), (Karim ve diğ. 2006), (Chen ve diğ. 2009), (Chun ve Hong 2008), (Karim ve diğ. 2009), (Karim ve diğ. 2008), (Zhao ve diğ. 2012), (Garcia ve Guyette 2015), (Cho ve Rebeiz 2014), (Tu 2010), (Chen ve diğ. 2009),

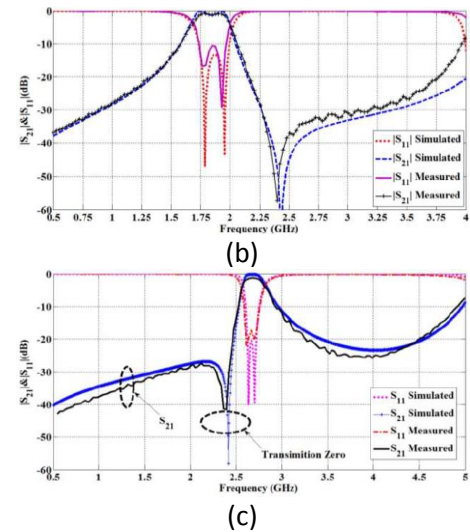
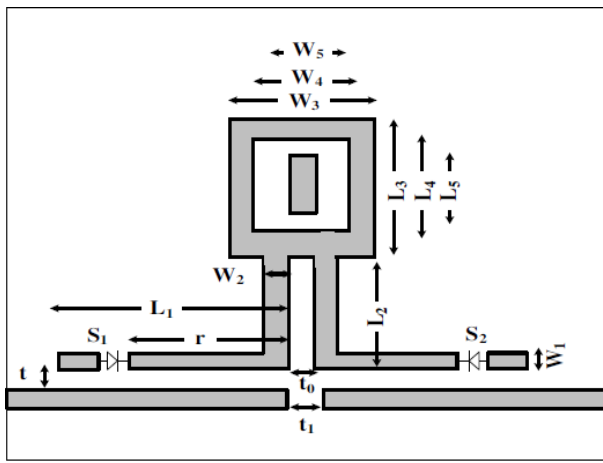


Şekil 1.12: a) İnterdijital varaktörün fabrikasyon aşamaları ve b) üretilen inter dijital varaktörün kapasitansının ve kayıp tanjantının uygulanan gerilime göre değişimi



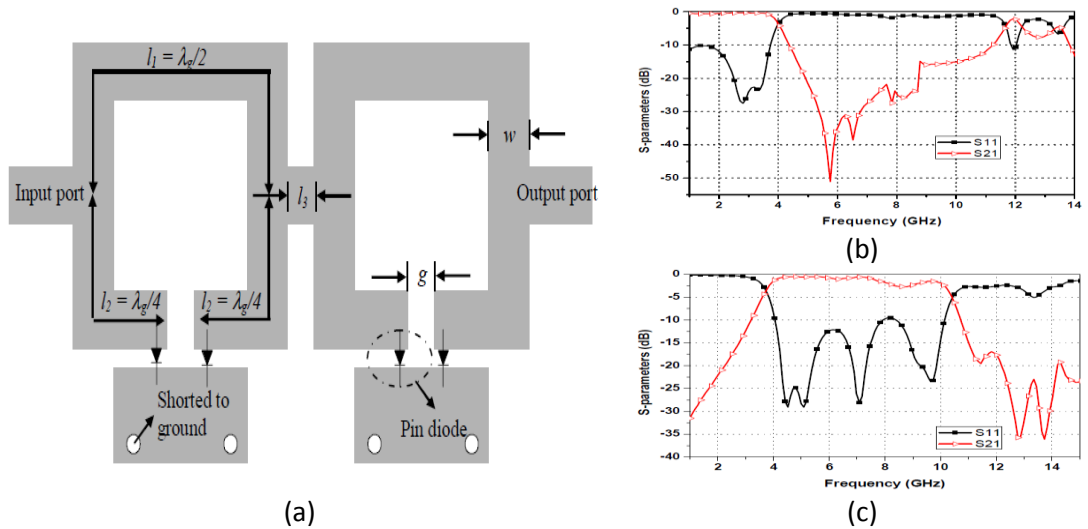
Şekil 1.13: Tasarlanan filtrenin a) yapısı, b)eklemler arası kaybı ve c) dönme kaybı

(Hong 2009). Bu sayede tek bir yapı birden fazla amaç için kullanılabilir. Durum değiştirme işlemi için genellikle pin diyot, varaktör diyot, MEMS vb. aktif devre elemanları sıklıkla kullanılmaktadır. Mohamed ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmada, tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrede pin diyotlarla anahtarlama yapılarak bant merkez frekansı ve banda göre iletim sıfırının pozisyonu değiştirilmektedir (Mohamed ve diğ. 2013). Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtre yapısı ve anahtar pozisyonuna göre filtrenin frekans cevapları Şekil 1.14'de gösterilmektedir. Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtre, anahtar ON durumunda iken 1.83GHz merkez frekansına ve sağ taraflı bir iletim sıfırına sahip bant geçiren filtre cevabı verirken anahtar OFF durumuna alındığında 2.60GHz merkez frekansına ve sol taraflı bir iletim sıfırına sahip bant geçiren filtre cevabı

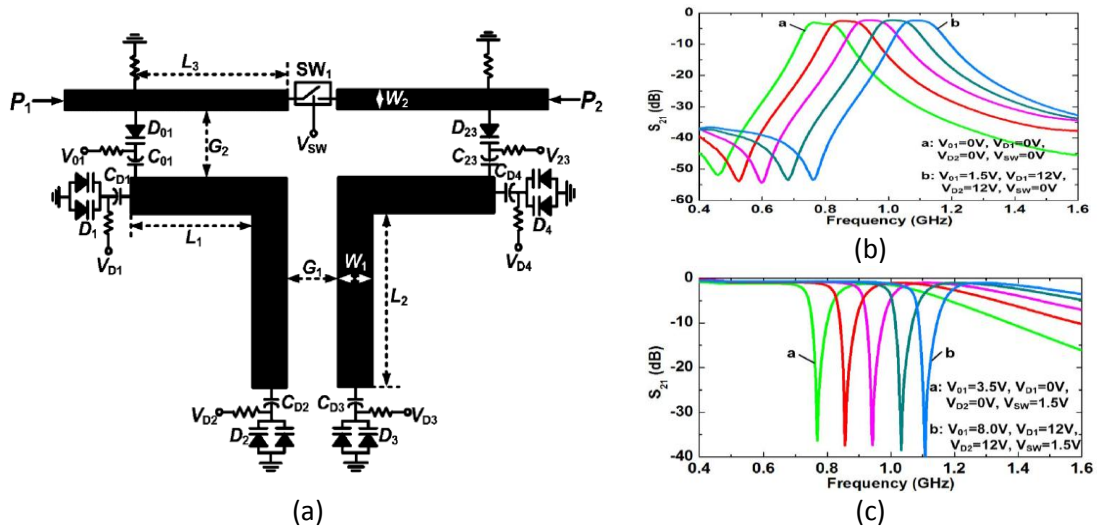


Şekil 1.14: Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrenin (a) yapısı, (b) anahtar ON durumundayken frekans cevabı ve (c) anahtar OFF durumundayken frekans cevabı

vermektedir. Karim ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmada, tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrede pin diyotlarla anahtarlama yapılarak bant geçiren/bant tutan frekans cevabı dönüşümü yapılmıştır (Karim ve diğ. 2008). Tasarlanan yapı ultra geniş bant uygulamaları için kullanılabilir. Tasarlanan bant tutan/bant geçiren dönüşümlü filtre yapısı ve anahtar durumuna göre frekans cevapları Şekil 1.15'de gösterilmektedir. Cho ve Rebeiz tarafından yapılan bir çalışmada RF MEMS kullanılarak bant geçiren/bant tutan frekans cevabı dönüşümü yapılmıştır (Cho ve Rebeiz 2014). Ayrıca bu yapıda bantın merkez frekansı aktif elemanlarla kontrol edilmektedir ve rezonatörler arası kuplaj katsayısının ayarlanmasıyla bant genişliği kontrolü de sağlanmaktadır. Tasarlanan bant geçiren/bant tutan dönüşümlü filtre yapısı ve anahtar durumuna göre frekans cevapları Şekil 1.16'da gösterilmektedir.

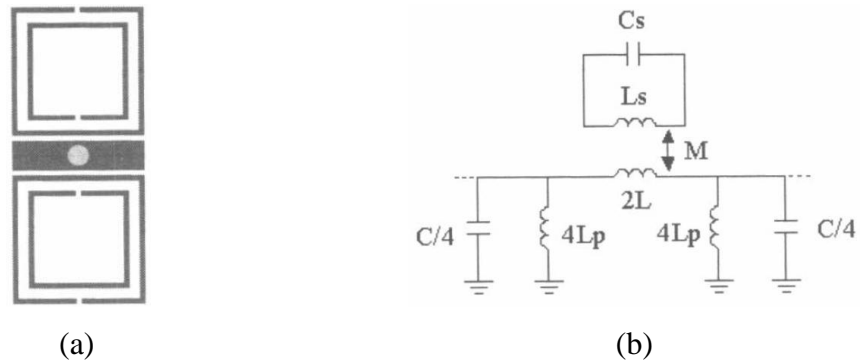


Şekil 1.15: a) Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtre yapısı b) pin diyot OFF ve c) pin diyot on durumundayken frekans cevabı



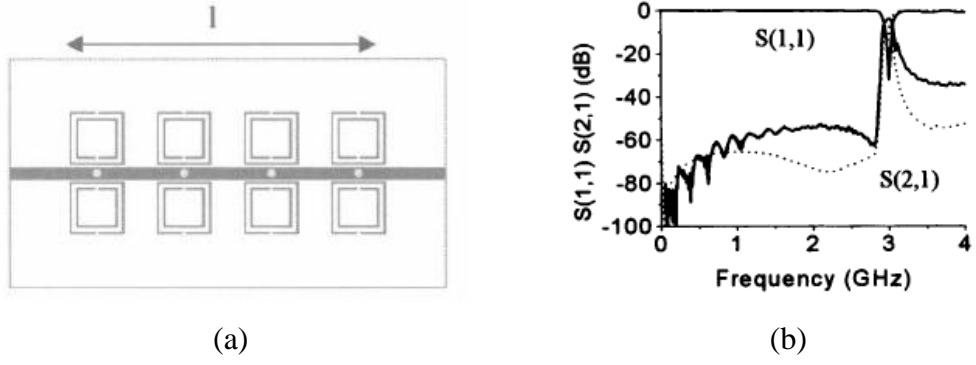
Şekil 1.16: a) Tasarlanan bant geçiren/bant tutan dönüşümlü filtre yapısı, b)  $V_{aw}=0V$  ve c)  $V_{aw}=1.5V$  durumlarında frekans cevabı

Bir malzemenin kırıcılık indisi o malzemenin elektrik ve manyetik geçirgenliklerine bağlıdır. 1968 yılında, bir malzemenin elektrik ve manyetik geçirgenliği eşzamanlı olarak negatif olduğunda kırıcılık indisinin negatif olacağı bu sebeple de bu malzemelerin ışığı ters yönde kıracağı Veselago tarafından teorik olarak gösterilmiştir (Veselago 1968). Kırıcılık indisi negatif olan malzemelere metamalzeme denmektedir. 2000 yılında Smith ve arkadaşları ince tel yapılar ve ayrık halka rezonatörler kullanarak deneysel olarak metamalzeme davranışlı ortam gerçekleştirmişlerdir (Smith ve diğ. 2000). Bu yapıda ince tel yapılar negatif elektrik geçirgenliği sağlarken ayrık halka rezonatörler negatif manyetik geçirgenlik sağlamaktadır. Literatürde, son zamanlarda metamalzeme davranışlı mikrodalga filtre tasarım çalışmaları oldukça dikkat çekmektedir (Studniberg ve Eleftheriades 2007), (Gil ve diğ. 2005), (Liu ve diğ. 2014), (Gorur ve diğ. 2014). Gil ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada metamalzeme davranışlı bant geçiren filtre tasarımı yapılmıştır (Gil ve diğ. 2005). Tasarlanan yapıda ayrık halka rezonatörler manyetik geçirgenliğin negatif olmasını sağlarken, ana besleme hattı ile toprak katmanını birleştiren ince metalik tel dielektrik geçirgenliğin negatif olmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla tasarlanan yapı metamalzeme davranışı göstermektedir. Metamalzeme davranışlı filtrenin birim hücre yapısı ve birim hücre yapısının eşdeğer devresi Şekil 1.17'de gösterilmektedir. Tasarlanan filtre ve tasarlanan filtrenin frekans cevabı Şekil 1.18'de gösterilmektedir. Studniberg ve Eleftheriades tarafından metamalzeme davranışlı dört bantlı bant geçiren filtre tasarımı yapılmıştır (Studniberg ve Eleftheriades 2007). Tasarlanan metamalzeme davranışlı filtrenin birim hücresi Şekil 1.19'da gösterilmektedir. Birim hücrede gösterilen kapasitif etki interdijital (parmaklık) yapıyla sağlanmaktadır. Endüktif etki ise kısa devre sonlandırılmalı iletim hattıyla sağlanmaktadır. Tasarlanan metamalzeme davranışlı

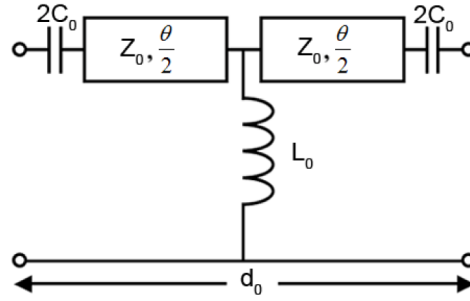


Şekil 1.17: a) Metamalzeme davranışlı filtrenin birim hücre yapısı ve b) toplu elemanlarla eşdeğer devresi

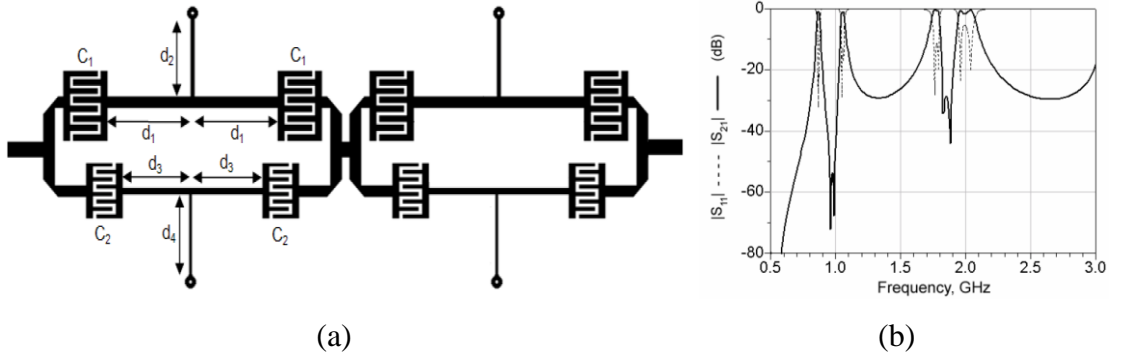
dört bantlı bant geçiren filtre yapısı ve bahsedilen bu yapının frekans cevabı Şekil 1.20'de gösterilmektedir.



Şekil 1.18: a) Metamalzeme davranışlı filtre yapısı ve b) frekans cevabı



Şekil 1.19: Metamalzeme davranışlı filtrenin birim hücre yapısı



Şekil 1.20: a) Metamalzeme davranışlı filtre yapısı ve b) frekans cevabı



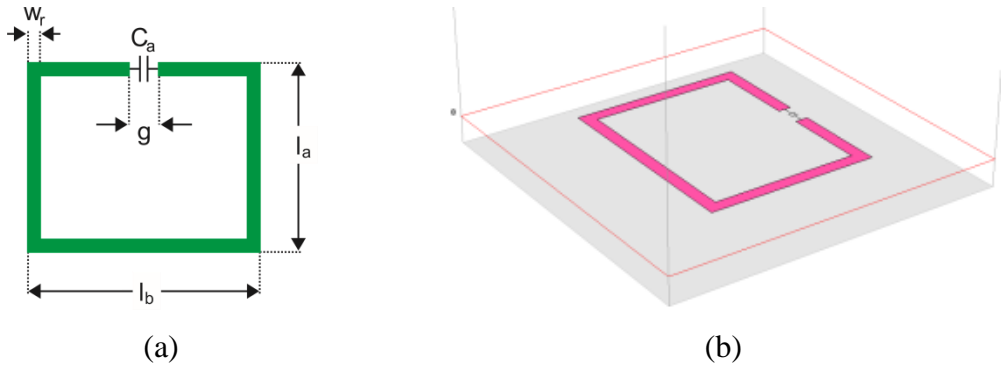
## 2. METAMALZEME KARAKTERİSTİĞİ GÖSTEREN REZONATÖRLER

Bu bölümde filtre tasarımlarında kullanılacak olan rezonatörler tanıtilip tanıtilen rezonatörlerin karakteristik özellikleri çıkarılmaktadır. Bu çalışmada rezonatörlerin karakteristik özelliklerini çıkartmak için rezonatörler iki farklı şekilde beslenmektedir. Bu beslemelerin birinde giriş ve çıkış portları birbirine bir iletim hattıyla bağlanmaktadır. Bu iletim hattının altına veya üstüne rezonatör yerleştirilerek rezonatör beslenmektedir(düz iletim hattıyla besleme durumu). Diğer beslemede ise giriş ve çıkış portlarını birbirine bağlayan iletim hattı ortadan topraklanmaktadır. Ortadan topraklanmış bu iletim hattının altına veya üstüne rezonatör yerleştirilerek rezonatör beslenmektedir(topraklanmış iletim hattıyla besleme durumu). Görüleceği üzere ilk bahsedilen besleme tipi bant tutan filtre yapısının temelini oluştururken diğer besleme tipi ise bant geçiren filtre yapısının temelini oluşturmaktadır. Rezonatörlerin karakteristiği çıkarılırkentaban malzeme olarak bağıl dielektrik sabiti 10.2, kalınlığı 1.27mm ve kayıp tanjantı 0.0023 olan RT/Duroid kullanılmaktadır. Giriş çıkış portları  $50\Omega$ ' dur.

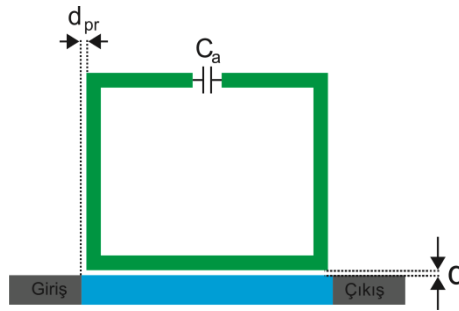
### 2.1 Tek ve Çift Modlu Rezonatörler

Geleneksel açık halka rezonatörün açık uçları arasına kondansatör yerleştirilerek oluşturulan tek modlu rezonatörün(TMR) iki ve üç boyutlu görünümü Şekil2.1'de gösterilmektedir. Bu rezonatörün karakteristik özelliklerini çıkarmak için rezonatör ilk olarakŞekil 2.2'de gösterildiği gibi giriş çıkış portlarını birbirine bağlayan düz bir iletim hattından beslenmektedir. Düz bir iletim hattının ve düz bir iletim hattından beslenen tek modlu rezonatörden oluşan yapının iletim( $S_{21}$ ) ve yansıma( $S_{11}$ ) katsayıları tam dalga elektromanyetik simülatör(SONNET) kullanılarak Şekil 2.3'de elde edilmektedir. Bu simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri:  $l_a=4.2\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ,  $C_a=0.0\text{pF}$ 'dir. Grafikten görüldüğü gibi düz bir iletim hattının iletim katsayısı yansıma katsayısından yüksek olduğu için düz bir iletim hattının giriş portuna gelen

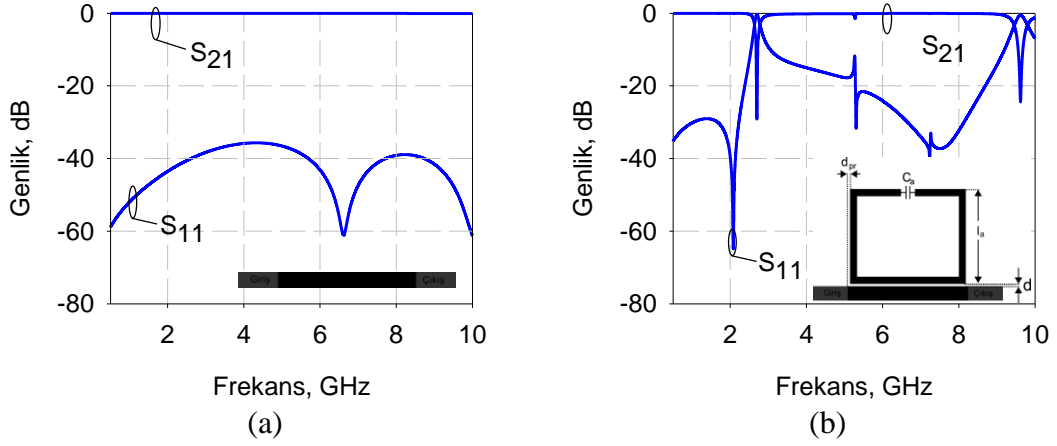
sinyal çıkış portuna aktarılabilir. Düz bir iletim hattının üstüne veya altına rezonatör yerleştirildiğinde, rezonatörün rezonans frekansı civarındaki frekanslarda (yarı güç noktaları arasındaki frekanslarda) yükler rezonatör üzerinde yoğunlaşır ve böylece yansıma katsayısı iletim katsayısından büyük olmaktadır. Yani giriş portuna gelen sinyalin frekansı rezonatörün rezonans frekansı civarında ise bu sinyal çıkış portuna aktarılamamaktadır. Dolayısıyla, rezonatörün düz bir iletim hattından beslendiği durum bant tutan filtre tasarımına yol göstermektedir. Düz bir iletim hattından beslenen rezonatörün oluşturduğu yapının  $S_{21}$  ve  $S_{11}$  katsayılarının  $C_a$  ve  $l_a$  rezonatör parametrelerine göre değişim grafikleri tam dalga elektromanyetik simülasyon kullanılarak sırasıyla Şekil 2.4'de elde edilmektedir. Bu simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri:  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ 'dir. Bu grafiklerden görülmektedir ki  $C_a$  kondansatörü rezonatörün temel rezonans frekansını bireysel olarak kontrol ederken  $l_a$  uzunluğu rezonatörün temel rezonans frekansıyla birlikte temel rezonans frekansının harmonik frekansını da hareket ettirmektedir. Dolayısıyla önerilen bu rezonatörün geleneksel açık uçlu rezonatörlere göre en büyük avantajı bu rezonatörde  $C_a$  kondansatörü bulunmasından dolayı temel rezonans frekansının bireysel olarak kontrol edilebilmesidir.



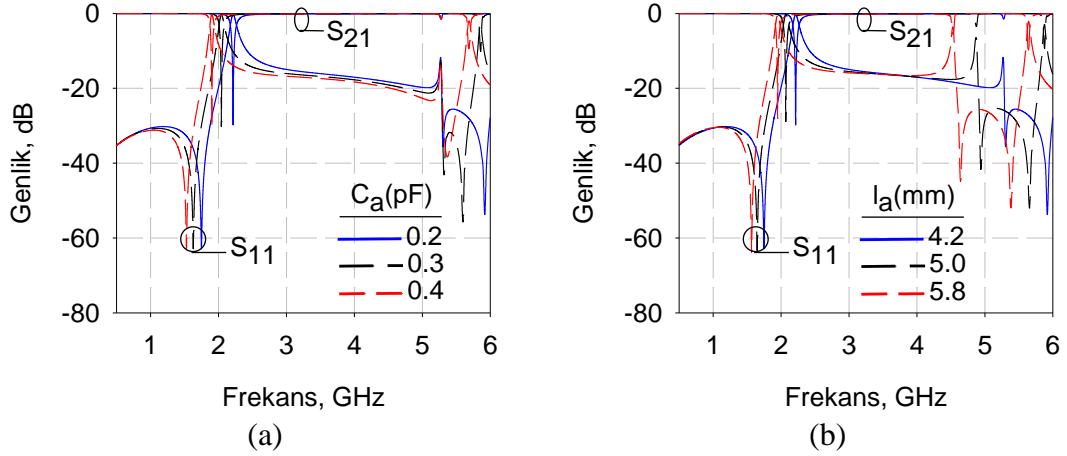
Şekil 2.1: Tek modlu rezonatörün a) iki boyutlu ve b) üç boyutlu görünümü



Şekil 2.2: Tek modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslenmesi



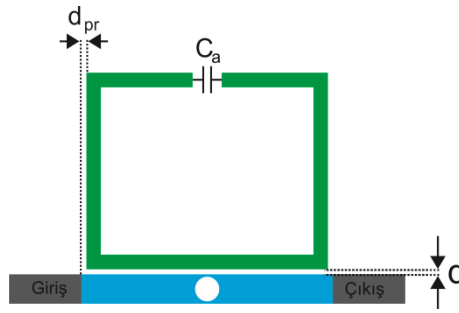
Şekil 2.3: (a) Düz bir iletim hattının ve (b) düz bir iletim hattından beslenen tek modlu rezonatörün oluşturduğu yapının iletim ve yansımaya katsayıları



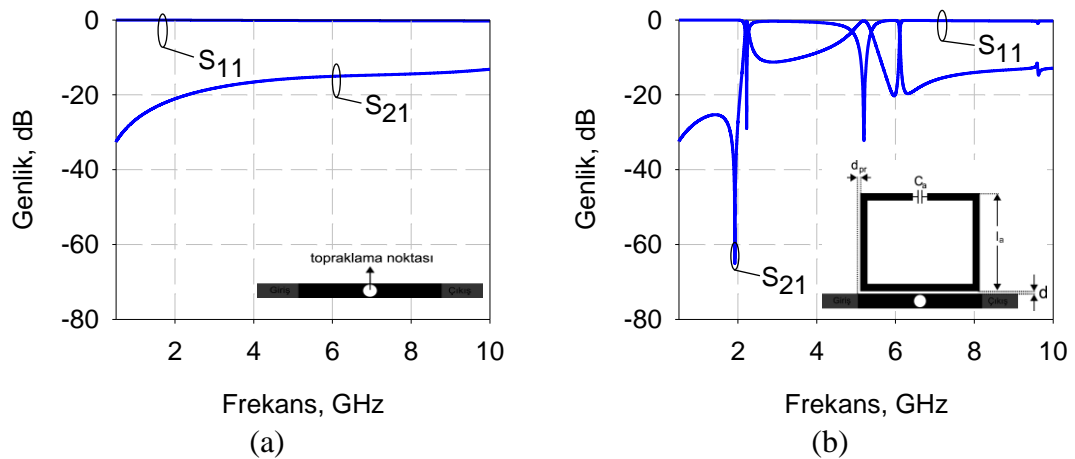
Şekil 2.4: Tek modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansımaya katsayılarının genliğinin (a)  $C_a$  parametresine göre ( $l_a=4.2$ mm) ve (b)  $l_a$  parametresine göre ( $C_a=0.2$ pF) değişim grafikleri

Tek modlu rezonatör yukarıda bahsedilen besleme türünden farklı olarak Şekil 2.5'de gösterildiği gibi ortadan topraklanmış bir iletim hattından beslenmektedir. Topraklanmış bir iletim hattının ve topraklanmış bir iletim hattından beslenen tek modlu rezonatörden oluşan yapının iletim( $S_{21}$ ) ve yansımaya ( $S_{11}$ ) katsayıları tam dalga elektromanyetik simülatör kullanılarak Şekil 2.6'da elde edilmektedir. Bu simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri:  $l_a=4.2$ mm,  $l_b=10.0$ mm,  $w_r=0.8$ mm,  $g=1.2$ mm,  $d=0.2$ mm,  $d_{pr}=0.2$ mm,  $C_a=0.0$ pF' dir. Grafikten görüldüğü gibi topraklanmış bir iletim hattının yansımaya katsayısı iletim katsayısından yüksek olduğu için topraklanmış bir iletim hattının giriş portuna gelen sinyal çıkış portuna aktarılamamaktadır. Topraklanmış bir iletim hattının üstüne veya altına rezonatör yerleştirildiğinde, rezonatörün rezonans frekansı civarındaki frekanslarda

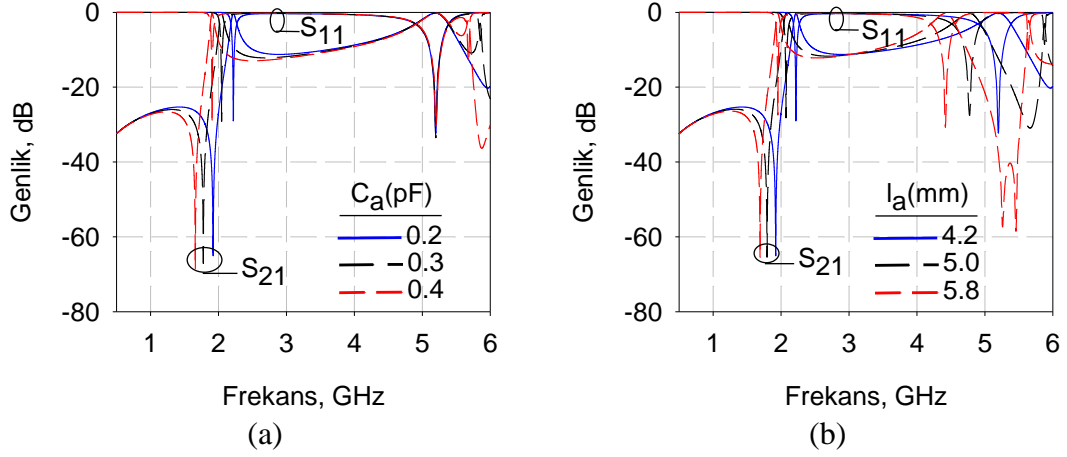
iletim katsayısı yansıma katsayısından büyük olmaktadır. Yani giriş portuna gelen sinyalin frekansı rezonatörün rezonans frekansı civarında ise bu sinyal çıkışa aktarılabilmektedir. Dolayısıyla, rezonatörün topraklanmış bir iletim hattından beslendiği durum bant geçiren filtre tasarımına yol göstermektedir. Topraklanmış bir iletim hattından beslenen tek modlu rezonatörün oluşturduğu yapının  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  katsayılarının  $C_a$  ve  $l_a$  rezonatör parametrelerine göre değişim grafikleri tam dalga elektromanyetik simülasyon kullanılarak sırasıyla Şekil 2.7'de elde edilmektedir. Bu simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri:  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_t=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ 'dir. Rezonatörün düz bir iletim hattından beslendiği durum ile topraklanmış bir iletim hattından beslendiği durumdaki rezonans frekansları aynıdır. Tek farklılık düz bir iletim hattından beslenme durumunda rezonans frekansları civarında yansıma değeri iletim değerinden yüksek iken topraklanmış iletim hattından beslenme durumunda tam tersi durum oluşmaktadır.



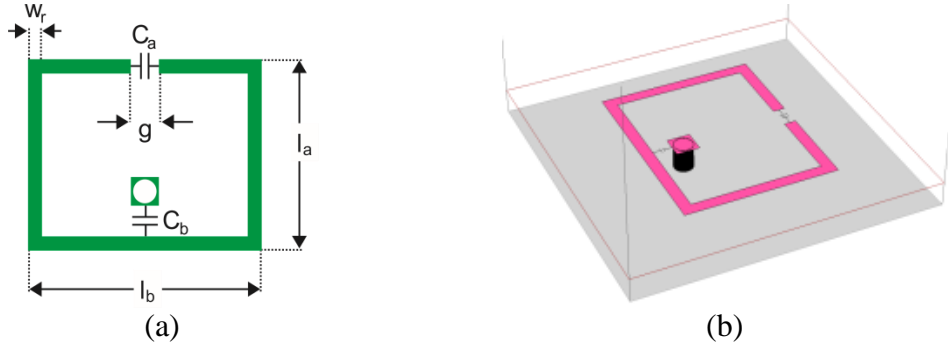
Şekil 2.5: Tek modlu rezonatörün topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi



Şekil 2.6: (a)Topraklanmış bir iletim hattının ve (b) topraklanmış bir iletim hattından beslenen tek modlu rezonatörün oluşturduğu yapının iletim ve yansıma katsayılarının genlikleri

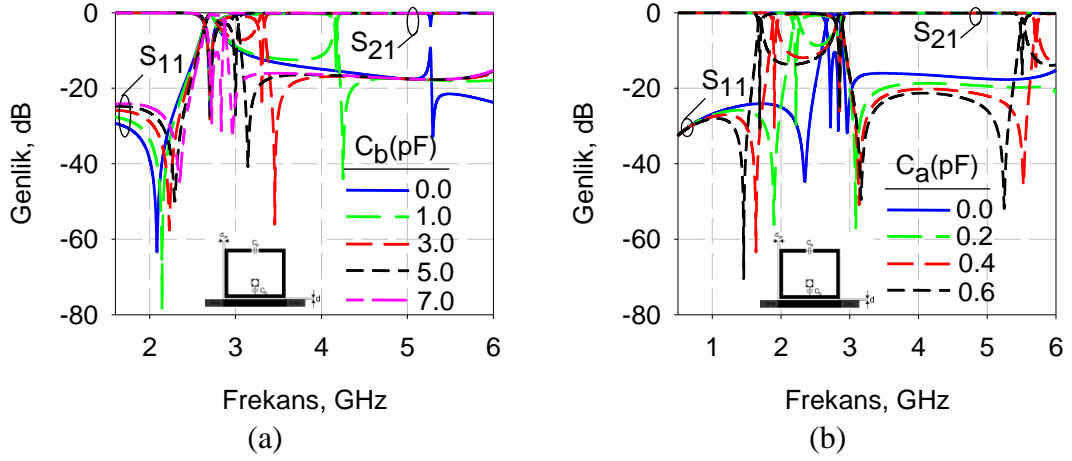


Şekil 2.7: Tek modlu rezonatörün topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin (a)  $C_a$  parametresine göre ( $l_a=4.2\text{mm}$ ) ve (b)  $l_a$  parametresine göre ( $C_a=0.2\text{pF}$ ) değişim grafikleri

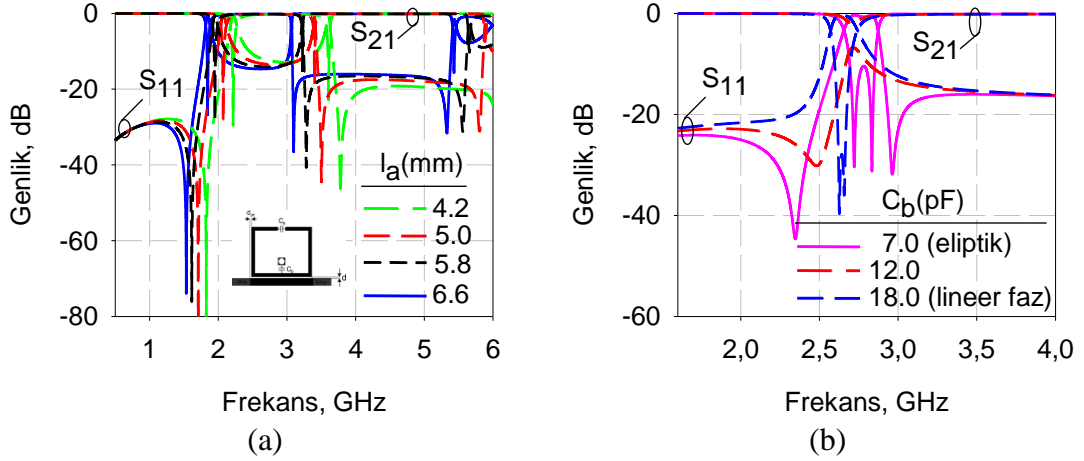


Şekil 2.8: Çift modlu rezonatörün (a) iki boyutlu ve (b) üç boyutlu görünümü

Önerilen çift modlu rezonatör, yukarıda bahsedilen tek modlu rezonatörün dikey simetri eksenini üzerindeki noktası ile toprak arasına kondansatör yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Önerilen çift modlu rezonatör Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Önerilen çift modlu rezonatörün karakteristik özelliklerini çıkarmak için çift modlu rezonatör ilk olarak düz bir iletim hattından beslenmektedir. Rezonatörün düz bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansıma katsayılarının  $C_b$ ,  $C_a$  ve  $l_a$  rezonatör parametrelerine göre değişim grafikleri tam dalga elektromanyetik simülasyon kullanılarak Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da elde edilmektedir. Bu simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ' dir. Bu grafiklerden görülmektedir ki,  $C_b$  kondansatörü temel rezonans frekansının harmonik frekansını bireysel bir şekilde kontrol ederek rezonatöre çift modlu olma özelliği kazandırmaktadır. Rezonatöre kazandırılan çift modluluk özelliği rezonatörü çok bantlı filtre tasarımlarında kullanılabilir kılmaktadır. Ayrıca Şekil 2.10'dan görüldüğü gibi  $C_b$  kapasitansı artırılmaya devam edilirse eliptik filtreleme karakteristiğinden lineer faz



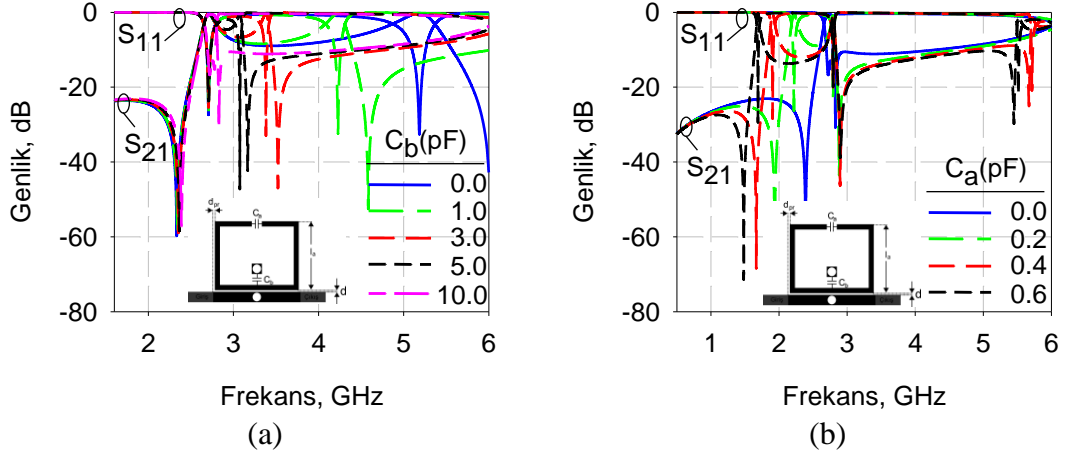
Şekil 2.9: Çift modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansımaya katsayılarının genlik değerlerinin (a)  $C_b$  parametresine göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $l_a=4.2\text{mm}$ ) ve (b)  $C_a$  parametresine göre ( $C_b=7.0\text{pF}$ ,  $l_a=4.2\text{mm}$ ) değişim grafikleri



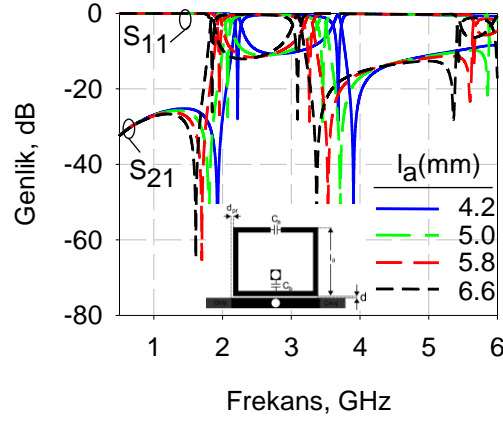
Şekil 2.10: Çift modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslenmesi durumunda (a) iletim ve yansımaya katsayılarının  $l_a$  parametresine göre değişimi ( $C_a=0.2\text{pF}$ ,  $C_b=2.0\text{pF}$ ) ve (b) eliptikten lineer faza geçiş ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $l_a=4.2\text{mm}$ )

karakteristiğine dönüşüm yapılabilmektedir.

TMR'de de olduğu gibi, önerilen çift modlu rezonatör yukarıda bahsedilen besleme türünden farklı olarak ortadan topraklanmış bir iletim hattından beslenmektedir. Ortadan topraklanmış besleme durumunda iletim ve yansımaya katsayılarının  $C_b$ ,  $C_a$  ve  $l_a$  parametrelerine göre değişim grafikleri tam dalga elektromanyetik simülatör kullanılarak Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de elde edilmektedir. Bu simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_f=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ' dir. TMR' deki benzer şekilde, oluşturulan yapının rezonans frekansları düz bir iletim hattıyla besleme durumundaki rezonans



Şekil 2.11: Çift modlu rezonatörün topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin (a)  $C_b$  parametresine göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $l_a=4.2\text{mm}$ ) ve (b)  $C_a$  parametresine göre ( $C_b=10.0\text{pF}$ ,  $l_a=4.2\text{mm}$ ) değişim grafikleri

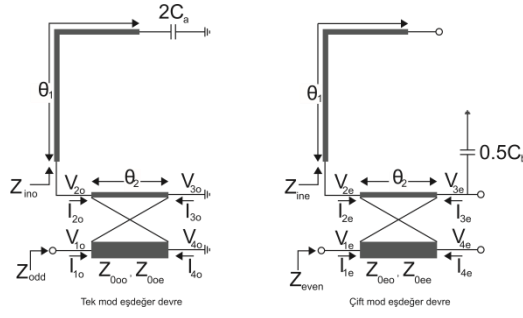


Şekil 2.12: Çift modlu rezonatörün topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumunda iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin  $l_a$  parametresine göre değişimi ( $C_a=0.2\text{pF}$ ,  $C_b=2.0\text{pF}$ )

frekanslarının aynıdır. Tek farklılık düz iletim hattıyla besleme durumunda rezonans frekansı civarında yansıma değeri iletim değerinden yüksek iken topraklanmış iletim hattıyla besleme durumunda tam tersi durum oluşmaktadır.

### 2.1.1 İletim ve Yansıma Katsayılarının İfadelerinin Türetilmesi

Yukarıda çift modlu rezonatörlere düz bir iletim hattıyla ve topraklı bir iletim hattıyla besleme yapılarak iletim ve yansıma katsayıları Tam Dalga Elektromagnetik Simülatör tarafından elde edildi. Böylece ÇMR'nin rezonans ve saçılma özellikleri gösterildi. Bu kısımda ise ÇMR'nin iki farklı tipte besleme durumu için iletim ve



Şekil 2.13: ÇMR' nin düz bir iletim hattından beslendiği durumdaki tek ve çift mod eşdeğer devreleri yansıma katsayılarının ifadeleri türetilmektedir. Bu amaç için, bilindiği üzere iletim ve yansıma katsayıları türetilen devrelere tek-çift (odd-even) mod analizi uygulanabilmektedir (Hong ve Lancaster 2001).

Çift modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslendiği durumdaki tek ve çift mod eşdeğer devreleri Şekil 2.13'de gösterilmektedir. Bu eşdeğer devrelerden de anlaşıldığı gibi önerilen rezonatör çift modludur ve rezonatörün odd modunu  $C_a$  kondansatörü bireysel olarak kontrol ederken even modunu  $C_b$  kondansatörü bireysel olarak kontrol etmektedir. Bu rezonatördeki kondansatörlerin rezonatörün dikey eksenine dik ve paralel olacak şekilde yerleştirilmesindeki temel mantık da buradan kaynaklanmaktadır. Eşdeğer devrede,  $Z_r$  ifadesi rezonatörü oluşturan iletim hattının karakteristik empedansını,  $Z_{0oo}$ ,  $Z_{0oe}$ ,  $Z_{0eo}$  ve  $Z_{0ee}$  ifadeleri rezonatör ile besleme hattı arasındaki kuplajın karakteristik empedansını ve  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  ifadeleri ilgili fiziksel uzunluğa karşı düşen elektriksel uzunluğu temsil etmektedir. Karakteristik empedans ve elektriksel uzunluğa dair bağıntılar Hong ve Lancaster tarafından yazılmış olan kitaptan bakılabilir (Hong ve Lancaster 2001).

Tek mod eşdeğer devresinde  $Z_{ino}$  empedansı iletim hattı teorisinden:

$$Z_{ino} = \frac{i(2\omega C_a Z_r \tan \theta_1 - 1)}{2\omega C_a Z_r + \tan \theta_1} \quad (2.1)$$

olarak yazılabilir. Tek mod eşdeğer devresinde, Pozar tarafından yazılmış kitapta (Pozar) gösterilen kuplajlı hatlar teorisi kullanılarak:

$$V_{1o} = Z_{11}I_{1o} + Z_{12}I_{2o} + Z_{13}I_{3o} + Z_{14}I_{4o} \quad (2.2a)$$

$$V_{2o} = Z_{21}I_{1o} + Z_{22}I_{2o} + Z_{23}I_{3o} + Z_{24}I_{4o} \quad (2.2b)$$

$$V_{3o} = Z_{31}I_{1o} + Z_{32}I_{2o} + Z_{33}I_{3o} + Z_{34}I_{4o} \quad (2.2c)$$



$$V_{4o} = Z_{41}I_{1o} + Z_{42}I_{2o} + Z_{43}I_{3o} + Z_{44}I_{4o} \quad (2.2d)$$

eşitlikleri yazılabilir. Ayrıca tek mod eşdeğer devresinde aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$V_{2o} = Z_{ino}(-I_{2o}) \quad (2.3a)$$

$$V_{3o} = V_{4o} = 0 \quad (2.3b)$$

(2.3) eşitlikleri (2.2)'de kullanılarak:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} + Z_{ino} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1o} \\ I_{2o} \\ I_{3o} \\ I_{4o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1o} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sistemi çözülerek odd mod admitansı:

$$Y_{odd} = \frac{-i \cot^2 \theta_2 [-Z_r + Z_{xx} \tan(\theta_2) \tan(\theta_1) + 2C_a Z_r (Z_r \tan \theta_1 + Z_{xx} \tan \theta_2) w]}{(Z_{xx}^2 - Z_{yy}^2) \tan \theta_1 - Z_{xx} Z_r \cot \theta_2 + 2C_a Z_r (Z_{xx}^2 - Z_{yy}^2 + Z_{xx} Z_r \tan(\theta_1) \cot(\theta_2)) w} \quad (2.5)$$

olarak elde edilir. Odd mod admitansının sıfıra eşitlenmesiyle odd mod frekansları bulunabilir. (2.5) eşitliğinin sıfıra eşitlenmesiyle odd mod frekansları:

$$\begin{aligned} f &= \frac{Z_r - Z_{xx} \tan(\theta_2) \tan(\theta_1)}{4\pi C_a Z_r (Z_r \tan \theta_1 + Z_{xx} \tan \theta_2)} \\ &= \frac{1}{4\pi C_a Z_r} \cot \left( \theta_1 + \arctan \left( \frac{Z_{xx}}{Z_r} \tan \theta_2 \right) \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

denkleminin çözümü olarak elde edilir. Yukarıdaki ifadelerde  $Z_{xx}$  ve  $Z_{yy}$  empedansları :

$$Z_{xx} = \frac{Z_{0oe} + Z_{0oo}}{2} \quad (2.7a)$$

$$Z_{yy} = \frac{Z_{0oe} - Z_{0oo}}{2} \quad (2.7b)$$

olarak verilir.

Even mod eşdeğer devresinde, klasik devre teorisi kullanılarak  $Z_{Cb}$  empedansı ve iletim hatları teorisi kullanılarak  $Z_{ine}$  empedansı:

$$Z_{cb} = \frac{2}{i\omega C_b} \quad (2.8a)$$

$$Z_{ine} = -iZ_r \cot \theta_2 \quad (2.8b)$$

olarak yazılır. Even mod eşdeğer devresinde kuplajlı hatlar teorisi kullanılarak:

$$V_{1e} = Z_{11}I_{1e} + Z_{12}I_{2e} + Z_{13}I_{3e} + Z_{14}I_{4e} \quad (2.9a)$$

$$V_{2e} = Z_{21}I_{1e} + Z_{22}I_{2e} + Z_{23}I_{3e} + Z_{24}I_{4e} \quad (2.9b)$$

$$V_{3e} = Z_{31}I_{1e} + Z_{32}I_{2e} + Z_{33}I_{3e} + Z_{34}I_{4e} \quad (2.9c)$$

$$V_{4e} = Z_{41}I_{1e} + Z_{42}I_{2e} + Z_{43}I_{3e} + Z_{44}I_{4e} \quad (2.9d)$$

eşitlikleri elde edilir. Ayrıca even mod eşdeğer devresinde aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$V_{2e} = Z_{ine}(-I_{2e}) \quad (2.10a)$$

$$V_{3e} = Z_{c1}(-I_{3e}) \quad (2.10b)$$

(2.10) eşitlikleri (2.9)'da kullanılarak :

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} + Z_{ine} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} + Z_{cb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1e} \\ I_{2e} \\ I_{3e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1e} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

denklem sistemi elde edilebilir. Bu denklem sistemi çözülerek even mod admitansı:

$$Y_{even} = \frac{i \tan \theta_2 [2Z_x + 2Z_r \tan \theta_2 \cot \theta_1 + (Z_r \cot \theta_1 - Z_x \tan \theta_2)C_b Z_x w]}{2(Z_x^2 - Z_y^2 + Z_r Z_x \tan \theta_2 \cot \theta_1) + [Z_x \tan \theta_2 (Z_y^2 - Z_x^2) + Z_r \cot \theta_1 (-Z_y^2 \sec^2 \theta_2 + Z_x^2)]C_b w} \quad (2.12)$$

olarak elde edilir. Even mod admitansının sıfıra eşitlenmesiyle even mod frekansları bulunabilir. (2.12) eşitliğinin sıfıra eşitlenmesiyle even mod frekansları:

$$\begin{aligned} f &= \frac{Z_x + Z_r \tan \theta_2 \cot \theta_1}{\pi C_b Z_x (Z_x \tan \theta_2 - Z_r \cot \theta_1)} \\ &= -\frac{1}{\pi C_b Z_x} \tan \left( \theta_2 + \arctan \left( \frac{Z_x}{Z_r} \tan \theta_1 \right) \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

denkleminin çözümü olarak elde edilir. Yukarıdaki ifadelerde  $Z_x$  ve  $Z_y$  empedansları:

$$Z_x = \frac{Z_{0ee} + Z_{0eo}}{2} \quad (2.14a)$$

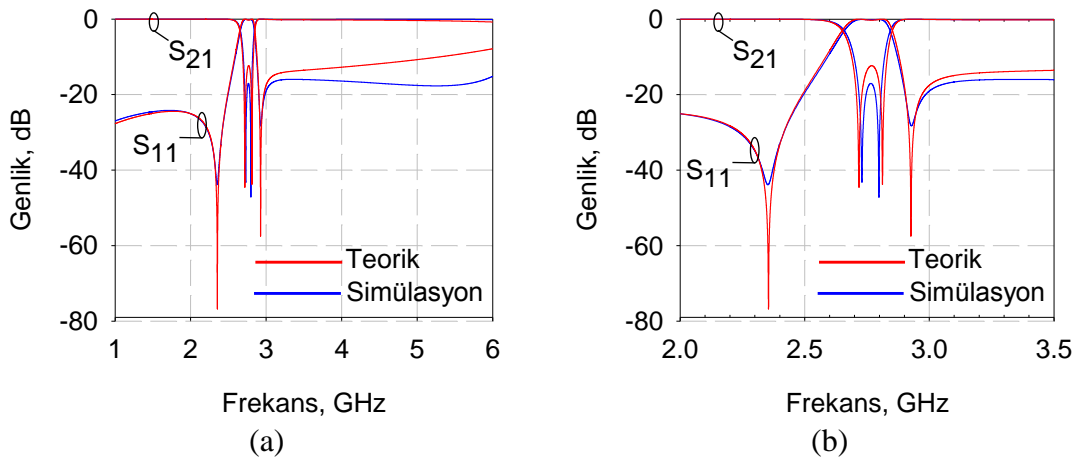
$$Z_y = \frac{Z_{0ee} - Z_{0eo}}{2} \quad (2.14b)$$

olarak verilir. İki portlu bir devrenin iletim ve yansımaya katsayıları tek ve çift mod giriş empedansları cinsinden Hong ve Lancaster tarafından yazılmış kitapta:

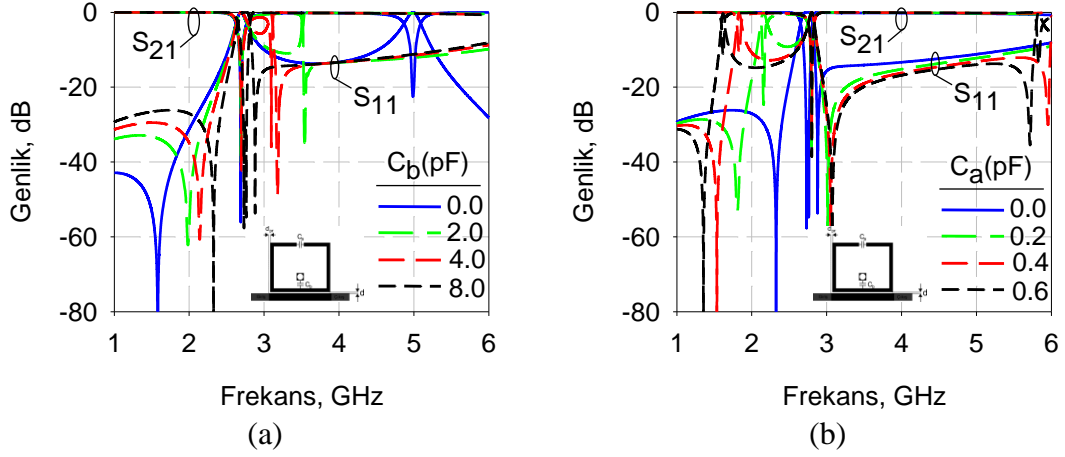
$$S_{11} = \frac{Y_0^2 - Y_{even}Y_{odd}}{(Y_0 + Y_{even})(Y_0 + Y_{odd})} \quad (2.15a)$$

$$S_{21} = \frac{(Y_{odd} - Y_{even})Y_{odd}}{(Y_0 + Y_{even})(Y_0 + Y_{odd})} \quad (2.15b)$$

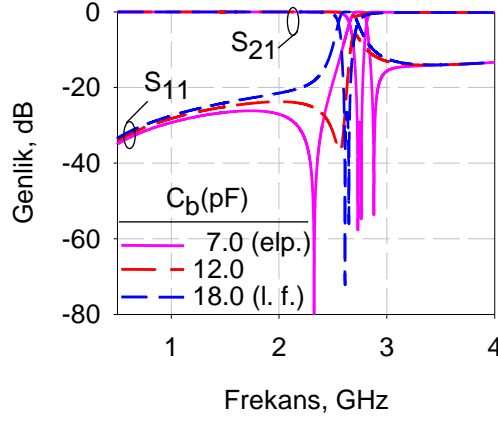
olarak verilir. (2.5), (2.12) ve (2.15) ifadeleri kullanılarak iletim ve yansımaya katsayılarının frekansa göre değişimi teorik olarak incelenebilmektedir. Şekil 2.14'de, iletim ve yansımaya katsayılarının teorik sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmaktadır. Gözlemlenmekte olan uyum önerilen eşdeğer modelin geçerli olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca Şekil 2.15'de, elde edilen teorik ifadeler kullanılarak iletim ve yansımaya katsayılarının  $C_b$  ve  $C_a$  kapasitanslarına göre değişimi gösterilmektedir. Bunlara ek olarak Şekil 2.16'da, teorik olarak elde edilen ifadeler kullanılarak eliptik filtreleme karakteristiğinden lineer faz karakteristiğine dönüşüm gösterilmektedir. Bu teorik analizlerde ve simülasyonda kullanılan parametreler  $l_a=4.2\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ,  $Z_x=61.5\Omega$ ,  $Z_y=35.28\Omega$ ,  $Z_{xx}=49.5\Omega$ ,  $Z_{yy}=22.28\Omega$  'dir.



Şekil 2.14: Çift modlu rezonatörün düz bir iletim hattından beslendiği durumda iletim ve yansımaya katsayılarının genlik değerlerinin teorik ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ( $C_a=7.5\text{pF}$ ,  $C_b=0.0\text{pF}$ ) (a) geniş bant ve (b) dar bant



Şekil 2.15: Elde edilen teorik ifadeler kullanılarak iletim ve yansıma katsayılarının genlik değerlerinin (a)  $C_b$  kapasitansına göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ ) ve (b)  $C_a$  kapasitansına göre ( $C_b=8.0\text{pF}$ ) değişim grafikleri



Şekil 2.16: Eliptik karakteristiğinden lineer faz karakteristiğine geçiş

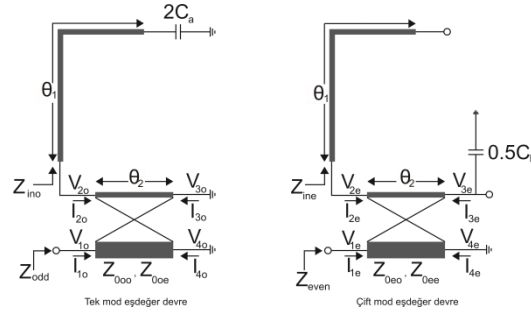
Çift modlu rezonatörün topraklanmış bir iletim hattından beslendiği durumdaki tek ve çift mod eşdeğer devreleri Şekil 2.17'de gösterilmektedir. Yukarıda anlatılan analize benzer şekilde kuplajlı hatlar teorisi kullanılarak tek mod admitansı:

$$Y_{\text{odd}} = \frac{-i \cot^2 \theta_2 [-Z_r + Z_{xx} \tan(\theta_2) \tan(\theta_1) + 2C_a Z_r (Z_r \tan \theta_1 + Z_{xx} \tan \theta_2) w]}{(Z_{xx}^2 - Z_{yy}^2) \tan \theta_1 - Z_{xx} Z_r \cot \theta_2 + 2C_a Z_r (Z_{xx}^2 - Z_{yy}^2 + Z_{xx} Z_r \tan(\theta_1) \cot(\theta_2)) w} \quad (2.16)$$

olarak elde edilir. Odd mod admitansının sıfıra eşitlenmesiyle odd mod frekansları bulunabilmektedir. (2.5) eşitliğinin sıfıra eşitlenmesiyle odd mod frekansları:

$$f = \frac{Z_r - Z_{xx} \tan(\theta_2) \tan(\theta_1)}{4\pi C_a Z_r (Z_r \tan \theta_1 + Z_{xx} \tan \theta_2)} = \frac{1}{4\pi C_a Z_r} \cot \left( \theta_1 + \arctan \left( \frac{Z_{xx}}{Z_r} \tan \theta_2 \right) \right) \quad (2.17)$$

denkleminin çözümü olarak elde edilir. Yukarıdaki ifadelerde  $Z_{xx}$  ve  $Z_{yy}$  empedansları (2.7) eşitliği ile tanımlanmaktadır.



Şekil 2.17: ÇMR' nin topraklanmış bir iletim hattından beslendiği durumdaki tek ve çift mod eşdeğer devreleri

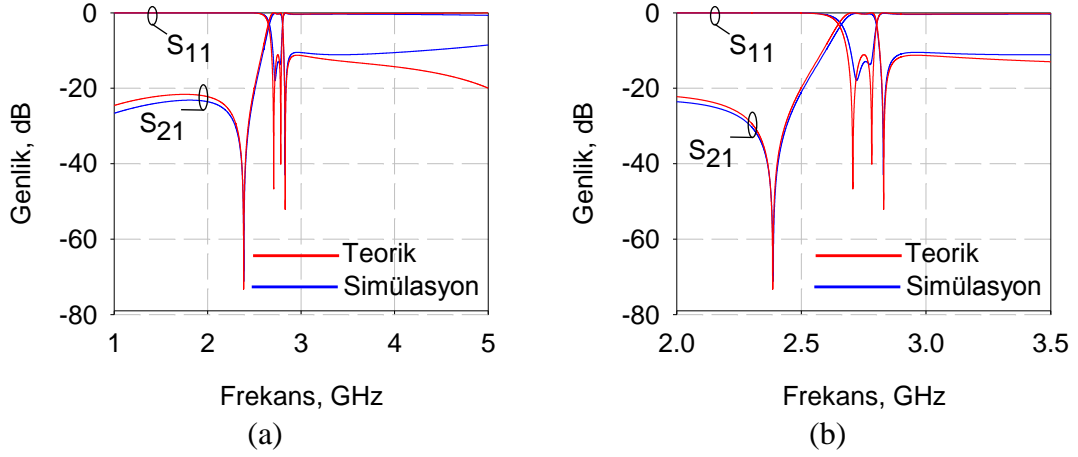
Çift mod eşdeğer devresinde kuplajlı hatlar teorisi kullanılarak çift mod admitansı

$$Y_{even} = \frac{i \tan \theta_1 \{2Z_r Z_x \cot \theta_1 \tan \theta_2 + 2Z_x^2 - 2Z_y^2 \sec^2 \theta_2 + C_b(Z_x^2 - Z_y^2)(Z_r \cot \theta_1 - Z_x \tan \theta_2)w\}}{\tan \theta_2 \{-2Z_x[Z_r Z_x \tan \theta_2 + (Z_x^2 - Z_y^2) \tan \theta_1] + C_b(Z_x^2 - Z_y^2)[(Z_x^2 - Z_y^2) \tan \theta_2 \tan \theta_1 - Z_r Z_x]w\}} \quad (2.18)$$

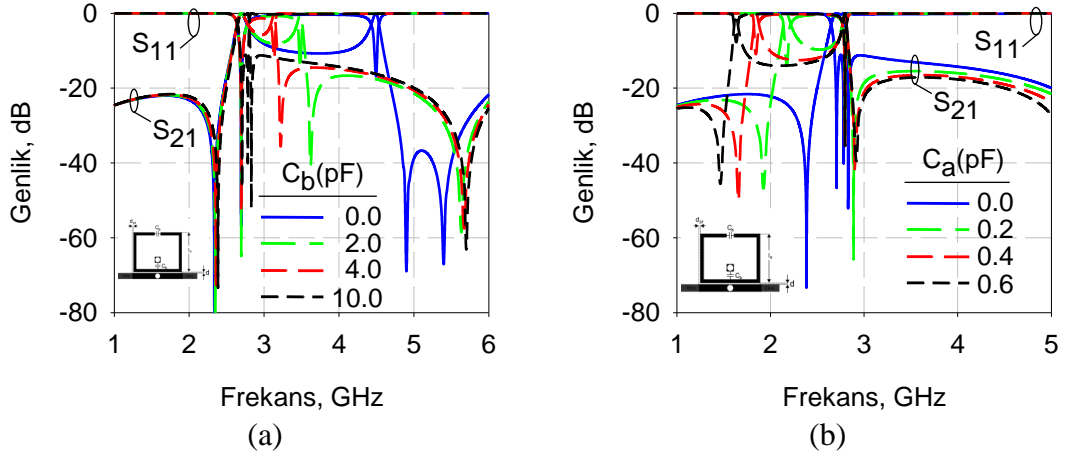
olarak elde edilir. Even mod admitansının sıfıra eşitlenmesiyle even mod frekansları

$$f = \frac{-Z_r Z_x \cot \theta_1 \tan \theta_2 - Z_x^2 + Z_y^2 \sec^2 \theta_2}{\pi C_b (Z_x^2 - Z_y^2) (Z_r \cot \theta_1 - Z_x \tan \theta_2)} \quad (2.19)$$

denkleminin çözümü olarak elde edilir. (2.15), (2.16) ve (2.18) ifadeleri kullanılarak rezonatörün topraklanmış bir iletim hattıyla beslendiği durumdaki iletim ve yansımaya katsayılarının frekansa göre değişimi teorik olarak incelenebilmektedir. Şekil 2.18' de, iletim ve yansımaya katsayılarının teorik sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmaktadır. Gözlemlenmekte olan uyum önerilen eşdeğer modelin geçerli olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca Şekil 2.19'da, elde edilen teorik ifadeler kullanılarak iletim ve yansımaya katsayılarının  $C_b$  ve  $C_a$  kapasitanslarına göre değişimi gösterilmektedir. Bu teorik analizlerde ve simülasyonda kullanılan parametreler  $l_a=4.2\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_t=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ,  $Z_x=48.0\Omega$ ,  $Z_y=10.0\Omega$ ,  $Z_{xx}=36.5\Omega$ ,  $Z_{yy}=16.0\Omega$  'dur.



Şekil 2.18: İletim ve yansımaya katsayılarının genlik değerlerinin teorik ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $C_b=10.0\text{pF}$ ) (a) geniş bant ve (b) dar bant



Şekil 2.19: Elde edilen teorik ifadeler kullanılarak iletim ve yansımaya katsayılarının genlik değerlerinin (a)  $C_b$  kapasitansına göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ ) ve (b)  $C_a$  kapasitansına göre ( $C_b=10.0\text{pF}$ ) değişim grafikleri

### 2.1.2 Çift Modlu Rezonatörün Metamalzeme Özelliği

Bir malzemenin kırıcılık indisi o malzemenin dielektrik ve manyetik geçirgenliğine bağlıdır. 1968 yılında, bir malzemenin elektrik ve manyetik geçirgenliği eşzamanlı olarak negatif olduğunda kırıcılık indisinin negatif olacağı bu sebeple de bu malzemelerin ışığı ters yönde kıracağı Veselago tarafından teorik olarak gösterilmiştir (Veselago 1968).

İki portlu bir yapının dielektrik ve manyetik geçirgenlik ifadeleri Karthikeyan ve Arulvani tarafından yapılan bir çalışmada (Karthikeyan ve Arulvani 2010) verildiği gibi eşitlik (2.20)'de verilmektedir.

$$\mu_{etkin} = \frac{\gamma Z_B}{k_0 Z_0} \quad (2.20a)$$

$$\varepsilon_{etkin} = \frac{\gamma Z_0}{k_0 Z_B} \quad (2.20b)$$

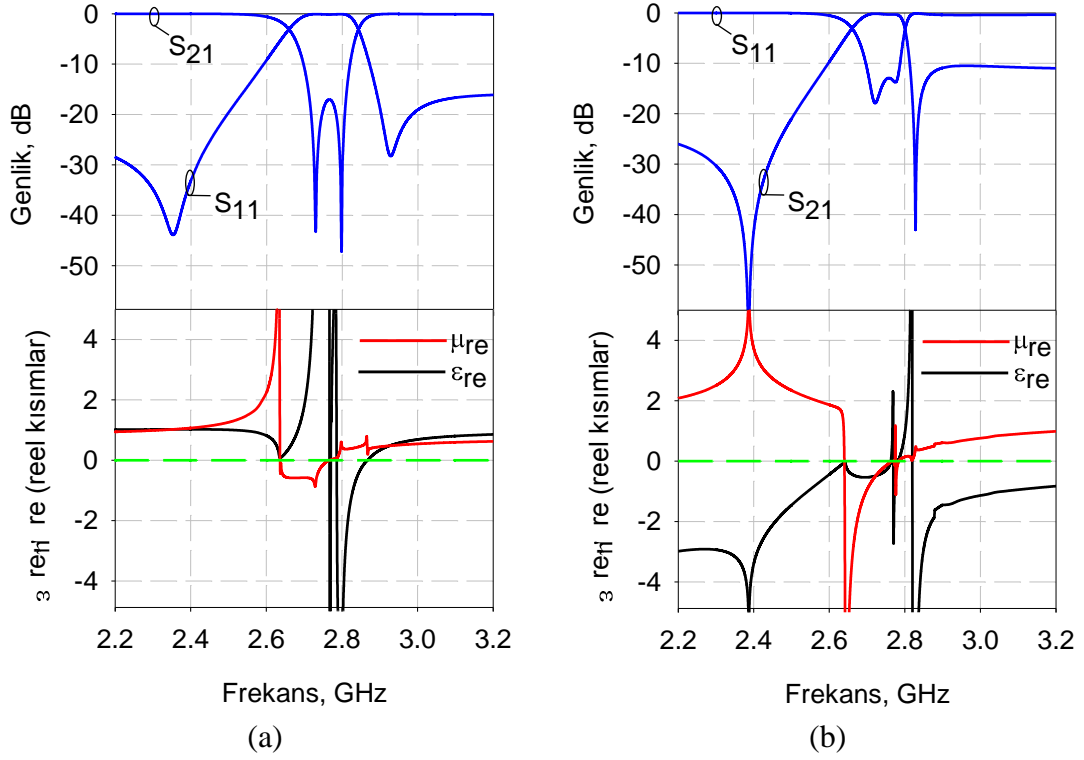
Burada,  $\gamma$ ,  $Z_0$ ,  $k_0$  ve  $Z_B$  ifadeleri sırasıyla yayılma sabiti, dalga empedansı, dalga sayısı ve blok empedansını temsil etmektedir. Yayılma sabiti ve Blok empedans ifadeleri ise Karthikeyan ve Arulvani tarafından yapılan çalışmada (Karthikeyan ve Arulvani 2010) verildiği gibi eşitlik (2.21)'de verilmektedir. Buradaki ABCD ve Z parametreleri simülasyon sonuçlarından doğrudan alınıp kullanılabilir. Bunun yanı sıra ABCD ve Z parametrelerinin ifadeleri, yukarıda türetilen saçılma matrisi(S) ifadeleri kullanılarak elde edilebilmektedir. Saçılma matrisinden ABCD ve Z parametrelerine dönüşüm ifadeleri Pozar tarafından yazılmış kitaptan bakılabilir (Pozar).

$$\gamma = \frac{\arccos\left(\frac{Z_{11}+Z_{22}}{2Z_{21}}\right)}{l} \quad (2.21a)$$

$$Z_B = \frac{B}{e^{i\gamma l} - A} \quad (2.21b)$$

Burada,  $l$  ifadesi ilgilenilen iki portlu yapının uzunluğunu temsil etmektedir.

Çift modlu rezonatörün düz bir iletim hattından ve topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumunda dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değişimi saçılma parametreleriyle birlikte Şekil 2.20'de gösterilmektedir. Bu grafikler çıkarılırken kullanılan parametre değerleri  $l_a=4.2\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ 'dir. Bu grafiklerden görülmektedir ki çift modlu rezonatör topraklı bir iletim hattından beslendiği durumda rezonans frekansı civarında eş zamanlı olarak negatif dielektrik ve negatif manyetik geçirgenliğe sahiptir. Böylelikle çift modlu rezonatör topraklı bir iletim hattından beslendiği durumda rezonans frekansı civarında negatif kırıcılık indisine sahiptir.



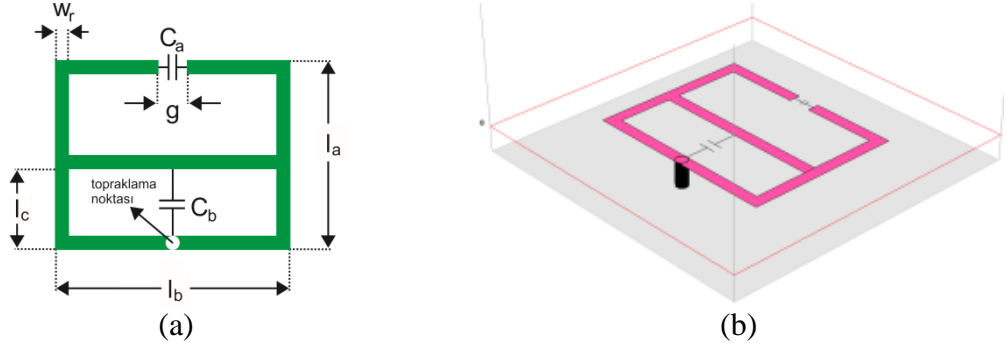
Şekil 2.20: Çift modlu rezonatörün (a) düz ve (b) topraklanmış bir iletim hattından beslendiği durumlarda dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenliğin saçılma parametreleriyle birlikte değişimi

## 2.2 Alternatif Çift Modlu Rezonatör

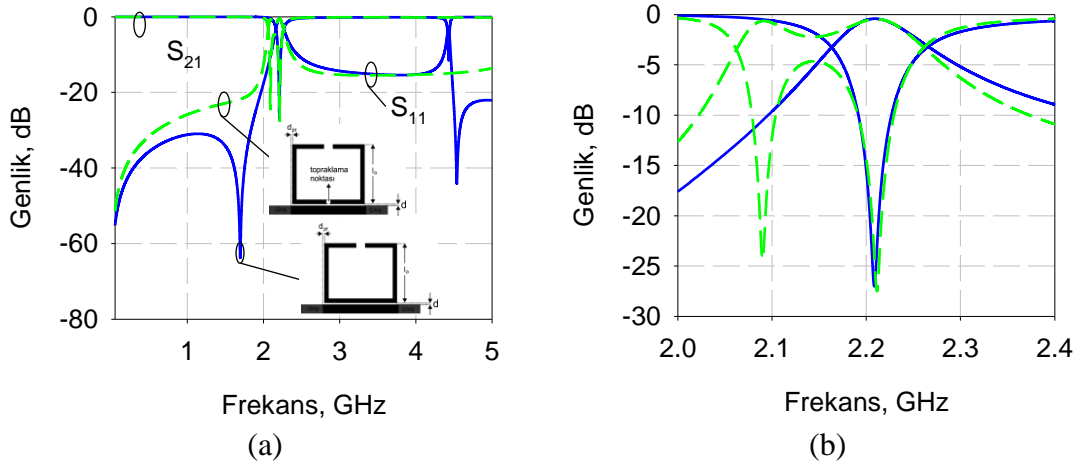
Yukarıda önerilen çift modlu rezonatöre alternatif olarak önerilen çift modlu rezonatörün (AÇMR) iki ve üç boyutlu görünümü Şekil 2.21'de gösterilmektedir. Bu rezonatörün oluşum aşamasının ilk basamağını geleneksel açık halka rezonatörün dikey simetri eksenini üzerindeki noktasının topraklanması oluşturmaktadır. Bu topraklama işlemi rezonatörün çift modlu olmasını sağlamaktadır. Bundan sonra, rezonatörün dikey simetri eksenine göre simetrik olacak biçimde rezonatör üzerinden seçilen iki nokta birbiriyle bir iletim hattı (iç bağ) aracılığıyla bağlanmaktadır. Bu bağlantı noktalarının rezonatör üzerinde eş zamanlı olarak benzer biçimde hareket ettirilmesiyle iki mod frekansının birbirine olan uzaklığı ayarlanmaktadır. Daha sonra rezonatörün açık uçları arasına kondansatör ( $C_a$ ) yerleştirilerek rezonatörün odd mod frekansı bireysel olarak kontrol edilmektedir. Benzer şekilde rezonatörün iki noktasını birleştiren iletim hattının orta noktası ile toprak arasına kondansatör ( $C_b$ ) yerleştirilmektedir. Bu kondansatör de rezonatörün even modunu bireysel olarak kontrol etmektedir. Bu oluşum aşamaları tam dalga elektromanyetik simülasyon



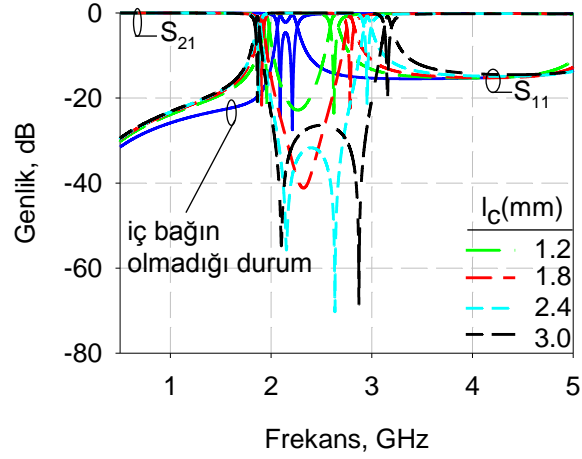
kullanılarak Şekil 2.22, Şekil 2.23 ve Şekil 2.24'de elde edilmektedir. Bu oluşum aşamaları, rezonatörlerin düz bir iletim hattından beslendiği durum için gösterilmektedir. Rezonatörlerin topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumu önceki kısımda anlatılan çift modlu rezonatördeki duruma benzer olduğu için burada ayrıca gösterilmeyecektir. Simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri  $l_a=5.4\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.6\text{mm}$ ,  $g=0.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ' dir.



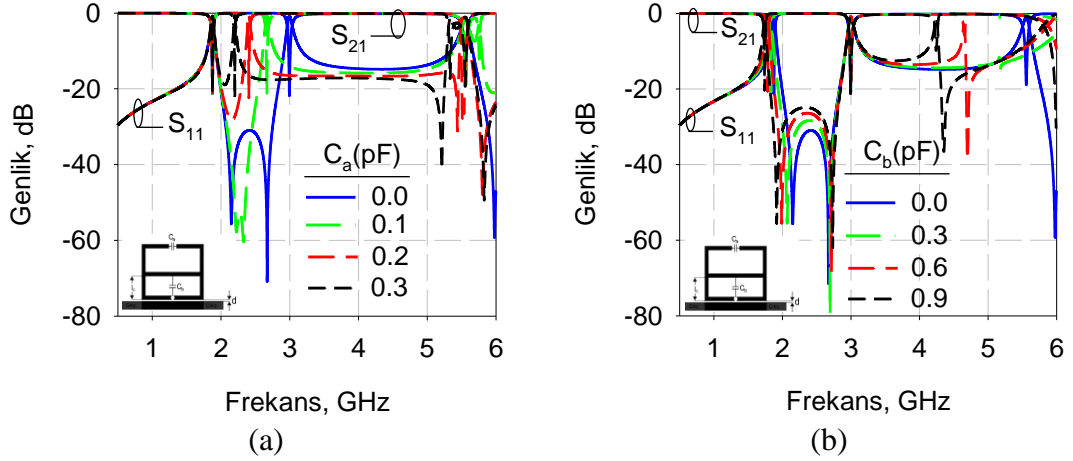
Şekil 2.21: Alternatif çift modlu rezonatörün a) iki boyutlu ve b) üç boyutlu görünümü



Şekil 2.22: Geleneksel açık halka rezonatörün topraklanmasıyla çift modlu rezonatör oluşturulması (a) dar bant ve (b) geniş bant



Şekil 2.23: Yansıma ve iletim katsayılarının genliğinin  $l_c$  parametresine göre değişimi ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $C_b=0.0\text{pF}$ )

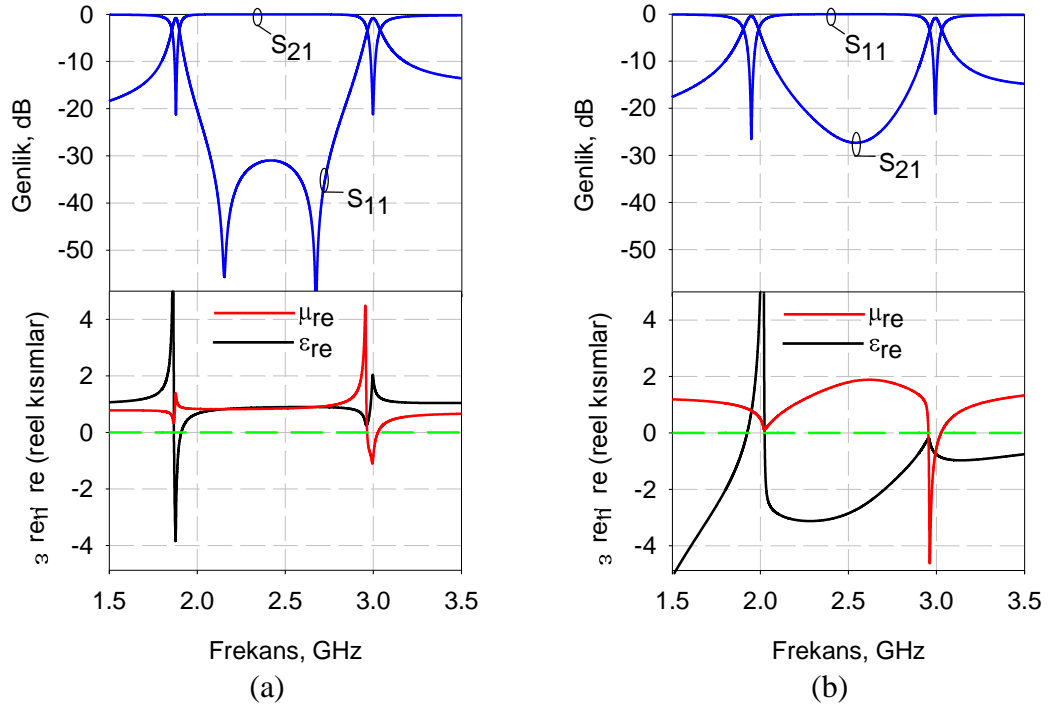


Şekil 2.24: Yansıma ve iletim katsayılarının genliğinin (a)  $C_a$  parametresine göre ( $C_b=0.0\text{pF}$ ,  $l_c=2.4\text{mm}$ ) ve (b)  $C_b$  parametresine göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $l_c=2.4\text{mm}$ ) değişim grafikleri

### 2.2.1 Alternatif Çift Modlu Rezonatörün Metamalzeme Özelliği

Alternatif çift modlu rezonatörün düz bir iletim hattından ve topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumunda dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değişimi saçılma parametreleriyle birlikte Şekil 2.25'de gösterilmektedir. Grafikler çıkarılırken kullanılan parametre değerleri  $l_a=5.4\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_c=2.4\text{mm}$ ,  $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $C_b=0.0\text{pF}$ ,  $w_r=0.6\text{mm}$ ,  $g=0.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ' dir. Bu grafiklerden görülmektedir ki alternatif çift modlu rezonatör topraklı bir iletim hattından beslendiği durumda rezonans frekansı civarında negatif dielektrik ve negatif manyetik geçirgenliğe sahiptir. Böylelikle alternatif çift modlu rezonatör

topraklı bir iletim hattından beslendiği durumda rezonans frekansı civarında negatif kırıcılık indisine sahiptir.



Şekil 2.25: Alternatif çift modlu rezonatörün (a) düz bir iletim hattından ve (b) topraklanmış bir iletim hattından beslendiği durumda dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenliğin saçılma parametreleriyle birlikte değişimi

### 3. ÇOK BANDLI MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMLARI

2. bölümde tek ve çift modlu rezonatörler tanıtıldı. Rezonatörlerin düz bir iletim hattıyla beslendiği durumunun bant tutan filtre tasarımına yol gösterdiği görüldü. Bunun yanı sıra rezonatörlerin topraklanmış bir iletim hattından beslendiği durumun da bant geçiren filtre tasarımına yol gösterdiği görüldü. Bu bölümde bahsedilen bu özelliklerden faydalanılarak yüksek seçicilikte çok bantlı bant geçiren ve bant tutan mikroşerit filtre tasarımları yapılmaktadır. Tasarlanan filtrelerde taban malzeme olarak bağıl dielektrik geçirgenliği 10.2, kalınlığı 1.27mm ve kayıp tanjantı( $\tan\delta$ ) 0.0023 olan RT/Duroid kullanılmaktadır. Giriş çıkış portları  $50\Omega$ 'dur.

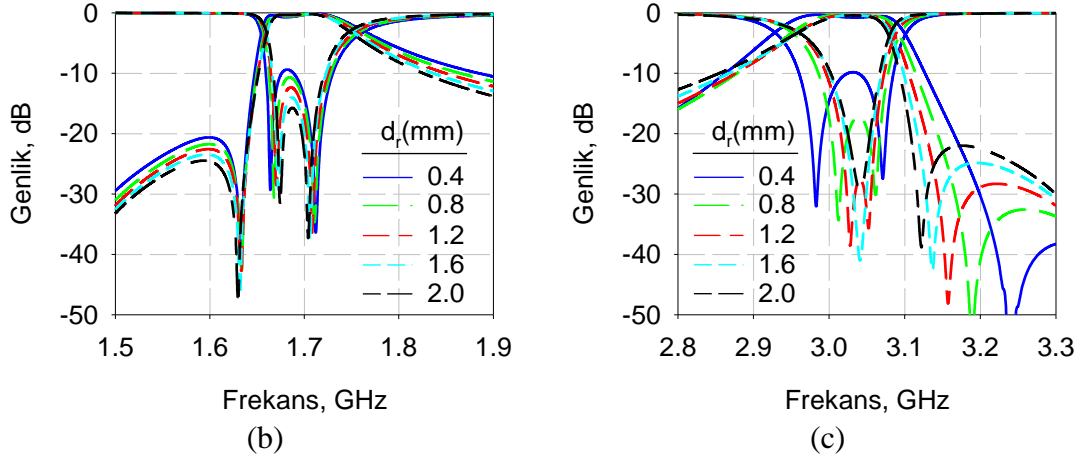
#### 3.1 İki Bantlı Filtre Tasarımları

2. bölümde tanıtılan çift modlu rezonatörlerin çift mod özelliklerinden faydalanılarak iki bantlı filtre tasarımı yapılabilmektedir. Tasarlanan iki bantlı filtreler, besleme hattının sadece üst veya alt kısmına ve besleme hattının düşey simetri ekseninin sol ve sağ tarafına özdeş çift modlu rezonatörler yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu yerleşim filtrenin her bir bandında iki kutup elde edilerek filtrenin frekans seçiciliğinin artırılmasını sağlamaktadır. Tasarlanan iki bantlı filtrelerin her bir bandının merkez frekansı çift modlu rezonatörlerin rezonans özelliklerinden faydalanılarak kontrol edilmektedir.

##### 3.1.1 İki Bantlı Bant Tutan Filtre Tasarımları

Çift modlu rezonatörlerin düz bir besleme hattının altına veya üstüne yerleştirilmesiyle iki bantlı bant tutan filtre tasarımı yapılabilmektedir. Tasarlanan iki bantlı bant tutan filtrelerden biri Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Tasarlanan filtrenin her bir bandı çift modlu rezonatörün rezonans özelliklerinden faydalanılarak  $C_a$  ve  $C_b$  kondansatörleri sayesinde bireysel olarak kontrol edilebilmektedir. Tasarlanan filtrenin iletim ve yansıma katsayılarının  $C_a$  ve  $C_b$  kondansatörlerine göre değişimi tam dalga elektromanyetik simülatör kullanılarak Şekil 3.2'de elde edilmektedir.

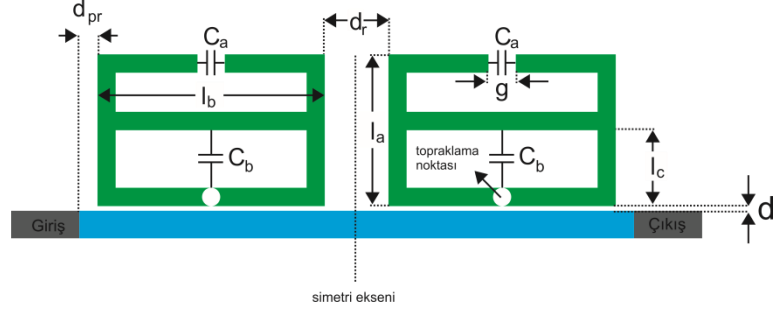




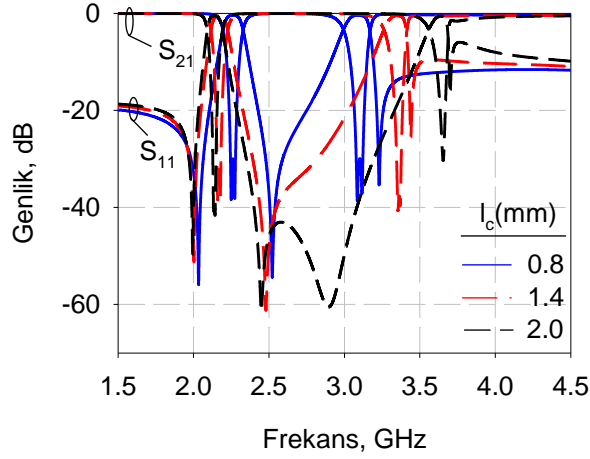
Şekil 3.3: ÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısının iletim ve yansımaya katsayılarının genliğinin  $d_r$  parametresine göre değişimi ( $C_a=0.6\text{pF}$ ,  $C_b=4.7\text{pF}$ ) (a) geniş bant, (b) ve (c) dar bant

Ayrıca, besleme hattının uzunluğu sabit kalmak şartıyla dikey simetri ekseninin solundaki ve sağındaki rezonatörler arası uzaklığın ( $d_r$ ) değiştirilmesi eklem kaybı (IL), dönme kaybı (RL), bant genişliği ve yansımaya sıfırlarını etkilemektedir. Şekil 3.3'de  $d_r$  uzaklığının bu parametreler üzerindeki değişimi grafiksel olarak verilmektedir. Simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri  $l_a=4.2\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ 'dir.

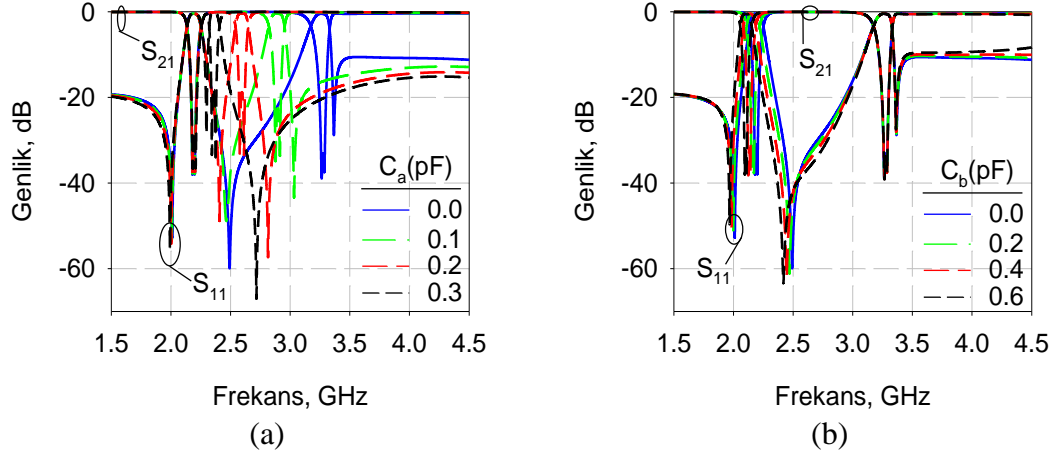
Tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre tasarımlarından bir diğeri ise Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Bu tasarımda AÇMR kullanılmaktadır. Tasarlanan filtrenin her bir bandı çift modlu rezonatörün rezonans özelliklerinden faydalanılarak bireysel olarak kontrol edilebilmektedir. Ayrıca tasarlanan filtrenin bandları rezonatörün  $l_c$  parametresinin değişimi sayesinde birbirine yaklaştırılabilir/uzaklaştırılabilir. Tasarlanan filtrenin iletim ve yansımaya katsayılarının  $l_c$ ,  $C_a$  ve  $C_b$  parametrelerine göre değişimi tam dalga elektromanyetik simülatör kullanılarak Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da elde edilmektedir. Ayrıca tasarlanan filtrenin dikey simetri ekseninin solundaki ve sağındaki rezonatörler arası uzaklık ( $d_r$ ) bir önceki iki bantlı bant tutan filtre tasarımındaki benzer şekilde eklem kaybı (IL), dönme kaybı (RL), bant genişliği ve yansımaya sıfırları üzerinde etkilidir. Şekil 3.7'de  $d_r$  uzaklığının bu parametreler üzerindeki değişimi grafiksel olarak verilmektedir. Simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri  $l_a=4.0\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.6\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ 'dir.



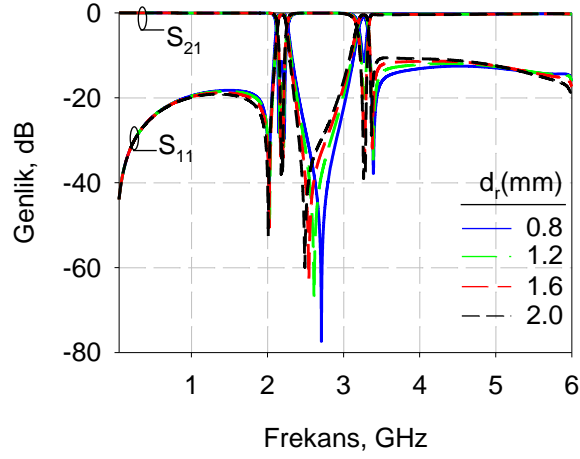
Şekil 3.4: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısı



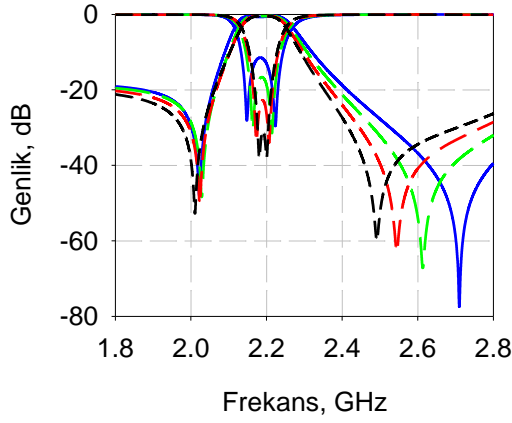
Şekil 3.5: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısının iletim ve yansım katsayılarının  $l_c$  parametresine göre değişimi ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $C_b=0.0\text{pF}$ ,  $d_r=2.0\text{mm}$ )



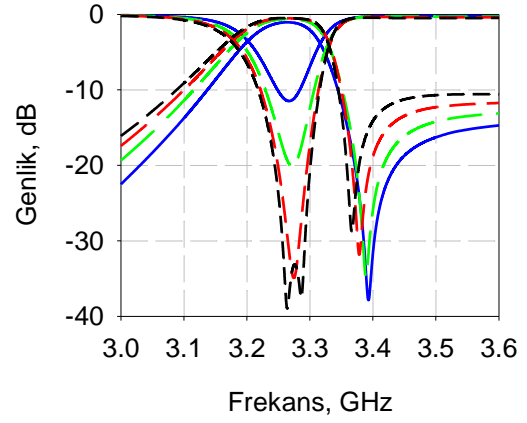
Şekil 3.6: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısının iletim ve yansım katsayılarının genliğinin (a)  $C_a$  parametresine göre ( $C_b=0.0\text{pF}$ ,  $l_c=1.2\text{mm}$ ,  $d_r=2.0\text{mm}$ ) ve (b)  $C_b$  parametresine göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $l_c=1.2\text{mm}$ ,  $d_r=2.0\text{mm}$ ) değişim grafikleri



(a)



(b)



(c)

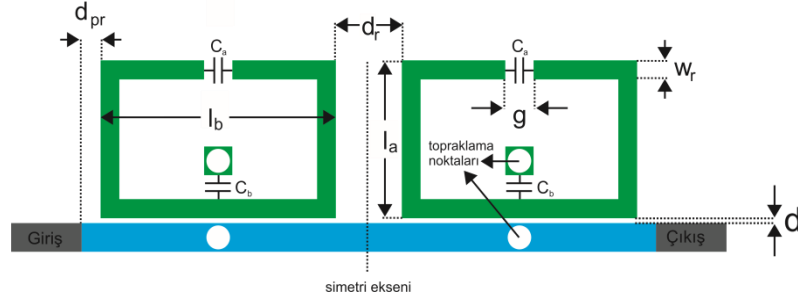
Şekil 3.7: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant tutan filtre yapısının iletim ve yansımaya katsayılarının genliğinin  $d_r$  parametresine göre değişimi ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $C_b=0.0\text{pF}$ ,  $l_c=1.2\text{mm}$ ) (a) geniş bant (b) ve (c) dar bant

### 3.1.2 İki Bantlı Bant Geçiren Filtre Tasarımları

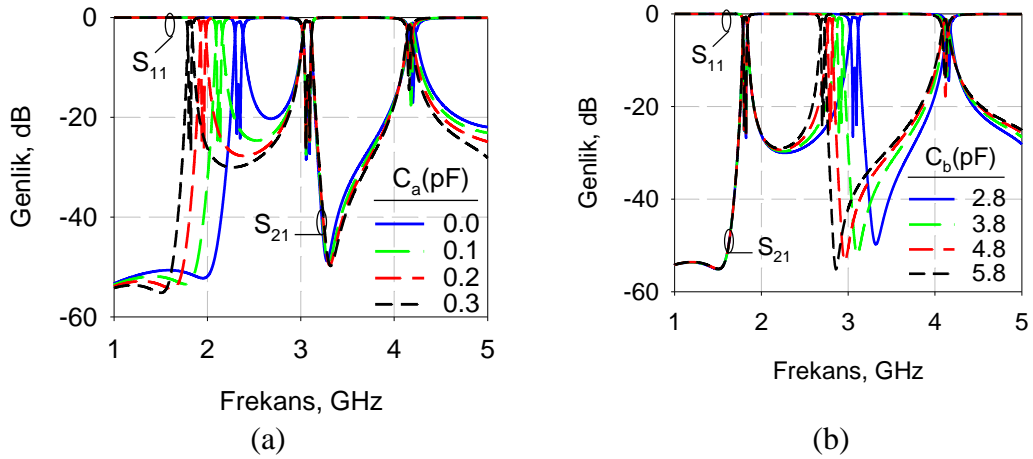
Çift modlu rezonatörlerin topraklanmış bir besleme hattının altına veya üstüne yerleştirilmesiyle iki bantlı bant geçiren filtre tasarımı yapılabilmektedir. Tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtrelerden biri Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Tasarlanan filtrenin her bir bandı çift modlu rezonatörün rezonans özelliklerinden faydalanılarak  $C_a$  ve  $C_b$  kondansatörleri sayesinde bireysel olarak kontrol edilebilmektedir. Tasarlanan filtrenin iletim ve yansımaya katsayılarının  $C_a$  ve  $C_b$  kondansatörlerine göre değişimi tam dalga elektromanyetik simülasyon kullanılarak Şekil 3.9'da elde edilmektedir. Ayrıca tasarlanan filtrenin dikey simetri ekseninin



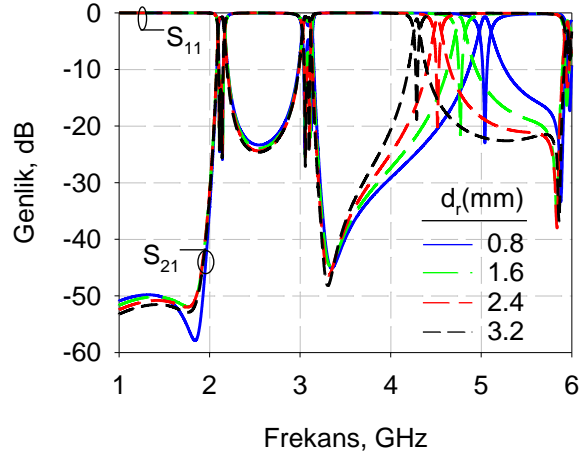
solundaki ve sağındaki rezonatörler arası uzaklık( $d_r$ ) eklem kaybı(IL), dönme kaybı(RL), bant genişliği ve harmonik frekansı üzerinde etkilidir. Burada rezonatörlerle birlikte topraklama noktaları da eş zamanlı olarak hareket ettirilmektedir. Şekil 3.10'da bu değişim gösterilmektedir. Simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri  $l_a=5.8\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ 'dir.



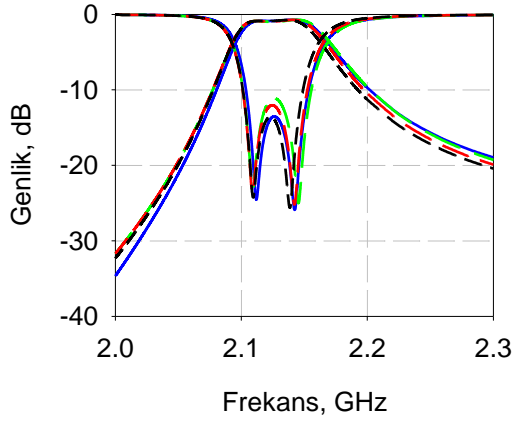
Şekil 3.8: ÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısı



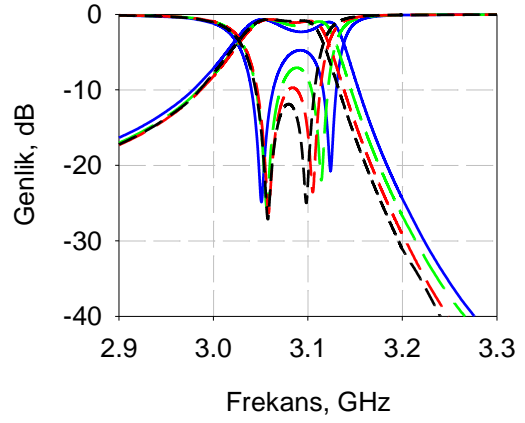
Şekil 3.9: ÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısının iletim ve yansım katsayılarının genliğinin (a)  $C_a$  parametresine göre ( $C_b=2.8\text{pF}$ ,  $d_r=3.6\text{mm}$ ) ve (b)  $C_b$  parametresine göre ( $C_a=0.3\text{pF}$ ,  $d_r=3.6\text{mm}$ ) değişim grafikleri



(a)



(b)

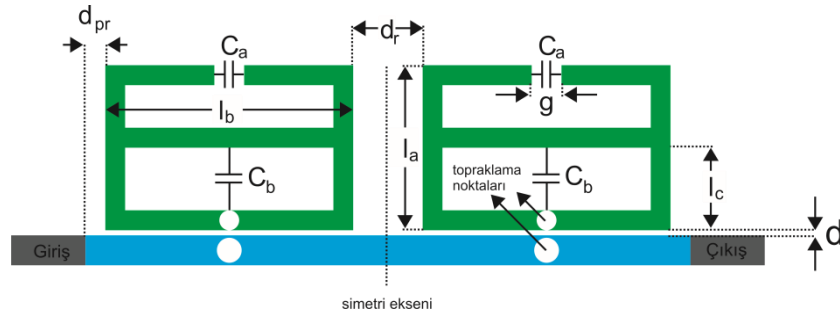


(c)

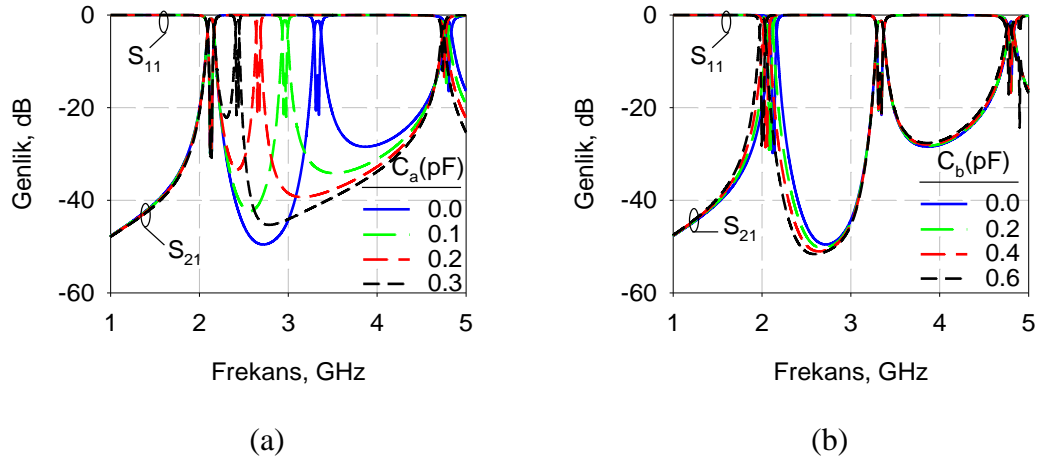
Şekil 3.10: ÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısının iletim ve yansımaya katsayılarının genliğinin  $d_r$  parametresine göre değişimi ( $C_a=0.1\text{pF}$ ,  $C_b=2.8\text{pF}$ ) (a) geniş bant (b) ve (c) dar bant

Tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre tasarımlarından bir diğeri ise Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Bu tasarımda AÇMR kullanılmaktadır. Tasarlanan filtrenin her bir bandı çift modlu rezonatörün rezonans özelliklerinden faydalanılarak bireysel olarak kontrol edilebilmektedir. Ayrıca tasarlanan filtrenin bandları rezonatörün  $l_c$  parametresi sayesinde birbirine yaklaştırılabilir/uzaklaştırılabilir. Ayrıca, rezonatörler arası uzaklık ve topraklama noktaları arası uzaklık eşzamanlı olarak değiştirilerek dönme kaybı, eklemlerarası kayıp, bant genişliği ve harmonik frekansı değiştirilebilmektedir. Bu değişim ayrıca bantlar arasında iletim sıfırı oluşumunu da etkilemektedir. Tasarlanan filtrenin iletim ve yansımaya katsayılarının  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $l_c$  ve  $d_r$  parametrelerine göre değişimi tam dalga elektromanyetik simülasyon kullanılarak Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de elde edilmektedir.

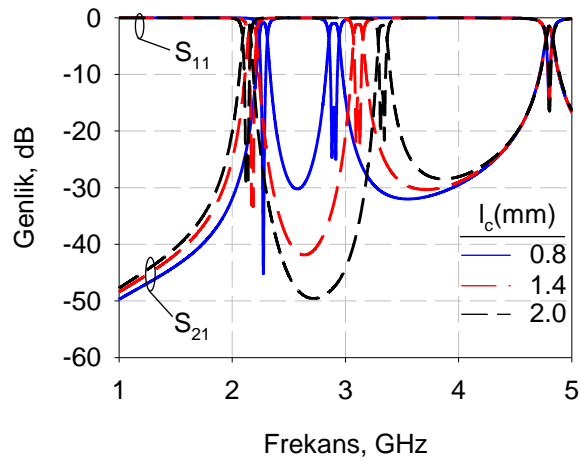
Simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri  $l_a=4.6\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.6\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ 'dir.



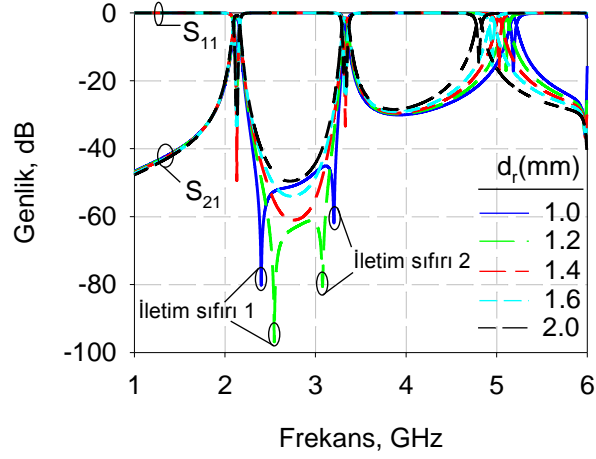
Şekil 3.11: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısı



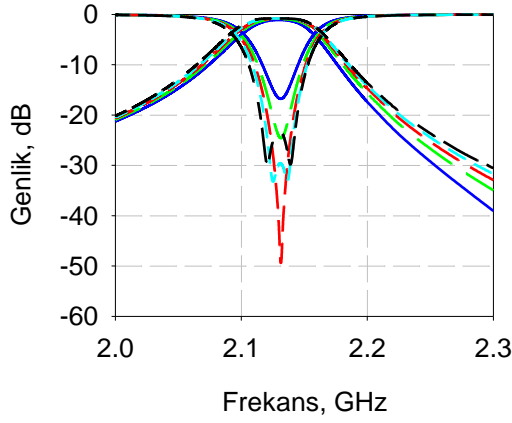
Şekil 3.12: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısının iletim ve yansımaya katsayılarının genliğinin (a)  $C_a$  parametresine göre ( $C_b=0.0\text{pF}$ ,  $l_c=2.0\text{mm}$ ,  $d_r=2.0\text{mm}$ ) ve (b)  $C_b$  parametresine göre ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $l_c=2.0\text{mm}$ ,  $d_r=2.0\text{mm}$ )değişim grafikleri



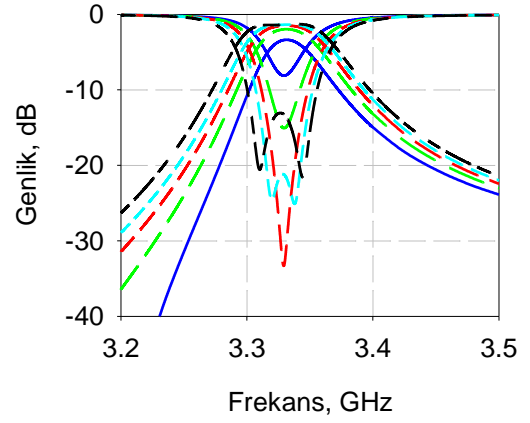
Şekil 3.13: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısının iletim ve yansımaya katsayılarının  $l_c$  parametresine göre değişimi ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $C_b=0.0\text{pF}$ ,  $d_r=2.0\text{mm}$ )



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.14: AÇMR kullanılarak tasarlanan iki bantlı bant geçiren filtre yapısının iletim ve yansımaya katsayılarının genliğinin  $d_r$  parametresine göre değişim grafikleri ( $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $C_b=0.0\text{pF}$ ,  $l_c=2.0\text{mm}$ ) (a) geniş band (b) ve (c) dar band

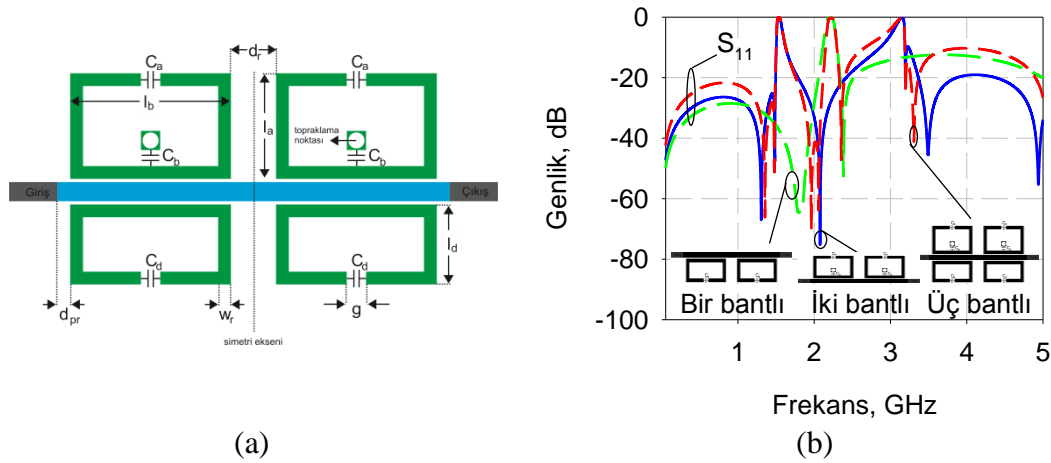
### 3.2 Üç Bantlı Filtre Tasarımları

Önceki kısımda çift modlu rezonatörler besleme hattının alt veya üst kısmına yerleştirilerek iki bantlı filtre tasarımları yapıldı. Buradan yola çıkılarak, besleme hattının bir tarafına çift modlu rezonatörler diğer tarafına da tek modlu rezonatörler yerleştirilerek üç bantlı filtre tasarımları yapılabilmektedir. Ayrıca besleme hattının altına yerleştirilen rezonatörler ile besleme hattının üstüne yerleştirilen rezonatörler birbirine zayıf kuplajlı olduğundan dolayı tasarlanan üç bantlı filtrelerin her bir bandının merkez frekansı rezonatörlerin bireysel olarak oluşturduğu rezonans frekanslarıdır. Bu durum, tasarlanan üç bantlı filtrenin her bir bandının merkez

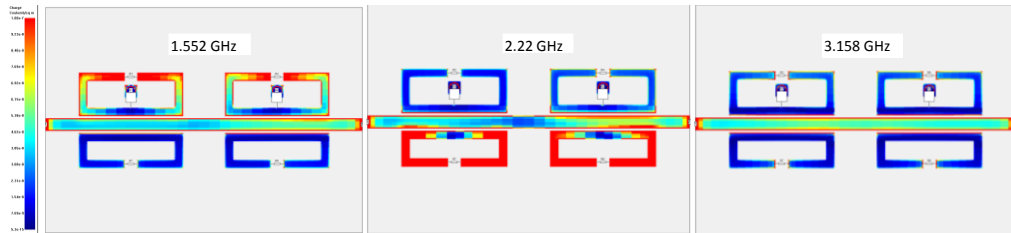
frekansını rezonatörlerin kondansatör değerleriyle bireysel olarak kontrol edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

### 3.2.1 Üç Bantlı Bant Tutan Filtre Tasarımları

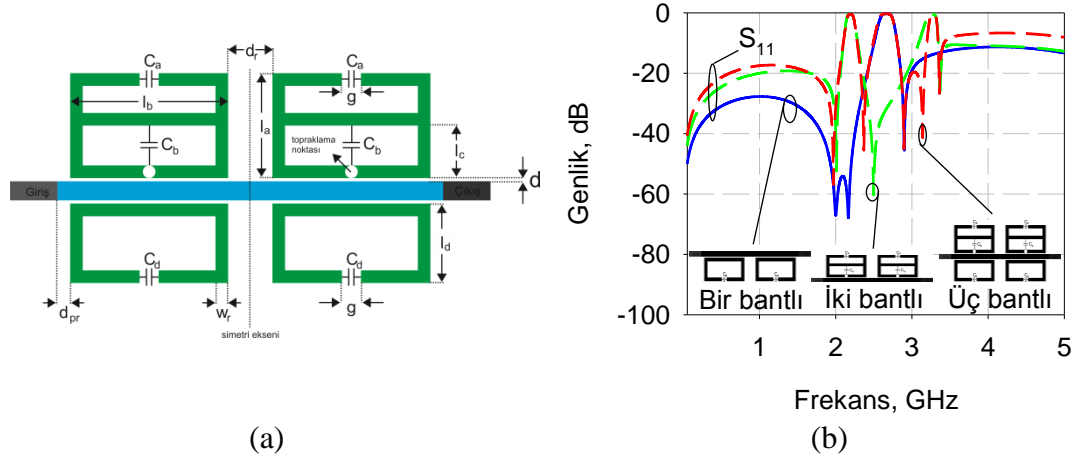
Düz bir iletim hattının bir tarafına çift modlu rezonatörler diğer tarafına da tek modlu rezonatörler yerleştirilerek üç bantlı bant tutan filtre tasarımı yapılabilmektedir. Tasarlanan üç bantlı bant tutan filtrelerden biri Şekil 3.15'de gösterilmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi, tasarlanan üç bantlı bant tutan filtrenin her bir bandının merkez frekansı filtreyi oluşturan rezonatörlerin rezonans frekanslarıdır. Bu durum Şekil 3.15'de gösterilmektedir. Filtrenin birinci ve üçüncü durdurma bandı çift modlu rezonatör sayesinde olduğundan dolayı birinci durdurma bandının merkez frekansı  $C_a$  ile kontrol edilirken üçüncü durdurma bandının merkez frekansı  $C_b$  ile kontrol edilmektedir. Benzer şekilde filtrenin ikinci durdurma bandı tek modlu rezonatör sayesinde olduğundan dolayı filtrenin ikinci



Şekil 3.15: (a) TMR ve ÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre yapısı ve (b) üç bantlı bant tutan filtre tasarımının aşamaları (filtre parametreleri:  $l_a=4.2\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_d=3.4\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ,  $d_r=4.0\text{mm}$ ,  $C_a=0.8\text{pF}$ ,  $C_b=3.8\text{pF}$ ,  $C_d=0.3\text{pF}$ )



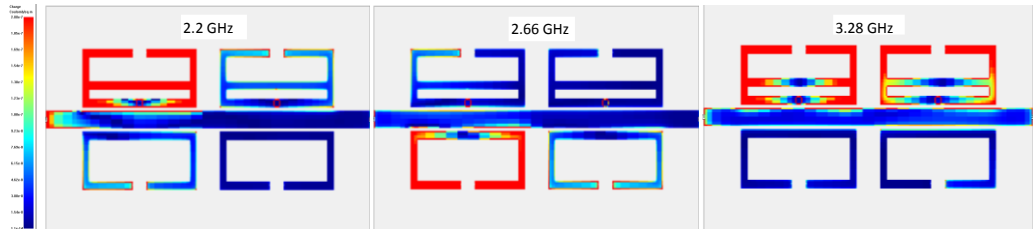
Şekil 3.16: TMR ve ÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeyel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı



Şekil 3.17: (a) TMR ve AÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre yapısı ve (b) üç bantlı bant tutan filtre tasarımının aşamaları (filtre parametreleri:  $l_a=4.0\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_d=4.0\text{mm}$ ,  $l_c=1.2\text{mm}$ ,  $w_r=0.6\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ,  $d_r=2.0\text{mm}$ ,  $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $C_b=0.0\text{pF}$ ,  $C_d=0.0\text{pF}$ )

durdurma bandı  $C_d$  kondansatörü sayesinde kontrol edilmektedir. Tasarlanan filtrenin her bir bandının merkez frekanslarındaki frekanslarda yüzeysel yük yoğunluğu dağılımı da Şekil 3.16'da gösterilmektedir.

Tasarlanan üç bantlı bant tutan filtrelerden bir diğeri ise Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Bu tasarımda TMR ve AÇMR kullanılmaktadır. Bu filtrenin her bir bandının hangi rezonatör tarafından oluşturulduğu Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Filtrenin birinci ve üçüncü durdurma bandı çift modlu rezonatör sayesinde olduğundan dolayı birinci durdurma bandının merkez frekansı  $C_b$  ile kontrol edilirken üçüncü durdurma bandının merkez frekansı  $C_a$  ile kontrol edilmektedir. Benzer şekilde filtrenin ikinci durdurma bandı tek modlu rezonatör sayesinde olduğundan dolayı filtrenin ikinci durdurma bandı  $C_d$  kondansatörü sayesinde kontrol edilmektedir. Tasarlanan filtrenin her bir bandının merkez frekanslarındaki frekanslarda yüzeysel yük yoğunluğu dağılımı da Şekil 3.18'de gösterilmektedir.

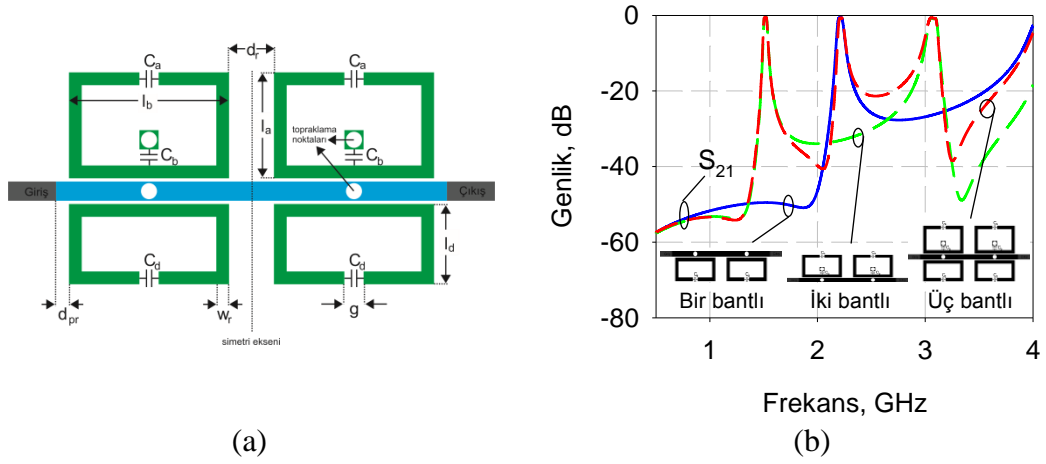


Şekil 3.18: TMR ve AÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant tutan filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeysel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı

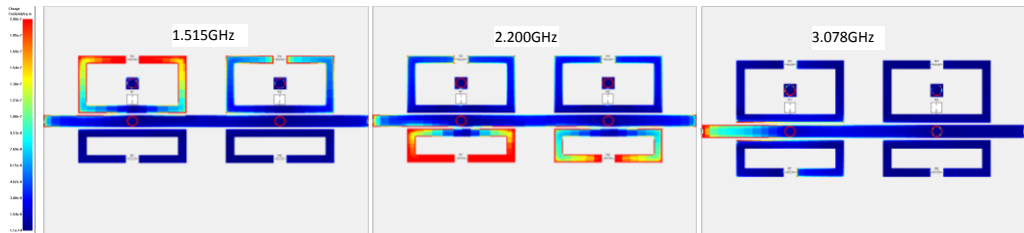
### 3.2.2 Üç Bantlı Bant Geçiren Filtre Tasarımları

Topraklanmış bir iletim hattının bir tarafına çift modlu rezonatörler diğer tarafına da tek modlu rezonatörler yerleştirilerek üç bantlı bant geçiren filtre tasarımı yapılabilmektedir. Tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtrelerin her bir bandının oluşum mekanizması ve kontrolü üç bantlı bant tutan filtrelerin her bir bandının oluşum mekanizması ve kontrolüyle aynıdır.

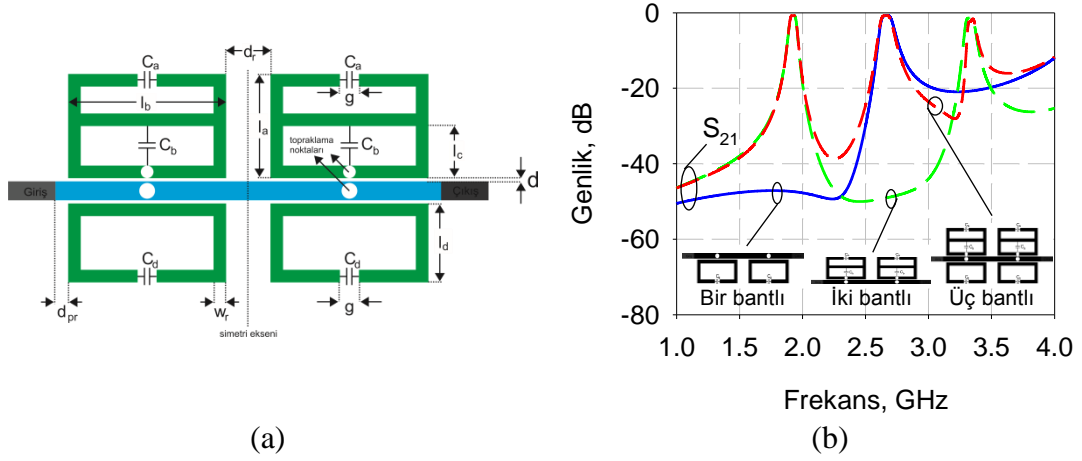
Tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtrelerden biri Şekil 3.19'da gösterilmektedir. Bu filtrenin iletim ve yansımaya katsayıları Şekil 3.19'da gösterilmektedir. Üç bantlı bant tutan filtre tasarımına benzer şekilde tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtrenin birinci ve üçüncü bandı çift modlu rezonatörler tarafından oluşturulurken ikinci bant tek modlu rezonatör tarafından oluşturulmaktadır. Dolayısıyla birinci ve üçüncü bant  $C_x$  ve  $C_y$  kondansatörleri tarafından kontrol edilirken ikinci bant tek modlu rezonatörler tarafından kontrol



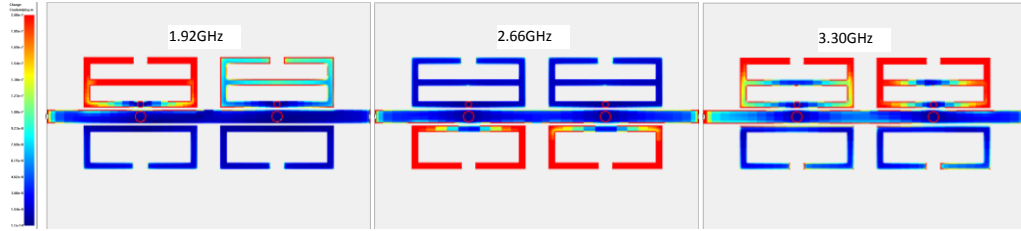
Şekil 3.19: (a) TMR ve ÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtre yapısı ve (b) üç bantlı bant geçiren filtre tasarımının aşamaları (filtre parametreleri:  $l_a=5.8\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_d=3.4\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ,  $d_r=3.6\text{mm}$ ,  $C_a=0.6\text{pF}$ ,  $C_b=2.8\text{pF}$ ,  $C_d=0.3\text{pF}$ )



Şekil 3.20: TMR ve ÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeysel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı



Şekil 3.21: (a) TMR ve AÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtre yapısı ve (b) üç bantlı bant geçiren filtre tasarımının aşamaları (filtre parametreleri:  $l_a=4.6\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_d=4.0\text{mm}$ ,  $l_c=2.0\text{mm}$ ,  $w_r=0.6\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ,  $d_r=2.0\text{mm}$ ,  $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $C_b=1.0\text{pF}$ ,  $C_d=0.0\text{pF}$ )



Şekil 3.22: TMR ve AÇMR kullanılarak tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeyel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı

edilmektedir. Tasarlanan filtrenin her bir bandının merkez frekanslarındaki frekanslarda yüzeyel yük yoğunluğu dağılımı da Şekil 3.20'de gösterilmektedir.

Tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtrelerden bir diğeri ise Şekil 3.21'de gösterilmektedir. Bu filtrenin iletim katsayıları Şekil 3.21'de gösterilmektedir. Yine üç bantlı bant tutan filtrelere benzer şekilde, tasarlanan üç bantlı bant geçiren filtrenin birinci ve üçüncü bandı çift modlu rezonatörler tarafından oluşturulurken ikinci bandı tek modlu rezonatör tarafından oluşturulmaktadır. Dolayısıyla birinci ve üçüncü bant  $C_x$  ve  $C_y$  kondansatörleri tarafından kontrol edilirken ikinci bant tek modlu rezonatörler tarafından kontrol edilmektedir. Tasarlanan filtrenin her bir bandının merkez frekanslarındaki frekanslarda yüzeyel yük yoğunluğu dağılımı da Şekil 3.22'de gösterilmektedir.

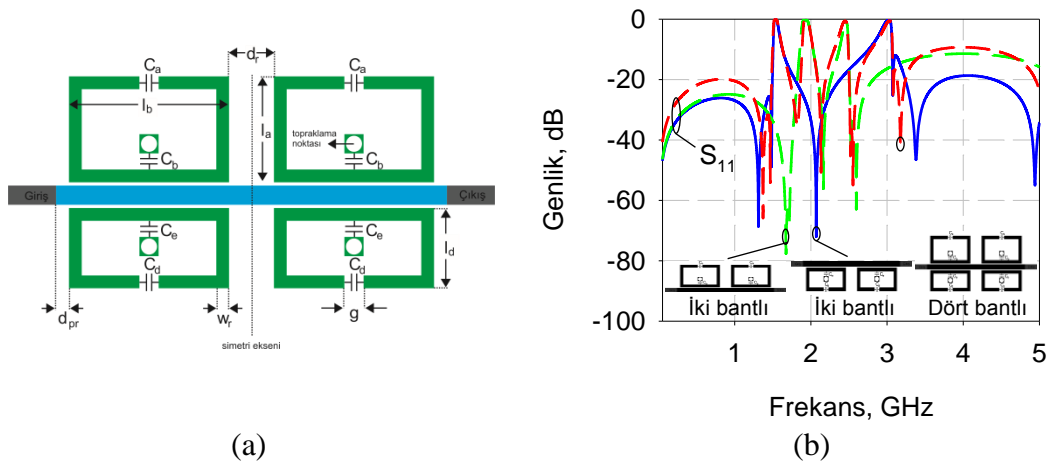


### 3.3 Dört Bantlı Filtre Tasarımları

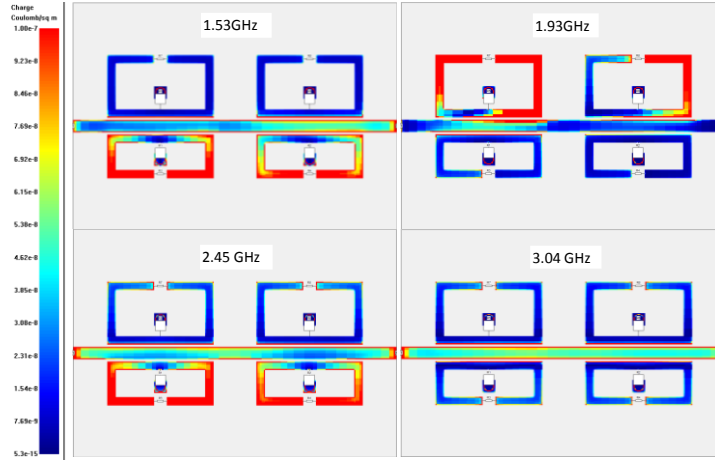
Üç bantlı filtre tasarımı besleme hattının bir tarafına çift modlu rezonatörler diğer tarafına da tek modlu rezonatörler yerleştirilerek üç bantlı filtre tasarımı yapıldı. Benzer biçimde besleme hattının her iki tarafına çift modlu rezonatörler yerleştirilerek dört bantlı filtre tasarımı yapılabilmektedir. Yapılan tasarımlarda besleme hattının bir tarafına yerleştirilen çift modlu rezonatörler ile besleme hattının diğer tarafına yerleştirilen çift modlu rezonatörler farklı elektriksel uzunluk veya farklı kapasitans değerlerine sahiptir. Böylece besleme hattının bir tarafına yerleştirilen çift modlu rezonatörler ile diğer tarafına yerleştirilen çift modlu rezonatörler farklı frekanslarda ikişer bant oluşturmakta ve böylece toplam dört tane bant oluşturulmaktadır.

#### 3.3.1 Dört Bantlı Bant Tutan Filtre Tasarımları

Düz bir iletim hattının her iki tarafına farklı elektriksel uzunluk veya kondansatör değerlerine sahip çift modlu rezonatörler yerleştirilerek dört bantlı bant tutan filtre tasarımı yapılmaktadır. Tasarlanan dört bantlı bant tutan filtre yapısı ve bu filtrenin hangi bandının hangi rezonatör tarafından oluşturulduğu Şekil 3.23'de gösterilmektedir. Filtrenin birinci ve dördüncü durdurma bandı besleme hattının üst kısmındaki çift modlu rezonatörler sayesinde olduğundan dolayı birinci durdurma



Şekil 3.23: (a) ÇMR kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant tutan filtre yapısı ve (b) dört bantlı bant tutan filtre tasarımının aşamaları (filtre parametreleri:  $l_a=6.0\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_d=4.2\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ,  $d_r=4.0\text{mm}$ ,  $C_a=0.2\text{pF}$ ,  $C_b=8.2\text{pF}$ ,  $C_d=0.8\text{pF}$ ,  $C_e=4.8\text{pF}$ )

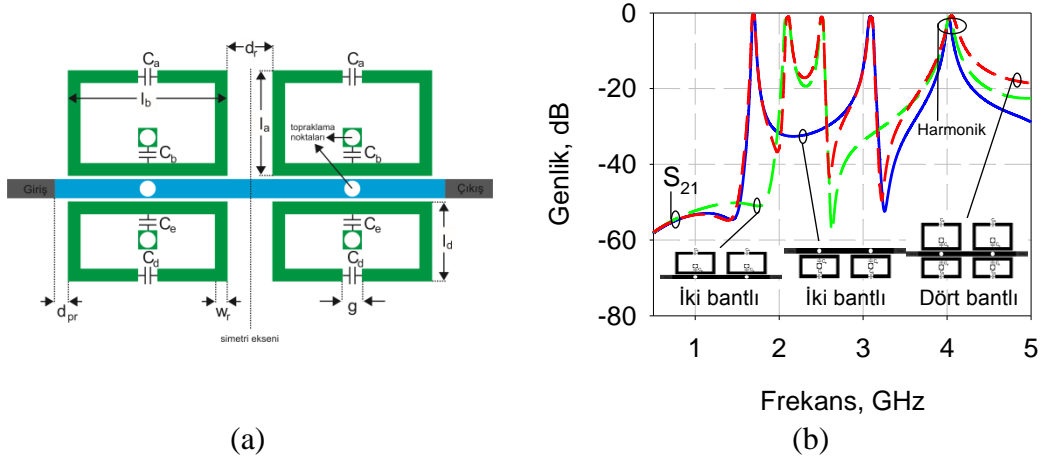


Şekil 3.24: ÇMR kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant tutan filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeysel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı

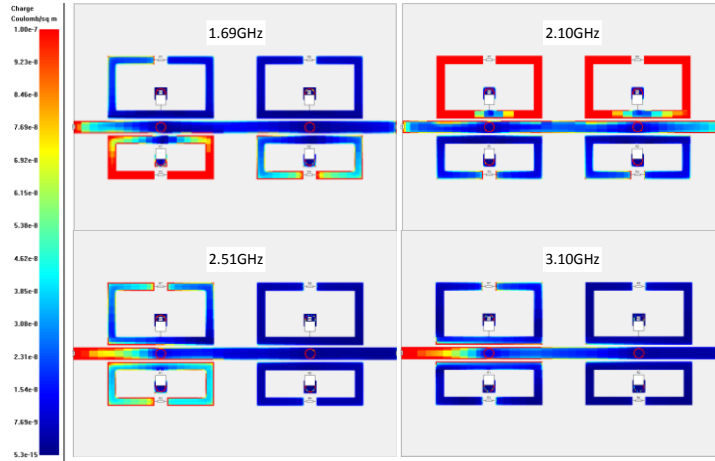
bandının merkez frekansı  $C_d$  ile kontrol edilirken dördüncü durdurma bandının merkez frekansı  $C_e$  ile kontrol edilmektedir. Benzer şekilde filtrenin ikinci ve üçüncü durdurma bandı besleme hattının alt kısmındaki çift modlu rezonatörler sayesinde olduğundan dolayı filtrenin ikinci durdurma bandının merkez frekansı  $C_a$  ile kontrol edilirken üçüncü durdurma bandının merkez frekansı  $C_b$  ile kontrol edilmektedir. Tasarlanan filtrenin her bir bandının merkez frekanslarındaki frekanslarda yüzeysel yük yoğunluğu dağılımı da Şekil 3.24'de gösterilmektedir.

### 3.3.1 Dört Bantlı Bant Geçiren Filtre Tasarımları

Topraklanmış bir iletim hattının her iki tarafına farklı elektriksel uzunluk veya kondansatör değerlerine sahip çift modlu rezonatörler yerleştirilerek dört bantlı bant geçiren filtre tasarımı yapılmaktadır. Tasarlanan dört bantlı bant geçiren filtre yapısı ve bu filtrenin hangi bandının hangi rezonatör tarafından oluşturulduğu Şekil 3.25'te gösterilmektedir. Filtrenin birinci ve dördüncü geçirme bandı besleme hattının üst kısmındaki çift modlu rezonatörler sayesinde olduğundan dolayı birinci geçirme bandının merkez frekansı  $C_d$  ile kontrol edilirken dördüncü geçirme bandının merkez frekansı  $C_e$  ile kontrol edilmektedir. Benzer şekilde filtrenin ikinci ve üçüncü geçirme bandı besleme hattının alt kısmındaki çift modlu rezonatörler sayesinde olduğundan dolayı filtrenin ikinci geçirme bandının merkez frekansı  $C_a$  ile kontrol edilirken üçüncü geçirme bandının merkez frekansı  $C_b$  ile kontrol edilmektedir. Tasarlanan filtrenin her bir bandının merkez frekanslarındaki frekanslarda yüzeysel yük yoğunluğu dağılımı da Şekil 3.26'da gösterilmektedir.



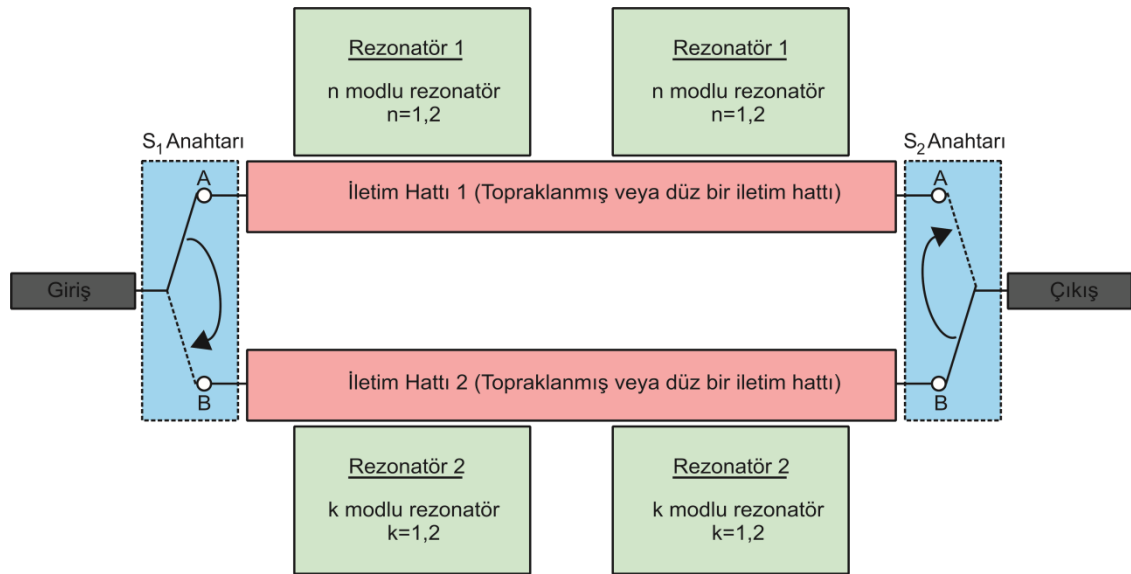
Şekil 3.25: (a) ÇMR kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant geçiren filtre yapısı ve (b) Dört bantlı bant geçiren filtre tasarımının aşamaları (filtre parametreleri:  $l_a=6.0\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_d=4.2\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ,  $d_r=4.0\text{mm}$ ,  $C_a=0.1\text{pF}$ ,  $C_b=8.2\text{pF}$ ,  $C_d=0.6\text{pF}$ ,  $C_e=4.8\text{pF}$ )



Şekil 3.26: ÇMR kullanılarak tasarlanan dört bantlı bant tutan filtre yapısının bant merkez frekanslarındaki yüzeyel yük yoğunluğunun konumsal dağılımı

## 4. ANAHTAR KULLANILARAK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR FİLTRE TASARIMLARI

3. bölümde tek ve çift modlu rezonatörler kullanılarak çok bantlı filtre tasarımları yapıldı. Rezonatörlerin düz bir iletim hattından beslenmesi durumunda, tasarlanan filtrenin bant tutan karakteristik sergilediği görüldü. Bunun yanısıra, rezonatörlerin topraklanmış bir iletim hattından beslenmesi durumunda, tasarlanan filtrenin bant geçiren karakteristik sergilediği görüldü. Besleme tiplerinin bu özelliklerden faydalanılarak ve anahtar kullanılarak farklı frekans cevapları arasında geçiş yapılabilmektedir. Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrenin genel şematik diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Buna ilaveten, tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrenin hangi durumda nasıl bir frekans cevabı sergileyeceği Tablo 4.1'de özetlenmektedir. Örneğin, Rezonatör 1 çift modlu rezonatör (ÇMR veya AÇMR), Rezonatör 2 tek modlu rezonatör, Besleme Hattı 1 topraklanmış bir iletim hattı ve Besleme Hattı 2 düz bir iletim hattı olsun. Bu durumda  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarının her ikisi de A konumunda olursa tasarlanan yapı iki bantlı bant geçiren filtre cevabı vermektedir.  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarının her ikisi de B konumunda olursa bir bantlı bant tutan filtre cevabı vermektedir.  $S_1$  anahtarı A/B ve  $S_2$  anahtarı B/A konumunda olursa tasarlanan yapı tüm durduran filtre cevabı vermektedir. Burada anahtarlama işlemi pin diyot, MEMS anahtar, sürgülü anahtar vb. kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu



Şekil 4.1: Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrelerin genel şematik diyagramı

Tablo 4.1: Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrenin farklı durumlarda verdiği frekans cevapları.

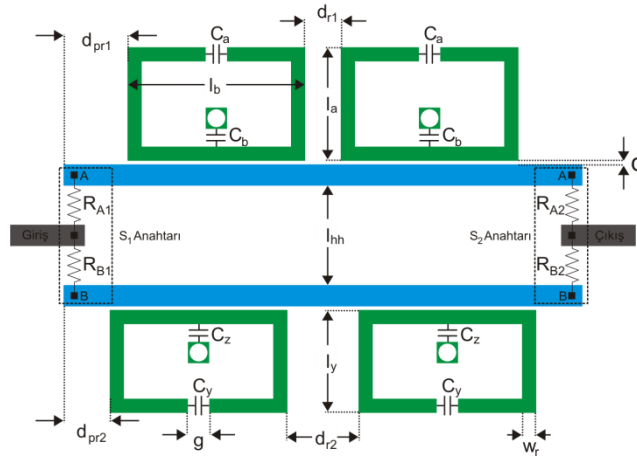
İletim Hattı 1	İletim Hattı 2	Rezonatör 1	Rezonatör 2	S <sub>1</sub> Anahtarı	S <sub>2</sub> Anahtarı	Filtre Cevabı
Topraklanmış iletim hattı	Topraklanmış iletim hattı	n modlu rezonatör	k modlu rezonatör	A	A	n bantlı bant geçiren filtre
				B	B	k bantlı bant geçiren filtre
				A/B	B/A	Tüm durduran filtre
Topraklanmış iletim hattı	Düz iletim hattı	n modlu rezonatör	k modlu rezonatör	A	A	n bantlı bant geçiren filtre
				B	B	k bantlı bant tutan filtre
				A/B	B/A	Tüm durduran filtre
Düz iletim hattı	Düz iletim hattı	n modlu rezonatör	k modlu rezonatör	A	A	n bantlı bant tutan filtre
				B	B	k bantlı bant tutan filtre
				A/B	B/A	Tüm durduran filtre

bölümde anlatılan anahtarlamalı devre tasarımlarında kullanılan anahtarlar iletim direnci  $0.1\Omega$  ve yalıtım direnci  $1M\Omega$  olan dirençlerle modellenmektedir. Bu bölümde verilen simülasyonlarda kullanılan bakır iletkenler kayıplıdır.

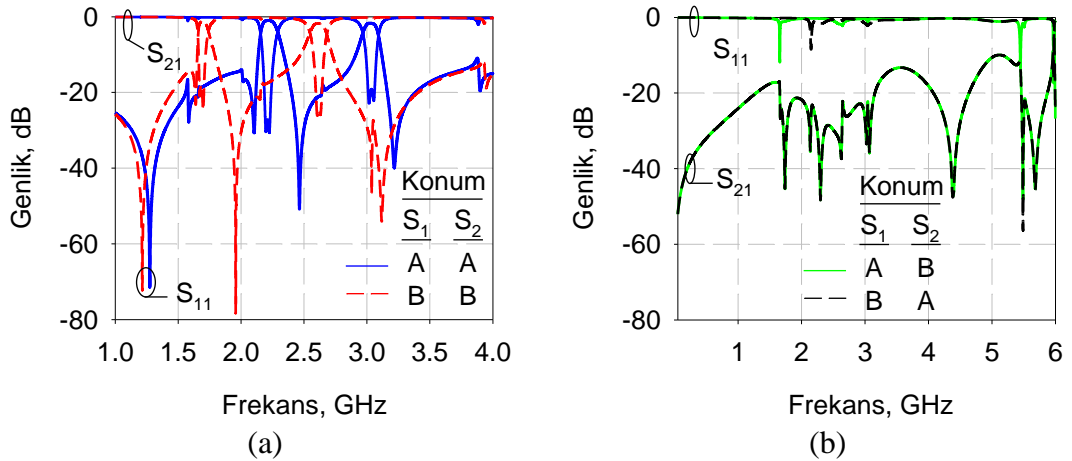
#### 4.1 Bant Tutan-Bant Tutan Geçişli Yeniden Yapılandırılabilir Filtre Tasarımları

Şekil 4.1'de, yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımlarının genel şematik diyagramı gösterildi. Tablo 4.1'de, tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrenin hangi durumda nasıl bir frekans cevabı vereceği özetlendi. Eğer İletim Hattı 1 ve İletim Hattı 2 düz bir iletim hattı ise, anahtar pozisyonunun değiştirilmesiyle tasarlanan yapının frekans cevabı bant tutan-bant tutan-tüm tutan geçişi yapabilmektedir. Tasarlanan bant tutan-bant tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtre yapısı Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrenin farklı anahtar pozisyonlarına göre frekans cevapları Şekil 4.3'de gösterilmektedir. Eğer S<sub>1</sub> ve S<sub>2</sub> ile temsil edilen anahtarlar A konumunda ise R<sub>A1</sub> ve R<sub>A2</sub> dirençleri R<sub>B1</sub> ve R<sub>B2</sub> dirençlerine göre nispeten daha düşük olacağından Rezonatör 1 ile temsil edilen rezonatörün rezonans frekanslarını merkez frekans

kabul eden iki tane tutma bandı elde edilir. Benzer şekilde anahtarlar B konumunda ise Rezonatör 2 ile temsil edilen rezonatörün rezonans frekanslarını merkez frekans kabul eden iki tane tutma bandı elde edilir. Bunlara ilaveten anahtarlar ters konumda ise giriş portundan çıkış portuna iletim seviyesi çok düşük olacağından tüm durduran bir filtre cevabı elde edilir. Dolayısıyla tek bir yapı sayesinde anahtar pozisyonuna göre üç farklı işlev gerçekleştirilebilmektedir. Şöyle ki, istenildiğinde  $f_1$  ve  $f_2$  merkez frekanslı bant tutan filtre, istenildiğinde  $f_3$  ve  $f_4$  merkez frekanslı bant tutan filtre, istenildiğinde ise tüm tutan filtre işlevi gerçekleştirilebilmektedir.

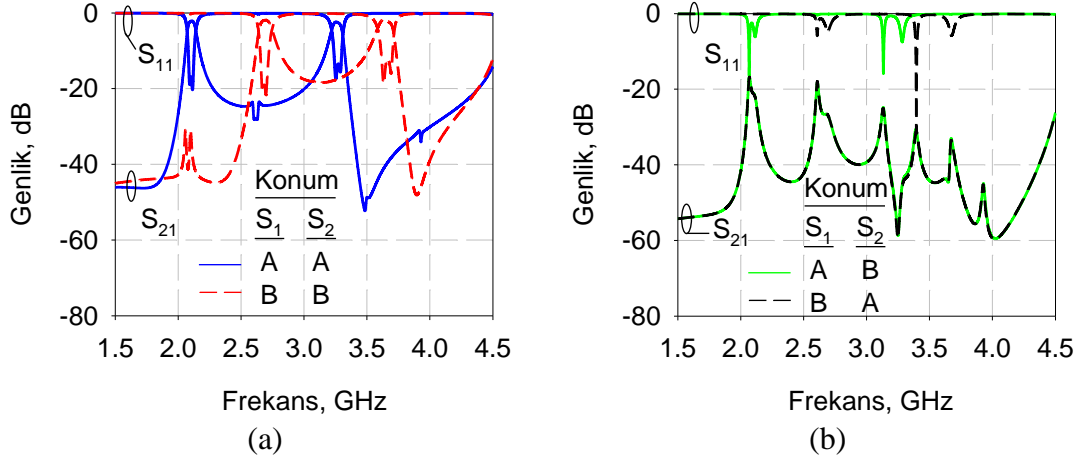


Şekil 4.2: Bant tutan-bant tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımı



Şekil 4.3: Tasarlanan bant tutan-bant tutan-tüm tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtrenin farklı anahtar pozisyonlarına göre frekans cevapları ( $l_a=4.2\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_y=4.2\text{mm}$ ,  $l_{hh}=4.0\text{mm}$ ,  $d_{r1}=2.0\text{mm}$ ,  $d_{r2}=1.0\text{mm}$ ,  $d_{pr1}=3.6\text{mm}$ ,  $d_{pr2}=4.1\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $C_a=0.6\text{pF}$ ,  $C_b=15.0\text{pF}$ ,  $C_y=0.2\text{pF}$ ,  $C_z=4.7\text{pF}$ )



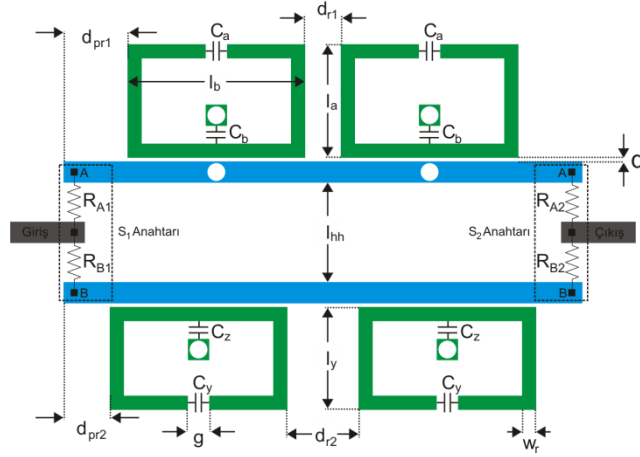


Şekil 4.5: Tasarlanan bant geçiren-bant geçiren-tüm tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtrenin farklı anahtar pozisyonlarına göre frekans cevapları ( $l_a=4.8\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_y=4.2\text{mm}$ ,  $l_{hh}=4.0\text{mm}$ ,  $d_{r1}=2.0\text{mm}$ ,  $d_{r2}=2.4\text{mm}$ ,  $d_{pr1}=2.6\text{mm}$ ,  $d_{pr2}=2.4\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $C_a=0.2\text{pF}$ ,  $C_b=2.8\text{pF}$ ,  $C_y=0.0\text{pF}$ ,  $C_z=2.0\text{pF}$ )

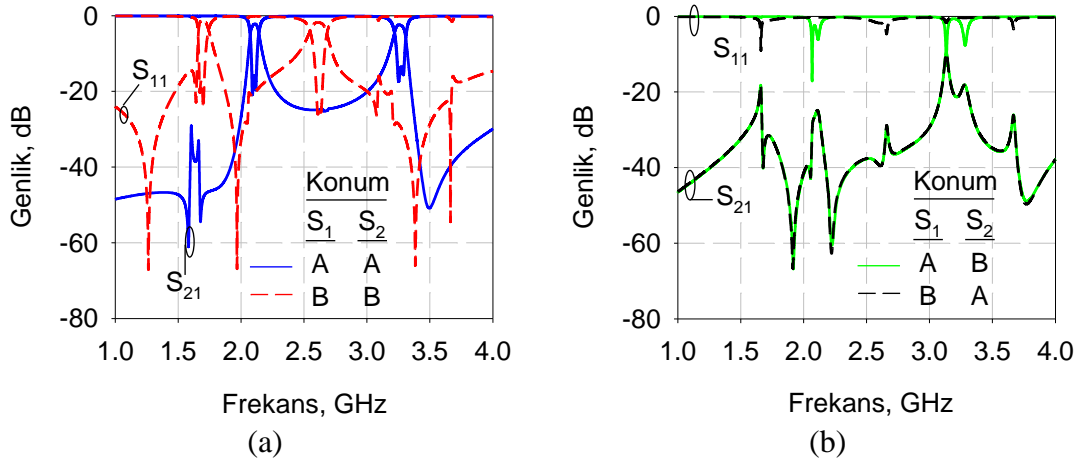
### 4.3 Bant Tutan-Bant Geçiren Geçişli Yeniden Yapılandırılabilir Filtre Tasarımları

Şekil 4.1'de gösterilen yeniden yapılandırılabilir filtrenin genel şematik diyagramındaki İletim Hattı 1'in topraklanmış bir iletim hattı ve İletim Hattı 2'nin düz bir iletim hattı olması durumunda bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımı yapılabilmektedir. Tasarlanan bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtre yapısı Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrenin farklı anahtar pozisyonlarına göre frekans cevapları Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Eğer anahtarlar A konumunda ise  $R_{A1}$  ve  $R_{A2}$  dirençleri  $R_{B1}$  ve  $R_{B2}$  dirençlerine göre nispeten daha düşük olacağından Rezonatör 1 ile temsil edilen rezonatörün rezonans frekanslarını merkez frekans kabul eden iki tane geçirme bandı elde edilir. Benzer şekilde anahtarlar B konumunda ise Rezonatör 2 ile temsil edilen rezonatörün rezonans frekanslarını merkez frekans kabul eden iki tane tutma bandı elde edilir. Bunlara ilaveten anahtarlar ters konumda ise giriş portundan çıkış portuna iletim seviyesi çok düşük olacağından tüm tutan bir filtre cevabı elde edilir. Dolayısıyla tek bir yapı sayesinde anahtar pozisyonuna göre üç farklı işlev gerçekleştirilebilmektedir. Şöyle ki, istenildiğinde  $f_1$  ve  $f_2$  merkez frekanslı bant geçiren filtre, istenildiğinde  $f_3$  ve  $f_4$  merkez frekanslı bant tutan filtre, istenildiğinde ise tüm durduran filtre işlevi gerçekleştirilebilmektedir.





Şekil 4.6: Bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımı

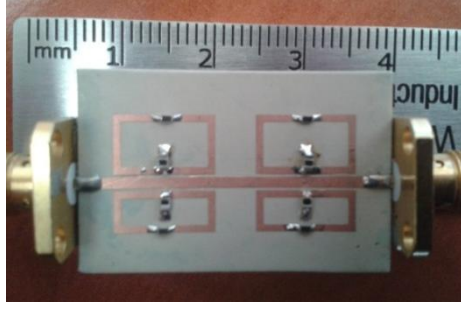


Şekil 4.7: Tasarlanan bant tutan-bant geçiren geçişli yeniden yapılandırılabilir filtrenin farklı anahtar pozisyonlarına göre frekans cevapları ( $l_a=4.8\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_y=4.2\text{mm}$ ,  $l_{hh}=4.0\text{mm}$ ,  $d_{r1}=2.0\text{mm}$ ,  $d_{r2}=2.0\text{mm}$ ,  $d_{pr1}=2.6\text{mm}$ ,  $d_{pr2}=2.6\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $C_a=0.2\text{pF}$ ,  $C_b=2.8\text{pF}$ ,  $C_y=0.6\text{pF}$ ,  $C_z=15.0\text{pF}$ )

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Önceki bölümlerde tam dalga elektromanyetik simülasyon kullanılarak çok bantlı filtre ve yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımları yapıldı. Bu bölümde ise dört bantlı bant tutan filtre ile bant tutan-bant geçiren-tüm tutan dönüşümlü filtre imal edilmektedir. İmal edilen filtrelerde taban malzeme olarak bağıl dielektrik geçirgenliği 10.2, kalınlığı 1.27mm ve kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) 0.0023 olan RT/Duroid kullanılmaktadır. Giriş çıkış portları 50  $\Omega$ 'dur. Saçılma parametrelerinin ölçümünde ise AGILENT E5071C Network Analizör kullanılmaktadır. Bu bölümde verilen simülasyonlarda kullanılan bakır iletkenler kayıplıdır.

İmal edilen dört bantlı bant tutan filtrenin fotoğrafı Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Ayrıca imal edilen filtrenin network analizör ile yapılan ölçümüne dair bir fotoğraf da Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Filtre parametreleri:  $l_a=4.6\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_d=6.3\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $d_{pr}=0.2\text{mm}$ ,  $d_r=4.0\text{mm}$ ,  $C_a=0.8\text{pF}$ ,  $C_b=2.7\text{pF}$ ,  $C_d=0.2\text{pF}$ ,  $C_e=4.7\text{pF}$ 'dir. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırması ise Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Bu karşılaştırmadan gözlenmektedir ki, ölçüm ve simülasyon sonuçları büyük ölçüde uyum içinde olup dört bantlı bant tutan bir filtre cevabı elde edilmektedir. Literatürdeki mevcut çok bantlı bant tutan filtrelerde gözlenen en büyük problemlerden birisi harmoniğin son banda çok yakın olmasıdır. Bu çalışmada imal edilen dört bantlı bant tutan filtrede dördüncü bandın harmoniğe uzaklığı yaklaşık olarak 2GHz olup bahsedilen problemin çözümü açısından önemli derecede avatajlıdır. Literatürde gözlenen bir diğer problem ise bantların seçiciliğinin düşük olması ve son bandın filtreleme karakteristiğinin istenilen şekilde elde edilememesidir. Bu çalışmada imal edilen dört bantlı bant tutan filtrenin her bir bandının her iki tarafında yansıma sıfırı(iletim kutbu) ve her bir bandının içinde iki tane iletim sıfırı(yansıma kutbu) bulunmaktadır. Dolayısıyla imal edilen filtrenin bant içi ve bant dışı seçiciliği de yüksektir. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarına dair sayısal değerler de Tablo 5.1'de verilmektedir.

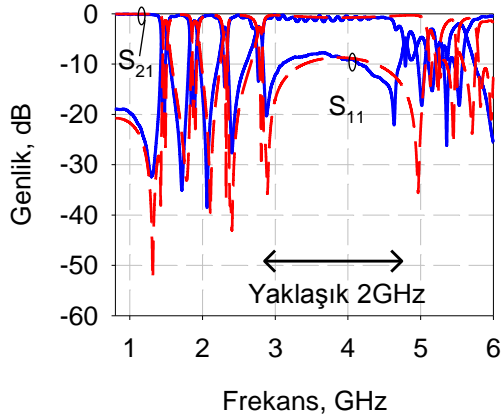


(a)

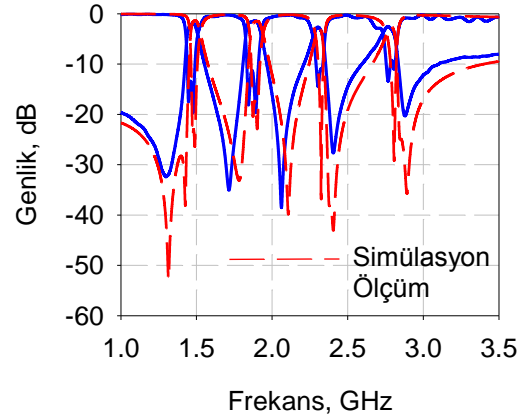


(b)

Şekil 5.1: İmal edilen dört bantlı bant tutan filtrenin (a) fotoğrafı ve (b) network analizör ile yapılan ölçümüne dair bir fotoğraf



(a)



(b)

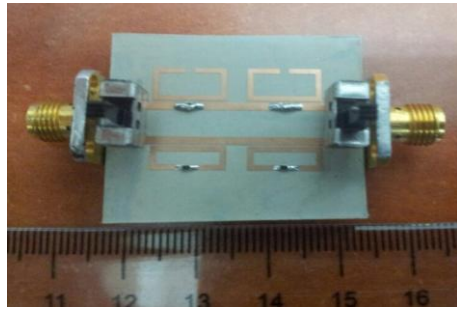
Şekil 5.2: Dört bant bant tutan filtrenin ölçüm ve simülasyon sonuçları a) geniş bant ve b) dar bant

Tablo 5.1: Dört bantlı bant tutan filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarına dair sayısal değerler.

Durdurma bantları	Simülasyon				Ölçüm			
	$f_c$ (GHz)	IL(dB)	RL(dB)	BW(MHz)	$f_c$ (GHz)	IL(dB)	RL(dB)	BW(MHz)
1.	1.48	<-23.00	1.33	67.5	1.46	<-13.41	1.88	74.75
2.	1.89	<-17.36	1.45	85.5	1.87	<-11.29	1.40	110.00
3.	2.33	-36.68	2.92	54.0	2.32	<-10.93	2.65	74.75
4.	2.81	-29.11	2.64	65.0	2.78	<-9.60	2.53	91.00

İmal edilen tek bantlı bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin fotoğrafı Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Ayrıca imal edilen filtrenin network analizör ile yapılan ölçümüne dair bir fotoğraf da Şekil 5.3'de gösterilmektedir. İmal edilen filtrede sürgülü mekanik anahtar kullanılmaktadır. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırması ise Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Bu grafiklerden gözlenmektedir ki, imal edilen filtre anahtarların pozisyonuna göre bant geçiren, bant tutan veya tüm tutan olmak üzere üç farklı frekans cevabı verebilmektedir. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarına dair sayısal değerler de Tablo 5.2'de verilmektedir. Filtre

parametreleri:  $l_a=5.0\text{mm}$ ,  $l_b=10.0\text{mm}$ ,  $l_y=3.5\text{mm}$ ,  $l_{hh}=4.0\text{mm}$ ,  $d_{r1}=2.8\text{mm}$ ,  $d_{r2}=2.8\text{mm}$ ,  $d_{pr1}=2.6\text{mm}$ ,  $d_{pr2}=2.6\text{mm}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $g=1.2\text{mm}$ ,  $w_r=0.8\text{mm}$ ,  $C_a=0.0\text{pF}$ ,  $C_y=0.6\text{pF}$ 'dir.

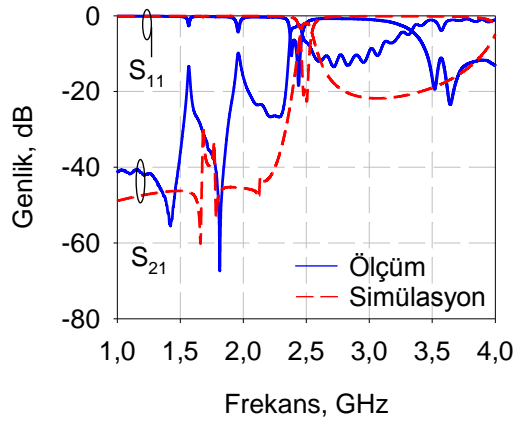


(a)

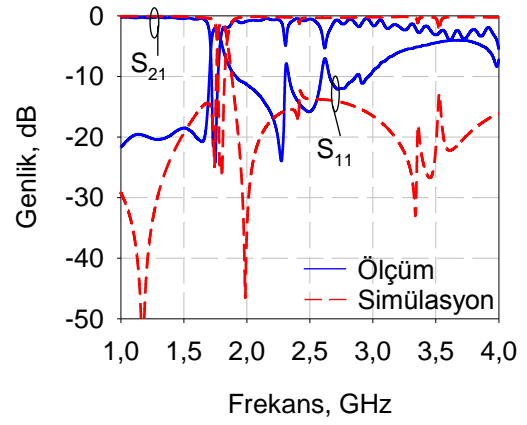


(b)

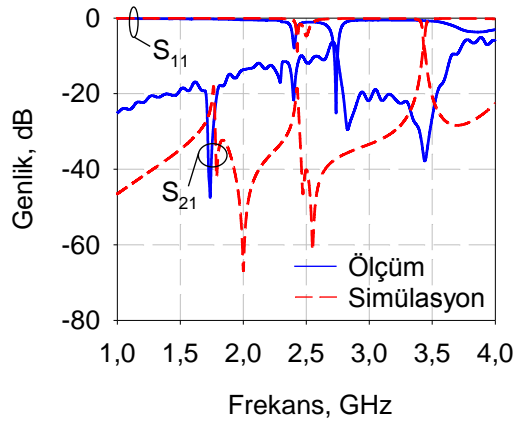
Şekil 5.3: İmal edilen tek bantlı bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin (a) fotoğrafı ve (b) network analizör ile yapılan ölçümüne dair bir fotoğraf



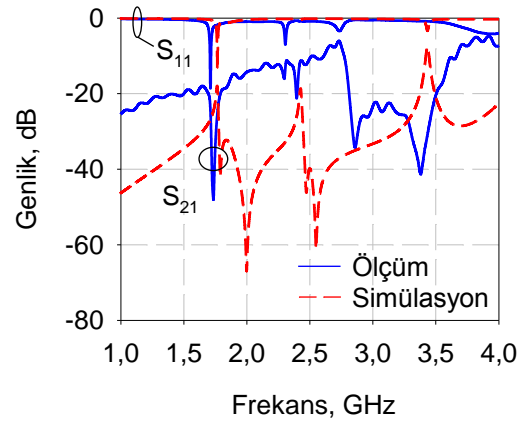
(a)



(b)



(c)



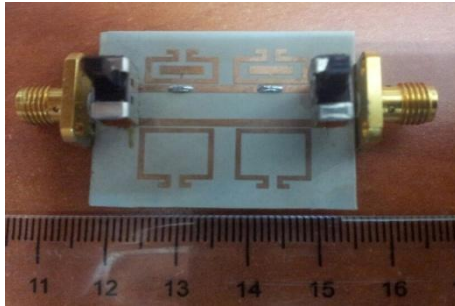
(d)

Şekil 5.4: Bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırması (a)  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları: A konumunda, (b)  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları: B konumunda (c)  $S_1$  anahtarı: A konumunda,  $S_2$  anahtarı: B konumunda ve (d)  $S_1$  anahtarı: B konumunda,  $S_2$  anahtarı: A konumunda

Tablo 5.2: Bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarına dair bazı sayısal değerler.

Anahtar konumu		Karakteristik	Simülasyon				ölçüm			
S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>		f <sub>c</sub> (GHz)	IL(dB)	RL(dB)	BW(MHz)	f <sub>c</sub> (GHz)	IL(dB)	RL(dB)	BW(MHz)
A	A	Bant geçiren	2.49	1.93	<-19.60	95.00	2.40	2.32	<-6.45	94.25
B	B	Bant tutan	1.79	<-23.03	1.23	78.00	1.74	<-21.04	1.93	78.00

İmal edilen çift bantlı bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin fotoğrafı Şekil 5.5'de gösterilmektedir. Bu yapıda Karpuz ve diğ.(Karpuz ve diğ. 2014) tarafından önerilen çift modlu rezonatör kullanılmaktadır. Ayrıca imal edilen filtrenin network analizör ile yapılan ölçümüne dair bir fotoğraf da Şekil 5.5'de gösterilmektedir. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırması ise Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Bu karşılaştırmadan gözlenmektedir ki, imal edilen filtre anahtarların pozisyonuna göre bant geçiren, bant tutan veya tüm tutan olmak üzere üç farklı frekans cevabı verebilmektedir. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarına dair sayısal değerler de Tablo 5.3'de verilmektedir.

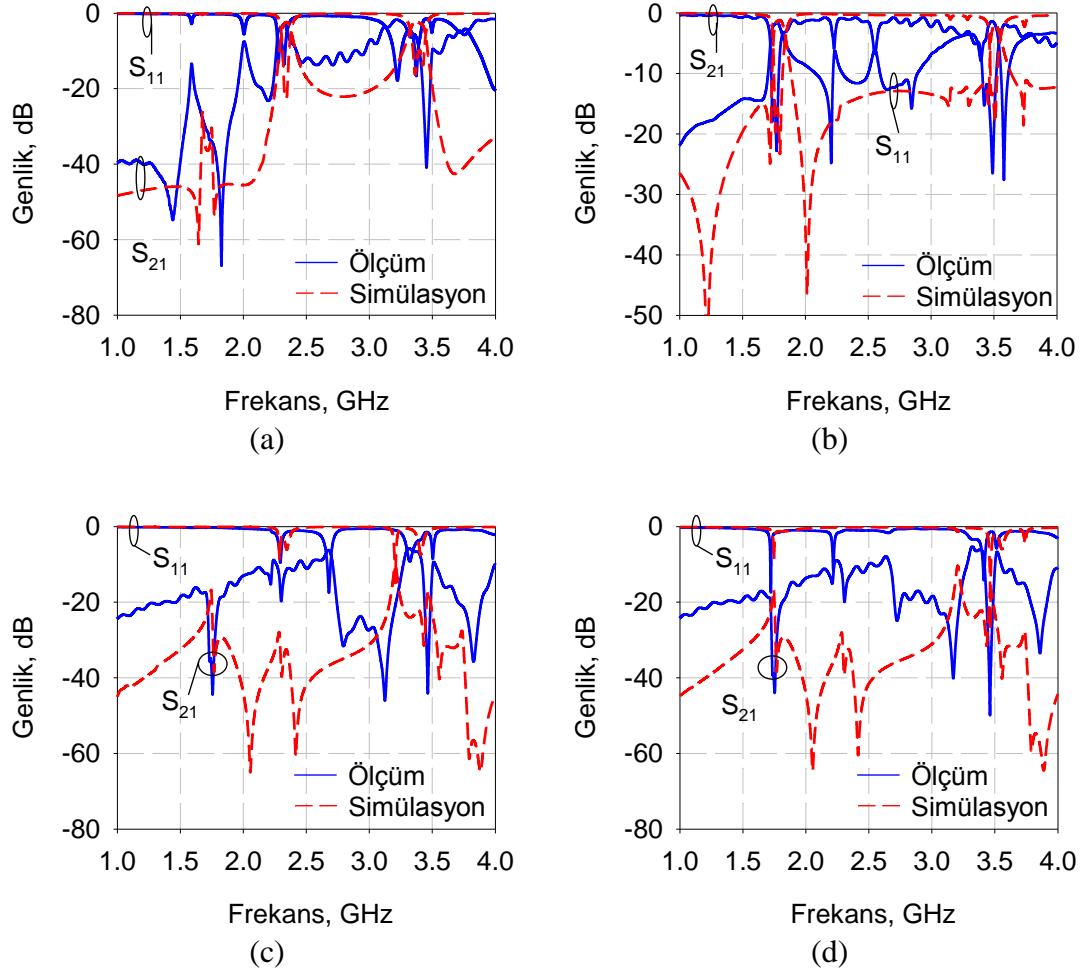


(a)



(b)

Şekil 5.5: (a) İmal edilen bant tutan-bant geçiren-tüm durduran geçişli filtrenin fotoğrafı ve (b) imal edilen bant tutan-bant geçiren-tüm durduran geçişli filtrenin network analizör ile yapılan ölçümüne dair bir fotoğraf



Şekil 5.6: Bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırması (a)  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları: A konumunda, (b)  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları: B konumunda (c)  $S_1$  anahtarı: A konumunda,  $S_2$  anahtarı: B konumunda ve (d)  $S_1$  anahtarı: B konumunda,  $S_2$  anahtarı: A konumunda

Tablo 5.3: Bant tutan-bant geçiren-tüm tutan geçişli filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarına dair bazı sayısal değerler.

Anahtar konumu		Karakteristik		Simülasyon				Ölçüm				
$S_1$	$S_2$			$f_c$ (GHz)	IL(dB)	RL(dB)	BW(MHz)	$f_c$ (GHz)	IL(dB)	RL(dB)	BW(MHz)	
A	A	Bant geçiren	Geçirme bantları	1.	2.33	2.38	<-21.30	77	2.29	2.82	<-7.66	75.51
				2.	3.40	2.21	<-9.90	121	3.30	1.60	<-4.90	260.16
B	B	Bant tutan	Durdurma bantları	1.	1.78	<-15.74	1.20	98	1.75	<-14.42	1.97	93.66
				2.	3.49	<-13.28	1.99	84	3.45	<-11.84	1.43	145.70

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tezde ilk aşamada iki farklı çift modlu rezonatör tasarlanmış ve tasarlanan rezonatörlerin karakteristik özellikleri çıkarılmıştır. Rezonatörlerin karakteristik özellikleri çıkarılırken iki farklı besleme tipi kullanılmıştır. İlk besleme tipinde rezonatörler düz bir iletim hattından beslenmiş, ikinci besleme tipinde ise rezonatörler topraklanmış bir iletim hattından beslenmiştir. İlk besleme tipinin bant tutan filtre tasarımına ikinci besleme tipinin de bant geçiren filtre tasarımına ışık tuttuğu görülmüştür. Buna ilaveten tasarlanan çift modlu rezonatörlerin metamalzeme davranışı gösterebildiği görülmüştür. Çift modlu rezonatörlerin tasarımının başlangıç aşamasını geleneksel açık halka rezonatör oluşturmaktır. Geleneksel açık halka rezonatör tek modlu rezonatördür. Geleneksel açık halka rezonatörün dikey simetri eksenini üzerindeki noktası ile toprak arasına kondansatör yerleştirilerek geleneksel açık halka rezonatörün temel rezonans frekansının harmonik frekansı bireysel olarak kontrol edilmiştir. Ayrıca geleneksel açık halka rezonatörün açık uçları arasına da kondansatör yerleştirilerek temel rezonans frekansı bireysel olarak kontrol edilmiştir. Böylelikle çift modlu rezonatör tasarlanmıştır. Diğer çift modlu rezonatör tasarlanırken ilk olarak geleneksel açık halka rezonatörün dikey simetri eksenini üzerindeki noktası topraklanmıştır. Bu topraklama işlemi temel rezonans frekansının harmonik frekansını temel rezonans frekansı civarına çekmiş ve böylelikle rezonatörün çift modlu olması sağlanmıştır. Fakat rezonatör bu haldeyken rezonatörün her bir modu bireysel olarak kontrol edilememektedir. Rezonatörün her bir modunu bireysel olarak kontrol edebilmek için öncelikli olarak rezonatörün dikey simetri eksenine göre simetrik olacak şekilde rezonatör üzerindeki iki nokta bir iletim hattı (iç bağ) aracılığıyla birleştirilmiştir. Bu iç bağın rezonatör üzerindeki hareketi sayesinde rezonatörün modlarının birbirine yaklaştırılması/uzaklaştırılması sağlanmıştır. Daha sonra iç bağın orta noktası ile toprak arasına kondansatör yerleştirilmiştir. Bu kondansatör rezonatörün birinci modunun(even mod) bireysel olarak kontrolünü sağlamıştır. Buna ilaveten rezonatörün açık uçları arasına da kondansatör yerleştirilmiştir. Bu kondansatör de rezonatörün ikinci modunun(odd mod) bireysel olarak kontrolünü sağlamıştır. Buraya kadar olan işlemlerde tam dalga elektromanyetik simülatör kullanılmıştır. Daha sonra rezonatörlerin her iki beslenme

durumuna ilişkin eşdeğer devreler çıkarılmıştır. Bu eşdeğer devrelere tek-çift mod analizi uygulanarak iletim( $S_{21}$ ) ve yansıma( $S_{11}$ ) katsayılarının ifadeleri türetilmiştir. Türetilen bu ifadeler MATHCAD programında yazılıp grafik çıktıları elde edilmiş ve bu grafik çıktıları simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda simülasyon sonuçları ile teorik sonuçların büyük ölçüde tutarlı olduğu görülmüştür. Çift modlu rezonatörlerin karakteristik özellikleri çıkarıldıktan sonra çift modlu rezonatör kullanılarak çok bantlı filtre tasarımları yapılmıştır. Besleme hattının düz bir iletim hattı olması durumunda bant tutan filtre karakteristiği elde edilirken topraklanmış bir iletim hattı olması durumunda bant geçiren filtre karakteristiği elde edilmiştir. Filtre parametrelerinin filtrenin iletim ve yansıma katsayıları üzerine etkileri incelenmiştir. Tasarlanan filtre yapılarının yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımı için uygun olduğu görülmüş ve yeniden yapılandırılabilir filtreler tasarlanmıştır. Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrelere ilişkin genel bir şematik diyagram verilmiştir. Daha sonra; kullanılan besleme tipi, kullanılan rezonatörün mod sayısı ve anahtar pozisyonuna göre yeniden yapılandırılabilir filtrenin nasıl bir frekans cevabı vereceği bir tablo şeklinde verilmiştir. Tasarlanan filtrelerden dört bantlı bant tutan filtre ve bant tutan-bant geçiren dönüşümlü filtre imal edilmiştir. İmal edilen filtrelerde taban malzeme olarak bağıl dielektrik geçirgenliği 10.2, kalınlığı 1.27mm ve kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) 0.0023 olan RT/Duroid kullanılmıştır. İmal edilen bu filtrelerin ölçüm sonuçlarıyla simülasyon sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Bu tezde tasarlanan çift modlu rezonatörler farklı mikrodalga filtre tasarımlarında kullanılabilir. Ayrıca tasarlanan çift modlu rezonatörler farklı filtre tasarımlarının yanı sıra sensör, anten vb. gibi farklı mikrodalga alt bileşenlerin tasarımında da kullanılabilir. Buna ilaveten, bu tezde tasarlanan yeniden yapılandırılabilir filtrelerin genel şematik diyagramı ileride yapılacak tasarımlara yol gösterici niteliktedir. Şöyle ki; farklı mod sayısına sahip rezonatörler tasarlanılarak bu genel şematik diyagram ve Tablo 1 sayesinde çeşitli frekans cevaplarına dönüşebilen yeniden yapılandırılabilir filtre tasarımları yapılabilir.



## 7. KAYNAKLAR

Liu, H., Fan, Y., Zhang, Z., Zhao, Y., Xu, W., Guan, X., Sun, L. and He, Y., "Dual-Band Superconducting Bandpass Filter Using Embedded Split Ring Resonator", *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 23 (3), (2013).

Talisa, S. H., Janocko, M. A., Moskowitz, C., Talvacchio, J., Billing, J. F., Brown, R., Buck, D., Jones, C. K., McAvoy, B. R., Wagner, G. R. and Watt, D. H., "Low- and high-temperature superconducting microwave filters", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 39 (9), 1448-1454, (1991).

Kang K-Y, Lee S. Y., Han S. K. and Ahn D., "Microwave multipole lowpass and bandpass filters fabricated by high-T<sub>c</sub> superconducting thin films", *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 5 (2), 2671-2674, (1995).

Liu, H., Lei, J., Zhan, X., Guan, X., Ji, L. and Zhewang Ma, " Compact quad-band superconducting metamaterial filter based on split ring resonator", *Applied Physics Letters*, 104 (22), (2014).

Liu, J.-C., Wang, J.-W., Zeng, B.-H. and Chang, D.-C., "CPW-Fed Dual-Mode Double-Square-Ring Resonators for Quad-Band Filters", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 20 (3), 142-144, (2010).

Chen, C.-F., "Design of a Compact Microstrip Quint-Band Filter Based on the Tri-Mode Stub-Loaded Stepped-Impedance Resonators", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 22 (7), 357-359, (2012).

Gorur, A. K., Karpuz, C., Ozek, A. and Emur, M., "Metamaterial based dual-band bandpass filter design for WLAN/WiMAX applications", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 56, 2211–2214, (2014).

Karpuz, C. and Gorur, A. K., "A novel compact configuration for dual-mode microstrip resonators and dual-band bandpass filter applications", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 55, 775–779, (2013).

Liu, H., Lei, J., Zhao, Y., Li, S. and Guan, X., "Compact triple-band bandpass filter using multimode stubs loaded resonator", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 55, 2672–2675, (2013).

Weng, M.-H., Ye, C.-S., Su, Y.-K. and Lan, S.-W., "A new compact quad-band bandpass filter using quad-mode stub loaded resonator", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 56, 1630–1632, (2014).

Tsou, M.-J. and Tu, W.-H., "Multi-transmission-zero quad-band bandpass filter based on quad-mode resonator", *Microwave Conference Proceedings (APMC)*, 5-8 Dec 2011 Asia-Pacific , 147-150, (2011).

Hong, J.-S., Shaman, H. and Chun Y.-H., "Dual-Mode Microstrip Open-Loop Resonators and Filters," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , 55 (8), 1764-1770, (2007).

Athukorala, L. and Budimir, D., "Compact Dual-Mode Open Loop Microstrip Resonators and Filters," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 19 (11), 698-700, (2009).

Doan, M. T., Che, W. and Nguyen, P. L., "Tri-band bandpass filter using dual-mode resonators," *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2012 International Conference on* , 187-190, (2012).

Xu, J., Miao, C., Cui, L., Ji, Y.-X. and Wu, W., "Compact high isolation quad-band bandpass filter using quad-mode resonator," *Electronics Letters* , 48 (1), 28-30, (2012).

Chen, H., "High isolation tri-band BPF using tri-mode resonator", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 55, 1367–1370, (2013).

Liu, H., Wang, X., Wang, Y., Li, S., Zhao, Y. and Guan, X., "Quad-Band Bandpass Filter Using Quad-Mode Stub-loaded Resonators", *ETRI Journal*, 36 (4), 690-693, (2014).

Wei, F., Huang, Q. L., Li, W.-T. and Shi, X.-W., "A compact quad-band band-pass filter using novel stub-loaded SIR structure", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 56, 538–542, (2014).

Wu, J.-Y. and Tu, W.-H., "Design of quad-band bandpass filter with multiple transmission zeros," *Electronics Letters* , 47 (8), 502-503, (2011).

Zhang, X. Y., Xue Q. and Hu, B. J., "Planar Tri-Band Bandpass Filter With Compact Size", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 20 (5), 262-264, (2010).

Chen, F.C., Chu, Q.X. and Tu, Z.-H., "Tri-band bandpass filter using stub loaded resonators", *Electronics Letters* , 44 (12), 747-749, (2008).

Zhu, Y., Liu, B., Cheng, J., Jin, J., Zhang, B. and Tian, X., "Dual-band band pass filter using stub-loaded open-loop resonators with wide controllable bandwidths", *Int J RF and Microwave Comp Aid Eng*, 24, 367–374, (2014).

Koh, W. T. and Lum, K. M., " Dual-band Band Pass Filter Design Using Stub Loaded Resonators", *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Moscow, Russia, (2012).

Chen, F.-C. and Qiu, J. M., " Dual-Band Bandpass Filter with Controllable Characteristics Using Stub-Loaded Resonators", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 28, 45-51, (2012).

Zhang, X. Y., Chen, J.-X., Xue, Q. and Li, S.-M., "Dual-Band Bandpass Filters Using Stub-Loaded Resonators", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 17 (8), 583-585, (2007).

Mondal, P. and Mandal, M.K., "Design of Dual-Band Bandpass Filters Using Stub-Loaded Open-Loop Resonators", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , 56 (1), 150-155, (2008).

Wu, H.-W. and Yang, R.-Y., "A New Quad-Band Bandpass Filter Using Asymmetric Stepped Impedance Resonators", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 21 (4), 203-205, (2011).

Chu, Q.-X. and Chen, F.-C., "A Compact Dual-Band Bandpass Filter Using Meandering Stepped Impedance Resonators", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 18 (5), 320-322, (2008).

Mashhadi, M. and Komjani, N., "Design of dual-band bandpass filter with improved upper stopband using novel stepped-impedance resonator", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 56, 603–606, (2014).

Chu, Q.-X. and Lin, X.-M., "Advanced triple-band bandpass filter using tri-section SIR", *Electronics Letters* , 44 (4), 295-296, (2008).

Deng, H.-W., Zhao, Y.-J., Zhang, X.-S., Chen, W. and Wang, J.-K., "Compact and high selectivity dual-band dual-mode microstrip BPF with

single stepped-impedance resonator", *Electronics Letters* , 47 (5), 326-327,(2011).

Wu, B., Liang, C.-H., Qin, P.-Y. and Li, Q., "Compact Dual-Band Filter Using Defected Stepped Impedance Resonator", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 18 (10), 674-676, (2008).

Lee, C.-H., Hsu, C.-I.G. and Jhuang, H.-K., "Design of a New Tri-Band Microstrip BPF Using Combined Quarter-Wavelength SIRs", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 16 (11), 594-596, (2006).

Choi, J.-W., Jeon, I.-S., Cho, Y.-H., Wang, X.-G. and Yun, S.-W., "Design of the wide stopband dual-band bandpass filter using stepped-impedance resonators with complex coupled line", *Microwave Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International* , 1-4, (2013).

Liu, H., Lei, J., Zhao, Y., Xu, W., Fan, Y. and Wu, T., "Tri-band Microstrip Bandpass Filter Using Dual-Mode Stepped-Impedance Resonator", *ETRI Journal*, 35 (2), 344-347, (2013).

Kim, C. H. and Chang, K., "Independently Controllable Dual-Band Bandpass Filters Using Asymmetric Stepped-Impedance Resonators", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , 59 (12), 3037-3047, (2011).

Wu, Y.-L., Liao, C., Xiong, X.-Z. and Zhou, H.-J., "Miniature dual-mode dual-band bandpass filter with improved passbands performance for 2.4/5.2 GHz WLAN application", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 56, 1235–1238, (2014).

Chen, W.-Y., Su, Y.-H., Kuan, H. and Chang, S.-J., "Simple method to design a tri-band bandpass filter using asymmetric SIRs for GSM, WIMAX, and WLAN applications", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 53, 1573–1576, (2011).

Hsu, C.-I.G., Lee, C.-H. and Hsieh, Y.-H., "Tri-Band Bandpass Filter With Sharp Passband Skirts Designed Using Tri-Section SIRs", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 18 (1), 19-21, (2008).

Velazquez-Ahumada, M. D. C., Martel-Villagran, J., Medina, F. and Mesa, F., "Application of stub loaded folded stepped impedance resonators to dual band filters", *Progress In Electromagnetics Research*, 102, 107-124, (2010).

Zhang, Y.P. and Sun, M., "Dual-Band Microstrip Bandpass Filter Using Stepped-Impedance Resonators With New Coupling Schemes", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , 54 (10), 3779-3785, (2006).

Liu, W.-P. and Tung, Y.-W., "Tri-band filter with partly combined stepped-impedance resonators", *Microwave Conference Proceedings (APMC)*, 2011 Asia-Pacific, 975-978, (2011).

Ghatak, R., Pal, M., Sarkar, P., Aditya, A.K. and Poddar, D.R., "Tri-band bandpass filter with transmission zeros between each band using a combination of dual step and tri-step SIR", *Applied Electromagnetics Conference (AEMC), 2011 IEEE*, 1-4, (2011).

Li, J., Huang, S. S. and Zhao J. Z., " Design of a Compact and High Selectivity Tri-Band Bandpass Filter Using Asymmetric Stepped-Impedance Resonators (SIRS)", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 44, 81-86, (2014).

Wu, H.-W., Chen, Y.-F. and Chen, Y.-W., "Multi-Layered Dual-Band Bandpass Filter Using Stub-Loaded Stepped-Impedance and Uniform-Impedance Resonators", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 22 (3), 114-116, (2012).

Hsu, K.-W. and Tu, W.-H., "Design of a novel four-band microstrip bandpass filter using double-layered substrate," *Microwave Symposium Digest, 2009. MTT '09. IEEE MTT-S International*, 1041-1044, (2009).

Weng, R.-M. and Hsiao, P.-Y., "Double-Layered Quad-Band Bandpass Filter for Multi-Band Wireless Systems", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 23, 2153-2161, (2009).

Rebenaque, D. C., García, J. P., Pereira, F. Q., Tornero, J. L. G. and Melcon, A.A. "Novel Implementation of Transversal Filters in Multilayered Microstrip Technology", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 24, 1241-1253, (2010).

Karpuz, C., Emür, M., Özek, A. and Görür A. K., " Açık Halka Rezonatörler Kullanılarak Üç Bantlı Mikroşerit Bant Durduran Filtre Tasarımı," *Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, (2014).

Adhikari, K. K. and Kim, N. Y., "A miniaturized quad-band bandstop filter with high selectivity based on shunt-connected, T-shaped stub-loaded, stepped-impedance resonators", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 57, 1129–1132, (2015).

Karpuz, C., Gorur, A., Gorur, A.K. and Ozek, A., "A novel compact quad-band microstrip bandstop filter design using open-circuited stubs", *Microwave Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International*, 1-3, (2013).

Xiao, J.-K., Zu, X.-P., Huang, H.-F. and Dai, W.-L., "Multi-mode bandstop filter using defected equilateral triangular patch resonator", *Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), 2010 9th International Symposium on*, 1252-1255, (2010).

Wu, H.-W., Chen, Y.-F. and Chen, Y.-W., "A Compact Quad-Band Bandstop Filter Using Dual-Plane Defected Structures and Open-Loop Resonators.", *IEICE Electronic Express Letters*, 9 (21), 1630-1636, (2012).

Huang, X.D. and Cheng, C.H., "Microstrip Bandstop Filter Using E-shaped Dual Mode Resonator," *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Xi'an, China, (2010).

Jia, D.-H., Feng, Q., Huang, X.-G. and Xiang, Q.-Y., "A Dual-Band Bandpass Filter With A Tunable Passband", *Progress In Electromagnetics Research C*, 37, 107-118, (2013).

Nath, J., Ghosh, D., Maria, J.-P., Kingon, A. I., Fathelbab, W., Franzon, P.D. and Steer, M.B., "An Electronically Tunable Microstrip Bandpass Filter Using Thin-Film Barium-Strontium-Titanate (BST) Varactors", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 53 (9), 2707-2712, (2005).

Chaudhary, G., Jeong, Y. and Lim, J., "Dual-Band Bandpass Filter With Independently Tunable Center Frequencies and Bandwidths", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 61 (1), 107-116, (2013).

Tang, W. and Hong, J.-S., "Varactor-Tuned Dual-Mode Bandpass Filters", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 58 (8), 2213-2219, (2010).

Zhang, L., Wang, X.-H., Wang, Z.-D., Bai, Y.-F. and Shi, X.-W., "Compact electronically tunable microstrip dual-band filter using stub-loaded SIRs", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 28 (1), 39-48, (2014).

Chen, C.-F., "A Compact Reconfigurable Microstrip Dual-Band Filter Using Varactor-Tuned Stub-Loaded Stepped-Impedance Resonators," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 23 (1), 16-18, (2013).

Zhang, H., Chen, K.J., "A Microstrip Bandpass Filter with an Electronically Reconfigurable Transmission Zero," *Microwave Conference, 2006. 36th European* , 653-656, (2006).

Al Mutairi, M.R., Sheta, A.F., AlKanhil, M.A., "A Novel Reconfigurable Dual-Mode Microstrip Meander Loop Filter", *Microwave Conference, 2008. EuMC 2008. 38th European* , 51-54, (2008).

Karim, M.F., Liu, A.Q., Alphones, A. and Yu, A.B., "A Novel Reconfigurable Filter Using Periodic Structures," *Microwave Symposium Digest, 2006. IEEE MTT-S International* , 943-946, (2006).

Chen, Y.-M, Chang, S.-F., Chou, C.Y. and Liu, K.H., "A Reconfigurable Bandpass-Bandstop Filter Based On Varactor-Loaded Closed-Ring Resonators", *Microwave Magazine, IEEE* , 10 (1), 138-140, (2009).

Chun, Y.-H and Hong, J.-S., "Electronically Reconfigurable Dual-Mode Microstrip Open-Loop Resonator Filter", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 18 (7), 449-451, (2008).

Karim, M.F., Guo, Y.-X., Chen, Z.N. and Ong, L.C., "Miniaturized Reconfigurable and Switchable Filter from UWB to 2.4 GHz WLAN using PIN Diodes," *Microwave Symposium Digest, 2009. MTT '09. IEEE MTT-S International* , 509-512, (2009).

Karim, M.F., Guo, Y.-X., Chen, Z.N., Ong, L.C., "Miniaturized Reconfigurable Filter using PIN Diode for UWB applications," *Microwave Symposium Digest, 2008 IEEE MTT-S International* , 1031-1034, (2008).

Zhao, K.-Y., Li, L., Wu, Q.-H., Xu, W. and Wang, Y.-M. " Reconfigurable Bandstop Filter with Adjustable Bandwidth and Center Frequency", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 35, 125-133, (2012).

Gomez-Garcia, R. and Guyette, A.C., "Reconfigurable Multi-Band Microwave Filters", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , 63 (4), 1294-1307, (2015).

Cho, Y.-H., Rebeiz, G.M., "Two- and Four-Pole Tunable 0.7–1.1-GHz Bandpass-to-Bandstop Filters With Bandwidth Control", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , 62 (3), 457-463, (2014).

Tu, W.-H., "Switchable Microstrip Bandpass Filters With Reconfigurable On-State Frequency Responses," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 20 (5), 259-261, (2010).

Chen, Y.-M., Chang, S.-F., Chou, C.-Y. and Liu, K.-H., "A Reconfigurable Bandpass-Bandstop Filter Based On Varactor-Loaded Closed-Ring Resonators ", *Microwave Magazine, IEEE* , 10 (1), 138-140, (2009).

Hong, J.-S., "Reconfigurable Planar Filters," *Microwave Magazine, IEEE* , 10 (6), 73-83, (2009).

Mohamed, H.A., El-Shaarawy, H.B., Abdallah, E.A. and El-Hennawy H., " Compact Reconfigurable Dual Mode Resonator with Switchable Band Using RF PIN Diodes", *PIERS Proceedings*, Stockholm, Sweden, (2013).

Gil, I., Bonache, J., Garcia-Garcia, J., Falcone, F. and Martin, F., "Metamaterials in Microstrip Technology for Filter Applications," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE* , 668-671, (2005).

Eleftheriades, G.V., "A Generalized Negative-Refractive-Index Transmission-Line (NRI-TL) Metamaterial for Dual-Band and Quad-Band Applications", *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , 17 (6), 415-417, (2007).

Karthikeyan, S.S. and Arulvani, M., "Double Negative Metamaterial Design Using Open Split Ring Resonator", *Students' Technology Symposium (TechSym), 2010 IEEE* , 142-145, (2010).

Hong, J.-S. and Lancaster M. J., *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, New York, Wiley, (2001)

Pozar, D. M., *Microwave Engineering*, Wiley,

Sonnet User's Manual, Version 14, Sonnet Software, North Syracuse, NY, June 2011



## 8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :MURAT EMÜR  
Doğum Yeri ve Tarihi : GİRESUN-27.08.1991  
Lisans Üniversite :Pamukkale Üniversitesi, Elk. Elektronik Müh.  
Yandal Üniversite : Pamukkale Üniversitesi, Fizik  
Elektronik posta : murat\_emur@hotmail.com  
İletişim Adresi : Fındıklı Mah. Nu.14 KEŞAP/GİRESUN

### Yayın Listesi :

• Karpuz, C.,Gorur, A. K., Ozek, A. and **Emur, M.** “Metamaterial Based Dual-Band Bandpass Filter Design for WLAN/WIMAX Applications”,*Microwave and Optical Technology Letters*, vol.56, no.10, pp.2211,2214, October 2014

• Karpuz, C.,Gorur, A. K., Ozek, A. and **Emur, M.** “Design of Quad-Band Microstrip Bandstop Filter Using Dual-Mode Open Loop Resonators Having Thin-Film Capacitors. ”, (Yayına hazırlanıyor)

### Konferans Listesi :

• Ceyhun Karpuz, **Murat Emür**, Ahmet Özek, Ali Kürşad Görür, “Açık Halka Rezonatörler Kullanılarak Üç Bantlı Mikroşerit Bant Durduran Filtre Tasarımı” *ELECO 2014 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, 27-29 Kasım 2014, Bursa

• Ali Kursad Gorur, **Murat Emur**, Ceyhun Karpuz, Ahmet Ozek, “Design of High Selectivity Microstrip Bandpass Filter Using Triple-Mode Stub Loaded Resonator” *2015 European Microwave Week*, 6-11 September 2015, Paris/France (Kabul edildi)