
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

5G HABERLEŞME İÇİN MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMI

Nazlıdeniz YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

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

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

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

Nazlıdeniz YILDIZ

27/07/2022

5G HABERLEŞME İÇİN MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Nazlıdeniz YILDIZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

Bu tez çalışmasında, beşinci nesil (5G) haberleşme için tasarlanan alçak geçiren iki mikroşerit filtrenin tasarımı ve üretimi yapılarak benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Birinci filtre 9. dereceden geleneksel Chebyshev tipi alçak geçiren filtre yapısı kullanılarak tasarlanmışken, ikinci filtre kusurlu zemin yapısına (Defected Ground Structure - DGS) sahip bir alçak geçiren filtre tasarlanarak üretilmiştir. Birinci filtrenin ölçüm sonuçlarında maksimum bastırma oranının -55 dB seviyesinde olduğu ve benzetim ile ölçüm sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Önerilen ikinci filtrede ise üst yüzey "N" harfine benzer bir şekilde tasarlanmıştır ve filtrenin performansını artırmak için filtrenin alt yüzüne kusurlar açılarak filtrenin harmonik bastırma frekans genişliği ve bastırma seviyesi iyileştirilmiştir. Filtrenin ölçülen maksimum bastırma oranının -65 dB olduğu görülmüştür. Tasarlanan iki tip filtrenin önce elektromanyetik benzetimleri yapılmış ve tasarımı doğrulamak için FR4 alttaş üzerinde üretilerek S-parametresi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her iki filtrenin performansları; sönüm seviyesi, bant genişliği ve fiziksel büyüklükleri karşılaştırılmıştır. Chebyshev tipi alçak geçiren filtre için kesim frekansı tasarımında en iyi sonuç 3,5 GHz'de elde edilmiş, kusurlu zemine sahip filtre de ise 3,3 GHz'de elde edilmiştir. Chebyshev tipi alçak geçiren filtre prototipinin benzetim ve üretim sonuçları, kusurlu zemin yapısına sahip filtreye göre çok daha benzer ve başarılı şekilde elde edilmiştir. Devre tasarımında, baskı devre kartı (printed circuit board - PCB) üzerine mikroşerit teknolojisi kullanılmıştır.

Bilim Kodu	:	90516
Anahtar Kelimeler	:	Mikroşerit filtre, 5G haberleşme, alçak geçiren filtreler, kusurlu zemin yapısı, Chebyshev filtre
Sayfa Adedi	:	57
Danışman	:	Prof. Dr. Nursel AKÇAM
İkinci Danışman	:	Dr. Galip Orkun ARICAN

MICROSTRIP FILTER DESIGN FOR 5G COMMUNICATIONS

(M. Sc. Thesis)

Nazlıdeniz YILDIZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

In this thesis, two low-pass microstrip filters designed for fifth generation (5G) communication were designed and manufactured, and simulation and measurement results were compared. The first filter was designed using a traditional 9th-order Chebyshev type low-pass filter structure, while the second filter was produced by designing a low-pass filter with a defective ground structure (DGS). In the measurement results of the first filter, it was observed that the maximum suppression ratio was at the level of -55 dB and the simulation and measurement results were compatible with each other. In the second proposed filter, the upper surface is designed similar to the letter “N”, and the harmonic suppression frequency width and suppression level of the filter are improved by opening the defects on the lower face of the filter to increase the performance of the filter, and it has been observed that the measured maximum suppression ratio of the filter is -65 dB. First, electromagnetic simulations of the two designed types of filters were made and S-parameter measurements were carried out by fabricating them on FR4 substrate to verify the design. The performances of both filters; damping level, bandwidth and physical sizes are compared. The best result in the cut-off frequency design for the Chebyshev type low-pass filter was obtained at 3.5 GHz, while the defected ground filter was obtained at 3.3 GHz. The simulation and production results of the Chebyshev type low-pass filter prototype are much more similar and successful than the filter with a defective ground structure. In circuit design, microstrip technology is used on the printed circuit board (PCB).

Science Code	:	90516
Key Words	:	Microstrip filter, 5G communication, low pass filters, defective ground structure, Chebyshev filter
Page Number	:	57
Supervisor	:	Prof. Dr. Nursel AKÇAM
Co-Supervisor	:	Dr. Galip Orkun ARICAN

TEŞEKKÜR

Bu tezin planlama ve yürütme aşamasında her zaman destek olan sayın danışmanlarım Prof. Dr. Nursel AKÇAM ve Dr. Galip Orkun ARICAN ’a sonsuz teşekkür ederim. Bu çalışmada kullanılan verilerin üretilmesinde ve ölçülmesinde sağladığı destek için ASELSAN A.Ş.'ye teşekkür ederim. Ayrıca her zaman yanımda olan ve desteğini hiç esirgemeyen annem Füsun AKTAN, babam Doğan AKTAN ve sevgili eşim Cem YILDIZ ’a teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. ELEKTRONİK FİLTRELER 3

2.1. Kullanılan Devre Elemanına Göre Elektronik Filtreler 3

2.1.1. Pasif filtre 3

2.1.2. Aktif filtre 4

2.2. Çalışma Prensibine Göre Elektronik Filtreler 5

2.2.1. Alçak geçiren filtre 5

2.2.2. Yüksek geçiren filtre 6

2.2.3. Bant geçiren filtre 8

2.2.4. Bant durduran filtre 8

3. MİKROŞERİT FİLTRELER 11

3.1. Filtre Yaklaşım Metotları 13

3.1.1. Butterworth (maksimum düzlüklü) filtre yaklaşımı 13

3.1.2. Chebyshev filtre yaklaşımı 16

3.1.3. Gaussian filtre yaklaşımı 18

Sayfa

3.1.4. Eliptik filtre yaklaşımı 19

4. ALÇAK GEÇİREN MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMI VE ÜRETİMİ 21

4.1. Alçak Geçiren Mikroşerit Filtre Tasarımı 22

4.1.1. Butterworth alçak geçiren filtre devresi tasarımı 22

4.1.2. Chebyshev alçak geçiren filtre devresi tasarımı 30

4.1.3. Eliptik alçak geçiren filtre devresi tasarımı 34

4.2. Kusurlu Zemin Yapısına Sahip Alçak Geçiren Mikroşerit Filtre Devresi Tasarımı 36

4.3. Tasarlanan Mikroşerit Filtrenin Üretimi 41

4.4. Benzetim ve Üretim (Ölçüm) Sonuçlarının Karşılaştırılması 44

4.4.1. Benzetim ile elde edilen edilen ve üretilen kesim frekansı 3,5 GHz olan 9. dereceden Chebyshev alçak geçiren filtre 44

4.4.2. Benzetim ile elde edilen ve üretilen kusurlu zemin yapısına sahip alçak filtre 46

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 51

KAYNAKLAR 53

ÖZGEÇMİŞ 57

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Polinom faktörlerinin hesaplama tablosu 15

Çizelge 3.2. Katsayılar formundaki Butterworth polinomları 15

Çizelge 3.3. Katsayılar formundaki Chebyshev polinomları 17

Çizelge 4.1. Butterworth alçak geçiren filtre eleman değerleri 22

Çizelge 4.2. Kesim frekansı 3,5 GHz olan 5. dereceden (n=5) Butterworth yüksek ve düşük empedanslı hat parçalarına ait bilgi tablosu 26

Çizelge 4.3. Chebyshev alçak geçiren filtre eleman değerleri n=5 için (0,5 dB iletim bandı dalgalanması) 31

Çizelge 4.4. Chebyshev alçak geçiren filtre eleman değerleri n=7 için (0,5 dB iletim bandı dalgalanması) 32

Çizelge 4.5. Chebyshev alçak geçiren filtre eleman değerleri n=9 için (0,5 dB iletim bandı dalgalanması) 33

Çizelge 4.6. Tasarlanan kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin literatürdeki benzerleriyle karşılaştırması 49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Filtre tipleri 5

Şekil 2.2. RC alçak geçiren filtresi 6

Şekil 2.3. Evirmeyen RC alçak geçiren filtresi 6

Şekil 2.4. Pasif yüksek geçiren filtre 7

Şekil 2.5. Aktif yüksek geçiren filtre 7

Şekil 2.6. Bant geçiren filtre 8

Şekil 2.7. Bant durduran filtre 9

Şekil 3.1. Mikroşerit yapı 11

Şekil 3.2. Butterworth filtresinin frekans tepkisi 14

Şekil 3.3. Chebyshev Tip1 filtresinin frekans cevabı 17

Şekil 3.4. Chebyshev Tip2 filtresinin frekans cevabı 18

Şekil 3.5. Gaussian filtresinin frekans cevabı 19

Şekil 3.6. Eliptik filtrenin frekans cevabı 20

Şekil 4.1. Tasarlanan 5. dereceden Butterworth prototip devresi 23

Şekil 4.2. Kesim frekansı 3,5 GHz ve 5. dereceden (n=5 olan) Butterworth alçak geçiren filtre devresi 24

Şekil 4.3. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Butterworth 5. dereceden filtre için S- parametreleri 26

Şekil 4.4. Kesim frekansı 3,8 GHz olan alçak geçiren Butterworth 5. dereceden filtre için S grafikleri 27

Şekil 4.5. Kesim frekansı 4,2 GHz olan alçak geçiren Butterworth 5. dereceden filtre için S-parametreleri 27

Şekil 4.6. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Butterworth 7. dereceden filtre için S-parametreleri 29

Şekil 4.7. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Butterworth 9. dereceden filtre için S-parametreleri 30

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Chebyshev 5. dereceden filtre için S-parametreleri 31

Şekil 4.9. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Chebyshev 7. dereceden filtre için S-parametreleri 32

Şekil 4.10. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Chebyshev 9. dereceden filtre için S- parametreleri 33

Şekil 4.11. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Chebyshev 9. dereceden filtre için S-parametreleri 34

Şekil 4.12. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Eliptik 5. dereceden filtrenin S-parametreleri 34

Şekil 4.13. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Eliptik 7. dereceden filtrenin S-parametreleri 35

Şekil 4.14. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Eliptik 9. dereceden filtrenin S-parametreleri 36

Şekil 4.15. Önerilen kusurlu zemin yapısı şeklinin devre modeli 37

Şekil 4.16. Alçak geçiren filtrenin ön yüzeyi 38

Şekil 4.17. Kusurlu zemin yapısına sahip olmayan devrenin S-parametreleri 38

Şekil 4.18. Bakır levha üzerinde oluşturulan kusur 39

Şekil 4.19. Kusurlu zemin yapısına sahip olan devrenin S-parametreleri 40

Şekil 4.20. Chebyshev alçak geçiren filtre tasarımına ait devre 45

Şekil 4.21. Chebyshev 9. dereceden filtreye ait alçak geçiren filtrenin üretim sonucunun S grafiği 45

Şekil 4.22. Chebyshev 9. dereceden filtreye ait alçak geçiren filtrenin $|S_{11}|$ parametre sonuçlarının karşılaştırılması grafiği 46

Şekil 4.23. Chebyshev 9. dereceden filtreye ait alçak geçiren filtrenin $|S_{12}|$ parametre sonuçlarının karşılaştırılması grafiği 46

Şekil 4.24. Kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin üretim sonucunun S-parametre grafiği 47

Şekil 4.25. Kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin $|S_{11}|$ parametre sonuçlarının karşılaştırılması grafiği 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.26. Kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin $|S_{12}|$ parametre sonuçlarının karşılaştırılması grafiği 48

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Mikroşerit devre tasarımı örneği..... 21

Resim 4.2. Mikroşerit devrenin cihaz içinde üretimi 42

Resim 4.3. Bilgisayar üzerinden üretim aşamalarının gösterimi 42

Resim 4.4. Üretilen mikroşerit filtrenin sembolik gösterimi 43

Resim 4.5. Üretilen Chebyshev mikroşerit filtresi 43

Resim 4.6. Üretilen kusurlu zemin yapısına sahip mikroşerit filtre 44

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
dB	desibel
Hz	Hertz
KHz	Kilohertz
GHz	Gigahertz
um	mikrometre
mm	milimetre
Ω	Ohm

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AC	Alternative Current (Alternatif akım)
CVD	Chemical Vapor Deposition (Kimyasal buhar biriktirme)
DC	Direct Current (Doğru akım)
DGS	Defected Ground Structure (Kusurlu Zemin yapısı)
GSM	Global System for Mobile Communication (Mobil haberleşme için küresel sistem)
LC	Endüktans Kapasitans
PCB	Printed Circuit Board (Baskılı devre kartı)
RC	Direnç Kapasitans
RF	Radio Frequency (Radyo frekansı)
TEM	Transverse Electric Magnetic (Enine elektrik manyetik)
UV	Ultraviolet (Morötesi)

1. GİRİŞ

Mobil haberleşme, elektromanyetik dalga teorisinin başlangıcından itibaren sürekli olarak gelişen bir teknolojinin ürünüdür. Mobil haberleşme teknolojisinin zaman içerisindeki gelişmesi 1G, 2G, 3G, 4G ve 5G olarak adlandırılmaktadır. Burada kullanılan G harfi, nesil (generation) anlamına gelmektedir. Her bir yeni nesilde önceki nesile göre yeni teknolojik gelişmeler olmaktadır. 1G, mobil haberleşme sistemlerinin ilkidir, sadece sesi taşıdığı için analogdur. 2G ile beraber mesaj gönderme başlamıştır. 3G'de ise ses, mesaj, görüntü transferi teknolojisi oluşmuştur. 4G ise hareketli ve sabit alıcıların yüksek hızda veri (data) alışverişi yapabildiği teknolojidir [1]. 5G teknolojisi ise yüksek hızda veri transferini geliştirmek için yapılan çalışmaların bütünüdür. Bunun için yüksek frekans spektrumu kullanılmaktadır. Ayrıca bulut teknolojisi de 5G teknolojisinin bir ürünüdür [2].

Gelecekte, mobil haberleşme için geliştirilmekte olan beşinci nesil (5G) teknolojisi birçok avantajının yanında daha yüksek hızlarda veri alışverişine olanak tanıyan da bir teknolojidir. Bu yeni teknolojiye göre yeni frekans bantları önerilmiştir. 5G teknolojisi için önemli olan frekans bant aralıkları 1 GHz ve 6 GHz arasındaki frekanslardır. Ayrıca daha yüksek frekans bantlarının da gelecekte kullanılması planlanmaktadır. Kullanılması planlanan frekans bantları 24-28 GHz, 37-40 GHz ve 64-71 GHz aralığındaki frekanslardır [3-4].

5G ile ilgili çalışmalar incelendiğinde; 5G, haberleşme sektöründe ortaya çıkan ihtiyaçları karşılamak için ortaya sürülen yeni nesil bir teknolojidir. Bu teknolojiye ihtiyaç duyulmasının temel sebebi, gün geçtikçe kablosuz mobil cihazların ve hizmetlerin yetersiz kalacak olmasıdır [5]. Telekomünikasyon çevresi ise 5G'yi bunun için bir çözüm olarak görmektedir. Yapılan çalışmalarda mevcut kapasitenin yetersiz kalması, veri hızlarının ihtiyacı karşılamaması, servis kalitesinin düşük kalması gibi temel nedenlerden dolayı 5G ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [6-9].

Mikrodalga filtre; geçiş bandındaki frekanslarda iletim, durdurma bandındaki frekanslarda da zayıflatma sağlayarak belli noktadaki frekans cevabını kontrol etmek için kullanılan iki kapılı elemandır [10]. Frekans sinyallerinin istenilen aralıkta filtrelenmesi amacıyla indüktör ve kapasitör gibi devre elemanları kullanılır. Kullanılan bu elemanların sayısı ve boyutu seçilen mertebeye göre değişir. Mikroşerit filtreler, bu devre elemanlarını içeren küçük boyutlu, hafif, üretimi kolay, düz bir yüzeye sahip, diğer mikrodalga elemanlarına

entegresi kolay ve finansal olarak ekonomik olan filtrelerdir. Mikroşerit filtreler günümüzde hücresel haberleşme, test / ölçüm sistemleri, kablosuz modemler, radar sistemleri, uzaktan kumanda kontrol, radyo ve televizyon alıcı sistemleri gibi mikrodalga mühendisliğinin birçok alanında yer almaktadırlar.

Literatürde Butterworth, Chebyshev ve Eliptik filtre gibi farklı tipte alçak geçiren filtre tasarım yapılarının olduğu görülmektedir. Genel anlamda bu filtre tiplerinin birbiriyle karşılaştırılması uygulamalar yoluyla yapılmıştır [11-14]. Bu tasarım yapılarından, yüksek seçicilik ve yüksek bastırma oranına sahip olması nedeniyle Chebyshev tipi alçak geçiren filtre yapısının tez kapsamında kullanılmasına karar verilmiştir.

Literatürde yer alan birçok alçak geçiren filtre tasarımında toprak iletkenine kusurlar açarak filtrenin performansının iyileştirildiği görülmektedir [15-17]. Bu bağlamda literatürde kusurlu zemin yapılarına, temel aktarım özellikleri, kusurlu zemin kavramları ve eşdeğer LC devre modelini de kapsayan genel bir bakış açısı sunulmaktadır [18-25,37].

Bu tez çalışmasında, 5G haberleşme sistemlerine yönelik alçak geçiren iki mikroşerit filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Filtrelerin kesim frekansları için hem kapsama alanı hem de kapasite bakımından 5G için uygun bir kesim frekansı tercih edilmiştir. Buna göre ilk olarak geleneksel filtre tasarımına sahip 9. dereceden bir Chebyshev alçak geçiren filtre tasarlanıp, üretilmiş ve ölçülmüştür. Geleneksel filtre yapısı ile 4 - 7,5 GHz frekans aralığında -30 dB'den iyi bir bastırma seviyesi elde edilmiştir. Önerilen ikinci alçak geçiren filtre tasarımında ise geleneksel filtre tasarımının harmonik bastırma bant genişliğinin artırılarak bastırma seviyesinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda ikinci önerilen filtre tasarımı "N" harfi şeklinde bir ön yüzeye sahip ve alt yüzeyindeki taban iletkeninde ise kusurlu bir yapıya sahiptir. Bu filtre yapısıyla 3,5 - 20 GHz frekans bandı içerisinde en düşük -15,6 dB bastırma seviyesi elde edilmiştir. Önerilen zemin kusurlu alçak geçiren filtre yapısını geniş harmonik bastırma, yüksek seçicilik ve düşük araya girme kaybı özelliğinden dolayı 5G haberleşme uygulamalarında kullanılabileceği düşünülmektedir.

Tasarımı ve benzetimleri yapılan mikroşerit filtreler üretilmiş ve üretim sonuçları benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. ELEKTRONİK FİLTRELER

Elektronik filtreler farklı frekanslarda elektriksel sinyallerin bastırılmasını veya geçişini sağlayan devrelerdir. Filtreler; elektriksel gürültüyü (istenmeyen sinyalleri) devre çıkışına veya diğer bir elektronik sistemde kendisinden sonra gelen diğer katmanlara etkisinin oluşması istenmeyen işaretlerin bastırılarak yok edilmesini sağlar [26].

Filtreler; radyo - televizyon, resim ve ses haberleşmesi, 5G haberleşmesi, telefon devreleri, sismoloji, jeofizik gibi birçok alanda kullanılırlar.

Elektronik filtreler kullanılan devre elemanlarına ve çalışma prensiplerine göre gruplandırılır.

2.1. Kullanılan Devre Elemanına Göre Elektronik Filtreler

Aktif ve pasif elektronik filtreler olmak üzere ikiye ayrılırlar.

2.1.1. Pasif filtre

Pasif elektronik devreler direnç, kondansatör, indüktör (bobin) içeren devrelerdir. Bu filtreler indüktör ve kondansatörün alçak ve yüksek frekanslı işaretlere karşı direnç göstermesiyle yapılır. Pasif filtreler geçirgen oldukları frekanslarda bile elektrik işaretini zayıflatır, besleme kaynağına ihtiyaç duymazlar ve frekans bantları geniştir [27]. Başka bir deyişle pasif elektronik filtreler; RC veya RL yapılarından oluşur ve kesim frekansları R ile C veya R ile L'nin değerlerine bağlı olarak belirlenir. Kesim frekansı devrenin girişine uygulanan gerilimin frekansı yükseldikçe çıkıştan alınan gerilim değerinin giriş gerilimine oranının 0,718 Volt'a düştüğü frekans olarak belirlenir. RC veya RL yapılarından oluşturulan alçak geçiren filtre (Low Pass Filter - LPF) ile yüksek geçiren filtre (High Pass Filter -HPF) devrelerinin birleştirilmesi ile basit bir bant geçiren filtre (Band Pass Filter - BPF) tasarlanabilir. Benzer biçimde basit bir bant durduran (Band Reject Filter - BJF) filtre de tasarlanabilir. BPF ve BRF; LPF ve HPF'dan oluştuğu için düşük değerli bir alt kesim frekansı (f_L) ve yüksek değerli bir üst kesim frekansı (f_H) olmak üzere iki kesim frekansı değerine sahip olur. Bu iki kesim frekansı arasındaki fark ise bant genişliği olarak tanımlanır.

2.1.2. Aktif filtre

Aktif elektronik devreler ise OPAMP (OPerational AMPlifier) (transistör) içerir. Aktif filtrelerde frekans bölgesi seçme işlemi direnç ve kondansatör kullanılarak yapılır [28]. Başka bir deyişle bir OPAMP yardımıyla oluşturulan filtreler, aktif filtre olarak adlandırılır. Genellikle bir aktif filtre bir frekans seçici geri besleme devresiyle birlikte bir OPAMP'dan oluşur ve devredeki frekans seçici geri besleme kısmı ise OPAMP'ın frekans cevabını şekillendirir.

Aktif filtrelerin, pasif filtrelere göre avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Aktif filtre devrelerinde çıkış empedansının çok düşük olması, giriş empedansının ise yüksek olması nedeniyle, aktif filtrelerin girişlerine veya çıkışlarına bağlanacak devre veya devre elemanları etkilenmez.
- Aktif filtre tasarımında kullanılan OPAMP'ın, filtre edilen işaretleri yükselterek çıkışına aktarması nedeniyle, filtrenin geçirgen olduğu frekanslarda herhangi bir zayıflatma olmaz.

Aktif filtrelerin, pasif filtrelere göre dezavantajları ise aşağıdaki gibidir.

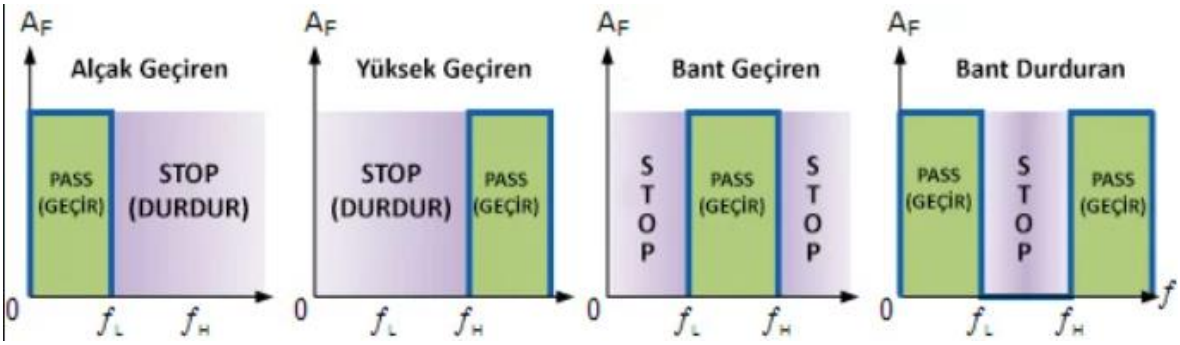
- Pasif filtreler herhangi bir besleme gerilimine gereksinim duymazlar, ancak aktif filtreler her zaman besleme gerilimine ihtiyaç duyar.
- Aktif filtre tasarımında kullanılan OPAMP'ların bant genişlikleri sınırlı olduğundan her frekansta aktif filtre tasarlamak oldukça zordur.
- Aktif filtre devrelerinde tüm devre üretim teknolojisinden kaynaklanan sınırlamalar nedeniyle indüktans elemanı kullanılamaz. Bu eleman yerine negatif empedans dönüştürücülerden yararlanılarak kondansatörden indüktans elde edilir.

Özetlemek gerekirse, aktif filtreler, pasif filtrelere göre daha avantajlıdır. Buna örnek olarak, alçak frekansların büyük indüktans değerleriyle oluşturulabilmesi verilebilir. Büyük olduklarından dolayı hem fiziksel anlamda dezavantajlıdır, hem de maliyeti diğer elemanlara oranla daha pahalıdır. Bu nedenle alçak frekanslarda aktif filtreler tercih edilir.Aktif filtreler besleme kaynağına ihtiyaç duyarlar. Frekans bant aralıkları ise dardır. Bu nedenle yüksek frekanslarda tercih edilmezler. Aktif filtrelerin giriş empedansları yüksek olduğundan işaret kaynağını etkilemezler.

2.2. Çalışma Prensibine Göre Elektronik Filtreler

Filtreler, işaretlerin çalıştığı frekanslara göre sınıflandırılırlar. Devre elemanlarının çıkış sinyallerine bağlanma şekillerine göre filtre yapısının türü belirlenir.

Filtreler, sinyallerin değiştirilmeden geçmesi işlevini belirli bir frekans bandı aralığında yaparlar. İstenmeyen tüm sinyalleri ise zayıflatılırlar. İdeal bir filtrenin genlik yanıtı, dört filtre çeşidinin frekans yanıt eğrisi kullanılarak tanımlanır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Filtre tipleri

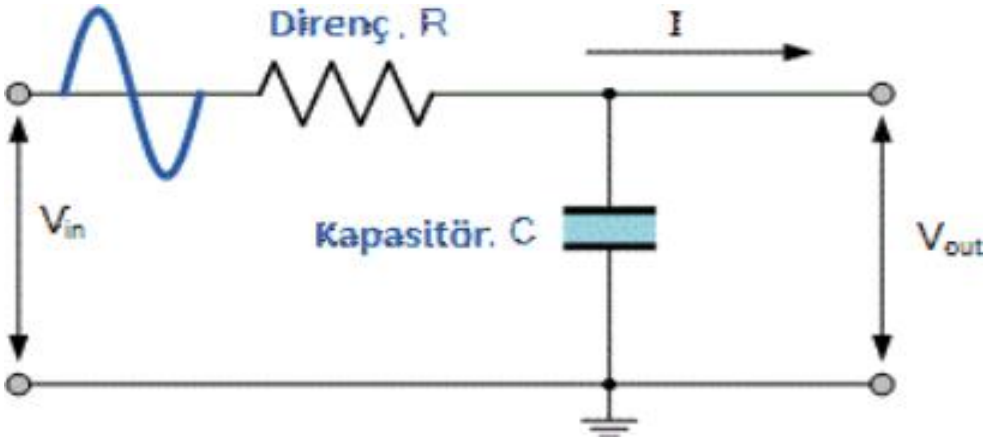
2.2.1. Alçak geçiren filtre

Belirli bir frekans değerinin altındaki frekanslı işaretleri geçiren, üstündeki frekanslı işaretleri ise geçirmeyen filtrelerdir. İstenmeyen sinyaller filtrelenir ve ideal bir filtre, frekanslarına göre sinüzoidal giriş sinyallerini ayırarak geçirir.

Pasif alçak geçiren filtreler düşük frekanslarda (100 kHz'den az), R, C (direnç, kondansatör) devresi kullanılarak oluşturulurken, yüksek frekanslı (100 kHz'den fazla) filtreler genellikle R, L, C (direnç, indüktans, kondansatör) elemanlardan oluşur. Alçak geçiren filtrelerde yükseltici elemanlar kullanılmadığından sinyal kazancı elde edilemez. Bundan dolayı çıkış seviyeleri giriş seviyelerinden düşüktür [29].

Şekil 2.2'de verilen bir RC alçak geçiren filtre devresidir. Burada kondansatörün gerilime karşı gösterdiği direnç, frekansla ters yönde değişir. Direnç aynı zamanda devrede potansiyel bölücüdür.

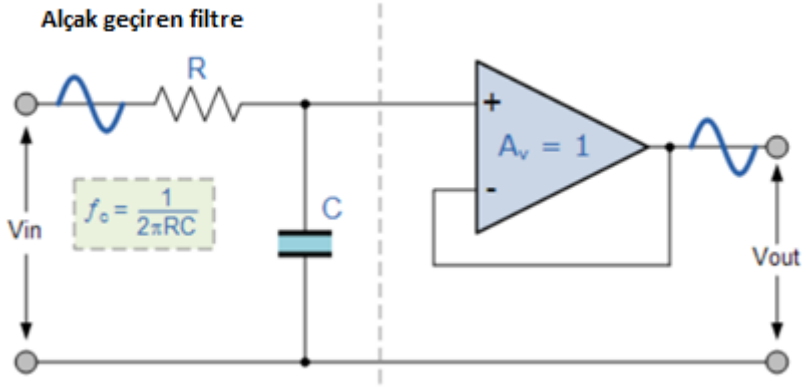
İdeal bir filtrede geçiş bandı kazancının ve düzlüğünün maksimum olması, durdurma bandının zayıflamasının minimum olması beklenir. Bunlar da filtreye dik bir geçiş bandı özelliği verir.



Şekil 2.2. RC alçak geçiren filtresi [30]

Aktif alçak geçiren filtrelerin çalışma şekli ve frekans cevabı pasif filtre ile aynıdır. Buradaki tek fark kazanç kontrolünde OPAMP kullanılmasıdır. Aktif filtrenin maksimum frekans cevabı, yükseltecin kazanç/bant genişliği oranı ile ölçülür. Bununla birlikte, aktif filtrelerin tasarımı genellikle pasif filtrelerden daha kolaydır [32].

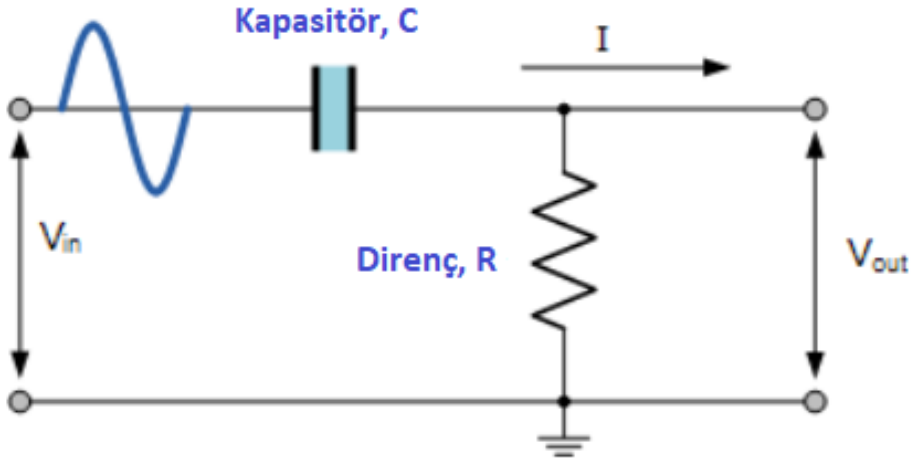
Şekil 2.3'de ise evirmeyen bir yükseltecin girişi, düşük frekanslı bir RC filtresinden oluşmuştur. Bu devrenin avantajı OPAMP'ların yüksek giriş empedansının filtrelerin çıkışındaki aşırı yüklenmesini önlemesidir. Ayrıca düşük çıkış empedansı, filtrelerin kesim frekans noktasında bulunan yük empedansındaki değişikliklerini önler.



Şekil 2.3. Evirmeyen RC alçak geçiren filtresi [30]

2.2.2. Yüksek geçiren filtre

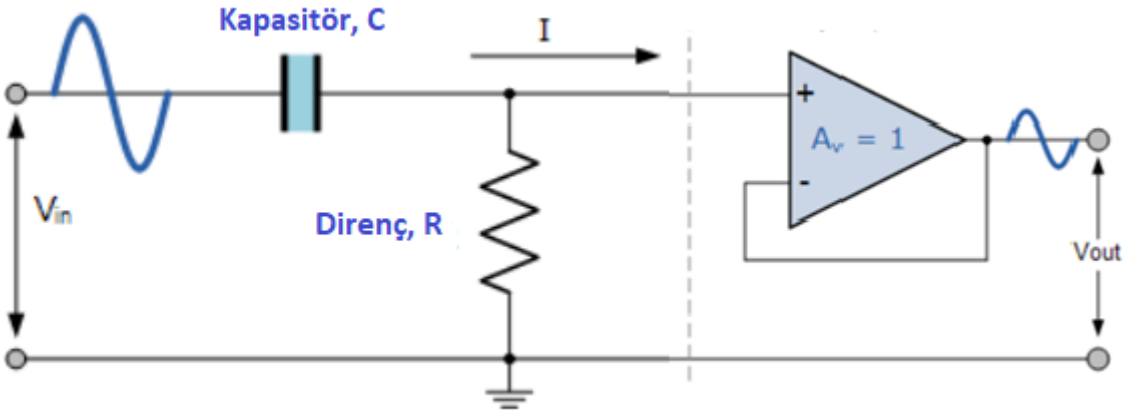
Belirli bir frekans değerinin üstündeki frekanslı işaretleri geçiren, altındaki frekanslı işaretleri ise geçirmeyen filtrelerdir.



Şekil 2.4. Pasif yüksek geçiren filtre [31]

Şekil 2.4'de pasif yüksek geçiren filtre devresi verilmektedir. Bu devrede, kondansatörün gerilime karşı gösterdiği direnç düşük frekanslarda çok yüksektir. Bundan dolayı da kondansatör açık devre davranışı sergiler ve kesim frekansına ulaşana kadar girişten gelen sinyalleri engeller. Kesim frekansının üstünde ise kondansatörün gerilime karşı gösterdiği direnç çok azalacağından kısa devre gibi davranış sergiler [32].

Şekil 2.5'deki devre şekli aktif yüksek geçiren filtre devresidir. Bu devre düşük frekansları geçirmez ya da zayıflatırken, yüksek frekansları geçirir. Aktif yüksek geçiren filtrelerin çalışma şekli ve frekans cevabı pasif filtre ile aynıdır. Buradaki tek fark kazanç kontrolünde OPAMP kullanılmasıdır. Bu da sinyalin genliğinin OPAMP'ın kazancıyla doğru orantılı artmasına neden olur.



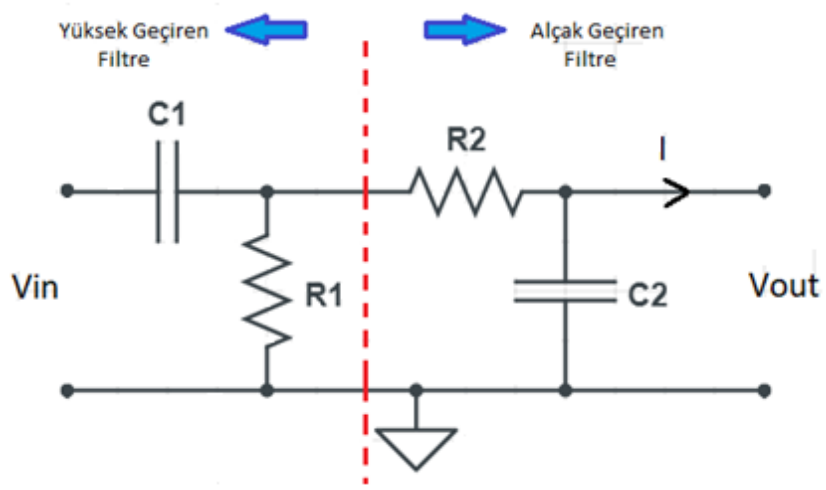
Şekil 2.5. Aktif yüksek geçiren filtre [31]

2.2.3. Bant geçiren filtre

Belirli iki frekans değer aralığındaki frekanslı işaretleri geçiren, altındaki ve üstündeki frekanslı işaretleri ise geçirmeyen filtrelerdir. Bu devrelerde yüksek geçiren filtre alt kesim frekansını oluşturan katmanı, alçak geçiren filtre ise üst kesim frekansını oluşturan katmanı gösterir (Şekil 2.6). Belirli bir frekans aralığı bulunan elektronik devreler, frekans aralığındaki her işareti geçirirler. Bu frekans aralığına da "Bant Genişliği" denir, birimi Hertz (H)'dir. Sonuç olarak bant genişliği, frekansların farkını ifade eder ve frekansların değiştirilmesiyle değişir [33].

Bant geçiren filtreler genel olarak ikinci mertebeden filtreler olarak kabul edilir. Bunun nedeni ise iki reaktif eleman kullanılmasıdır.

Bant geçiren filtre aktif veya pasif filtre olabilir. Pasif bant geçiren filtre, ideal durumlarda gürültüyü engeller. Uygulamada belirli frekanslarda veya belirli bir frekans aralığında gürültüyü engellemek veya filtrelemek için kullanılabilir. Aktif bant geçiren filtre ise düşük ve yüksek geçiren birkaç pasif filtrenin bir araya gelmesinden elde edilir.

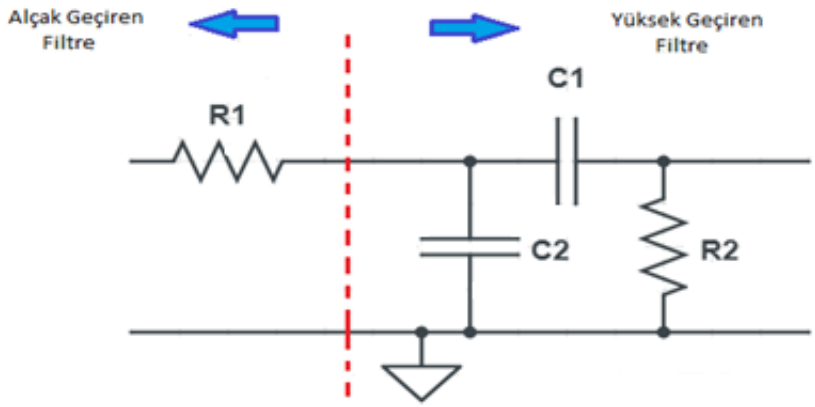


Şekil 2.6. Bant geçiren filtre [34]

2.2.4. Bant durduran filtre

Belirli iki frekans değer aralığındaki frekanslı işaretleri durduran, altındaki ve üstündeki frekanslı işaretleri ise geçiren filtrelerdir. Bu devrelerde Şekil 2.7 'de de görüldüğü gibi yüksek geçiren filtre üst kesim frekansını oluşturan katmanı, alçak geçiren filtre ise alt kesim frekansını oluşturan katmanı göstermektedir [35].

Durdurma bandının frekans aralığı eğer çok darsa ve birkaç hertz üzerinde yüksek oranda zayıflıyorsa, bant durdurma filtresinin adı bir çentik filtresi olarak anılır. Bunun nedeni ise frekans tepkisinin yüksek seçiciliğe sahip derin bir çentiğe benzemesinden kaynaklanır.

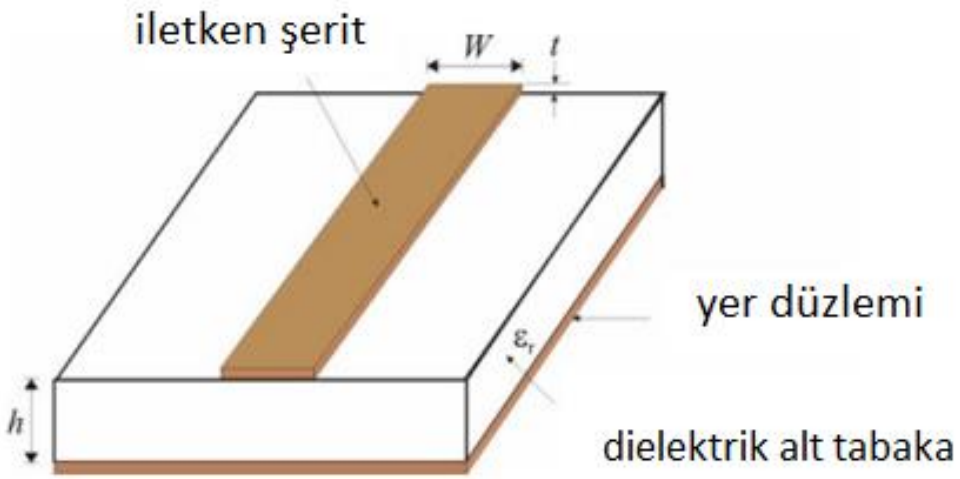


Şekil 2.7. Bant durduran filtre [36]

3. MİKROŞERİT FİLTRELER

Günümüzde mikroşerit filtreler radar sistemleri, haberleşme sistemleri, işaret işleme sistemleri, kablosuz sensör ve diğer birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerdeki kullanım amaçları çeşitlilik arz eder ancak filtreler genellikle istenmeyen işaretleri bastırmak, gürültüyü en aza indirmek ve filtrelemek, belirli frekans değerlerini ayrıştırmak amacı ile kullanılırlar.

Mikroşerit filtre topolojinin seçimi ise filtre karakteristiğine, bant genişliğine, boyutuna ve güç kullanımına bağlıdır. Bir alt tabakanın seçimi ise boyutuna, yüksek mertebe filtre modlarına, yüzey dalga etkilerine, dielektrik kaybına, sıcaklığına, aralık toleranslarına ve güç kullanımına bağlıdır.



Şekil 3.1 Mikroşerit yapı

Şekil 3.1'de bir mikroşeritin genel yapısı gösterilmiştir. Genişliği W ve kalınlığı t olan bir iletken şerit (mikro şerit çizgisi), bağımlı bir dielektrik sabiti ϵ_r ve kalınlığı h olan bir dielektrik yüzeyin üstündedir ve yüzeyin alt kısmı bir topraklama (iletken) düzlemidir.

Mikroşeritteki ortamlar; üstte hava ve altta dielektrik olup homojen bir yapıya sahip değildir. Bu homojen olmayan ortamlar nedeniyle mikroşerit saf bir enine elektromanyetik (Transverse Electromagnetic – TEM) dalgayı desteklemez. Bunun nedeni, saf bir TEM dalgasının sadece enine bileşenlere sahip olması ve yayılma hızının sadece malzeme özelliklerine bağlı olmasıdır. Bununla birlikte, iki kılavuzlu dalga ortamının (dielektrik yüzey ve hava) varlığıyla, bir mikroşerit hattındaki dalgalar, elektrik ve manyetik alan

bileşenlerine sahiptir ve yayılma hızları sadece malzeme özelliklerine bağlı değil, aynı zamanda mikroşeritin fiziksel boyutlarına da bağlıdır.

Şekil 3.1'de verilen mikroşerit yapının karakteristik empedansı aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$^{w}/_{h} < 1 \text{ için; } \quad Z_o = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln(8\,h/w_e + 0{,}25\,w_e/h) \tag{3.1}$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}[(1 + 12\,h/w_e)^{-0{,}5} + 0{,}04(1 - w_e/h)^2] \tag{3.2}$$

$$^{w}/_{h} > 1 \text{ için; } \quad Z_o = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}[w_e/h+1{,}393+0{,}667\ln(w_e/h+1{,}444)}} \tag{3.3}$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}[(1 + 12\,h/w_e)^{-0{,}5}] \tag{3.4}$$

Burada w_e ve h_e sırasıyla mikroşeritin etkin genişlik ve yükseklik değerleridir ve aşağıdaki eşitlikler ile verilir.

$$w_e = w + \frac{t}{\pi}(ln\frac{2h_e}{t} + 1) \tag{3.5}$$

$$h_e = h - 2t \tag{3.6}$$

Basit olarak hesaplanmak istenirse aşağıdaki yaklaşık eşitlikler kullanılır.

$$Z_o = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_r(\frac{w}{h}+2)}} \tag{3.7}$$

$$w/h = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_r Z_o}} - 2 \tag{3.8}$$

S parametreleri; iki kapılı hatta, yük ve kaynağın karakteristik empedansına ve ölçüm frekansına bağlıdır.

$$V_{r_1} = S_{11}V_{i_1} + S_{12}V_{i_2} \tag{3.9}$$

$$V_{r_2} = S_{21}V_{i_1} + S_{22}V_{i_2} \tag{3.10}$$

Burada S_{11} kapı birdeki iki dalganın oranı; S_{22} kapı ikideki iki dalganın oranı; S_{12} kapı birden çıkan ve kapı ikiden giren dalganın oranı; S_{12} kapı ikiden çıkan ve kapı birden giren dalganın oranı olarak ifade edilir. Ayrıca V_{i_1} kapı bire işaret uygulanması; V_{i_2} kapı ikiye işaret uygulanması; V_{r_1} kapı birden işaretin yansıması; V_{r_2} kapı ikiden işaretin yansıması olarak ifade edilir.

3.1. Filtre Yaklaşım Metotları

Filtre tasarımlarında en iyi yaklaşımı yakalamak için kullanılan matematiksel işlemlere "yaklaşım fonksiyonu" denir. Bunlar; Butterworth, Gaussian, Chebysev, Eliptik ve benzer filtre yaklaşımlarıdır.

3.1.1. Butterworth (maksimum düzlüklü) filtre yaklaşımı

Butterworth filtrenin matematiksel yaklaşımı, frekans tepkisinin olabildiğince düz olmasına göre tasarlanmıştır. Bu düz frekans tepkisine "maksimum düz" denir. Kesim noktasından sonraki daha yüksek frekanslar, durdurma bandında sıfıra iner.

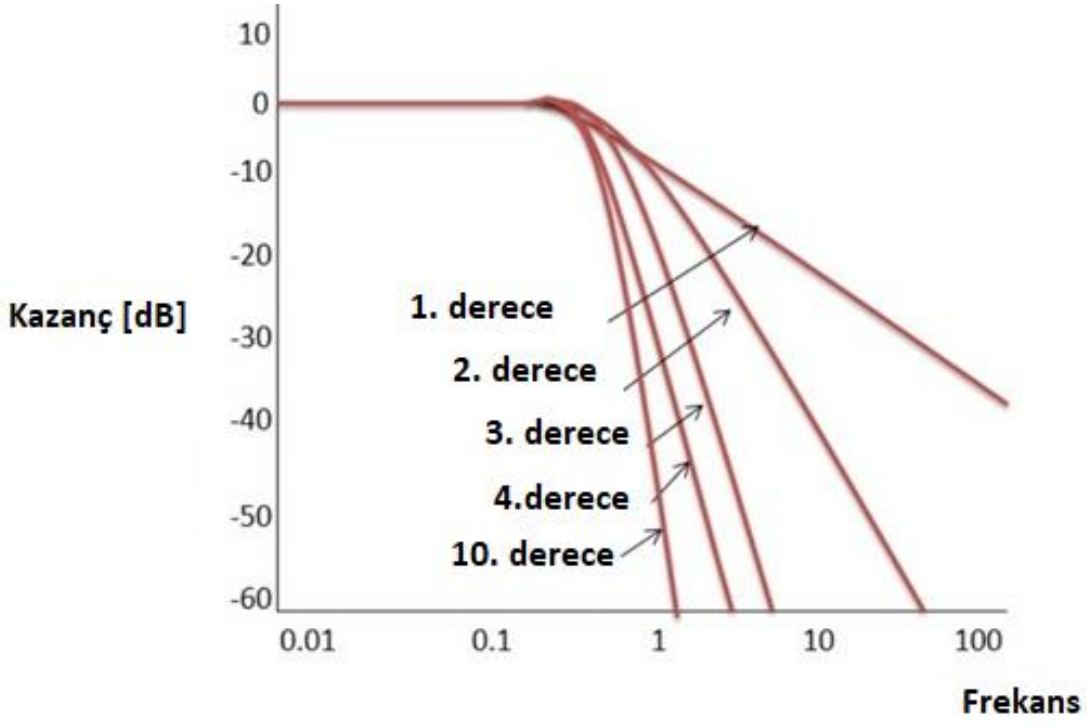
Butterworth filtresinde geniş bir geçiş bandı elde etmek istenmesi durumunda, geçiş bandından durdurma bandına kadar olan geçiş bandında maksimum düzlük kullanılır.

Butterworth filtresinin derece sayısı arttıkça, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi ideal filtreye o kadar yaklaşır. Gerçekte elde edilmek istenen filtrenin ideal frekans tepkisi, çok fazla geçiş bandı dalgalanması ürettiği için elde edilemez [37].

Butterworth filtresinin frekans tepkisi;

$$H(jw) = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2\left(\frac{w}{w_p}\right)^{2n}}} \tag{3.11}$$

(3.11) eşitliği ile verilir. Burada: n, filtre sayısı; ε, maksimum geçiş bandı kazancı; w_p, durdurma bandı frekansı; $w = 2\pi f$ 'dir.



Şekil 3.2. Butterworth filtresinin frekans tepkisi

Filtre polinomlarının normalleştirilmesi, gerilim, akım veya empedansın aynı ölçü biriminin miktarına bölündüğü bir işlemdir. Bu işlem boyutsuz bir aralık veya belirli bir değer düzeyi oluşturmak için kullanılır.

Filtre transfer fonksiyonunun payda polinomu, bize Butterworth polinomunu verir. S-düzlemi, merkezi orijinde olan eşit yarıçaplı bir daire üzerinde düşünülürse, Butterworth filtresinin tüm kutupları bu S-düzleminin sol yarısında bulunur.

Herhangi dereceden bir filtre için, “S”nin en yüksek gücünün birlikte verimliliği her zaman 1 olmalıdır ve herhangi dereceden bir filtre için sabit terim her zaman 1'dir. Çift sıralı filtreler için tüm polinom faktörleri doğada kuadratiktir. Tek mertebeden filtreler için tüm polinomlar 1. mertebeden hariç kuadratiktir, 1. mertebeden filtre için polinom “1 + S”'dir. Polinom faktörlerini Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Polinom faktörlerinin hesaplama tablosu

n (derece)	Faktörlü Formda Normalleştirilmiş Payda Polinomları
1	$(1+s)$
2	$(1+1,414s+s^2)$
3	$(1+s)(1+s+s^2)$
4	$(1+0,765s+s^2)(1+1,848+s^2)$
5	$(1+s)(1+0,618s+s^2)(1+1,618s+s^2)$
6	$(1+0,518s+s^2)(1+1,414s+s^2)(1+1,932s+s^2)$
7	$(1+s)(1+0,445s+s^2)(1+1,247s+s^2)(1+1,802s+s^2)$
8	$(1+0,390s+s^2)(1,111s+s^2)(1,663s+s^2)(1+1,962s+s^2)$
9	$(1+s)(1+0,347s+s^2)(1+s+s^2)(1+1,532s+s^2)(1+1,879s+s^2)$
10	$(1+0,313s+s^2)(1+0,908s+s^2)(1+1,414s+s^2)(1+1,782s+s^2)(1+1,975s+s^2)$

Katsayılar formundaki Butterworth polinomları ise Çizelge 3.2'de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Katsayılar formundaki Butterworth polinomları

n	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
1	1									
2	1	1,414								
3	1	2	2							
4	1	2,613	3,414	2,613						
5	1	3,236	5,236	5,236	3,236					
6	1	3,864	7,464	9,142	7,464	3,864				
7	1	4,494	10,098	14,592	14,592	10,098	4,494			
8	1	5,126	13,137	21,846	25,688	21,846	13,137	5,126		
9	1	5,759	16,582	31,163	41,986	41,986	31,163	16,582	5,759	
10	1	6,392	20,432	42,802	64,882	74,233	64,882	42,802	20,432	6,392

3.1.2. Chebyshev filtre yaklaşımı

Chebyshev filtreleri, Butterworth filtrelerinden daha dik bir yuvarlanmaya sahip analog veya sayısal filtrelerdir. Bu filtreler, geçiş bandı dalgalanmasına (tip I) (Şekil 3.3.) veya durdurma bandı dalgalanmasına (tip II) (Şekil 3.4) sahiptir.

Chebyshev filtreleri, filtre aralığı boyunca idealize edilmiş ve gerçek filtre karakteristiği arasındaki hatayı en aza indirgeme özelliğine sahiptir, ancak geçiş bandında dalgalanmalar vardır. Tip I Chebyshev filtreleri genellikle "Chebyshev filtreleri" olarak adlandırılırken, tip II filtreleri genellikle "ters Chebyshev filtreleri" olarak adlandırılır.

Chebyshev filtrelerinde bulunan geçiş bandı dalgalanması nedeniyle, geçiş bandında daha yumuşak yanıt veren ancak durdurma bandında daha düzensiz yanıt veren filtreler belirli uygulamalar için tercih edilir.

Tip I Chebyshev filtreleri en yaygın Chebyshev filtre türleridir. N. dereceden alçak geçiren filtrenin açısal frekansı, w, kazanç (veya genlik) fonksiyonu $G_n(w)$ ve filtrenin $H_n(s)$ yanıtı, $S=jw$'da , değerlendirilen aktarım işlevinin mutlak değerine eşittir [38].

$$G_n(w) = |H_n(jw)| = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2 T_n^2\left(\frac{w}{w_o}\right)}} \tag{3.12}$$

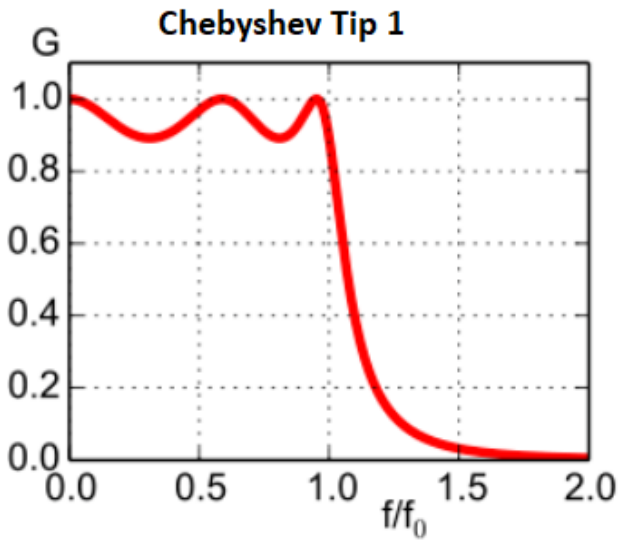
Burada: ε, dalgalanma faktörü; w_o, kesim frekansı; T_n ise n. dereceden Chebyshev polinomudur. Geçiş bandı, dalgalanma faktörü ε tarafından belirlenen dalgalanma ile eşitlikçi davranış sergiler. Geçiş bandında, $G = 1/\sqrt{1+\varepsilon^2}$ Chebyshev polinomu -1 ile 1 arasında değişir, böylece filtre kazancı G = 1'de maksimum ile minimum arasında değişir.

w_o kesim frekansında kazanç tekrar $1/\sqrt{1+\varepsilon^2}$ değerine sahiptir, ancak frekans arttıkça durma bandına düşmeye devam eder. Kesim frekansının -3 dB'de tanımlanması genellikle Chebyshev filtrelerine uygulanmaz; bunun yerine kesim frekans değeri, kazancın son kez dalgalanma değerine düştüğü nokta olarak alınır.

Bir Chebyshev filtresinin derecesi, filtreyi analog elektronikler kullanarak gerçekleştirmek için gereken reaktif bileşenlerin (örneğin endüktanslar) sayısına eşittir.

Durma bandında dalgalanmaya izin verilirse, karmaşık düzlemde jw ekseninde sıfırlara izin vererek daha da dik bir yuvarlanma elde edilebilir. Bununla birlikte, bu, durdurma

bandında daha az bastırma ile sonuçlanır. Bu da, Cauer filtresi olarak da bilinen eliptik filtre olarak adlandırılır [39].



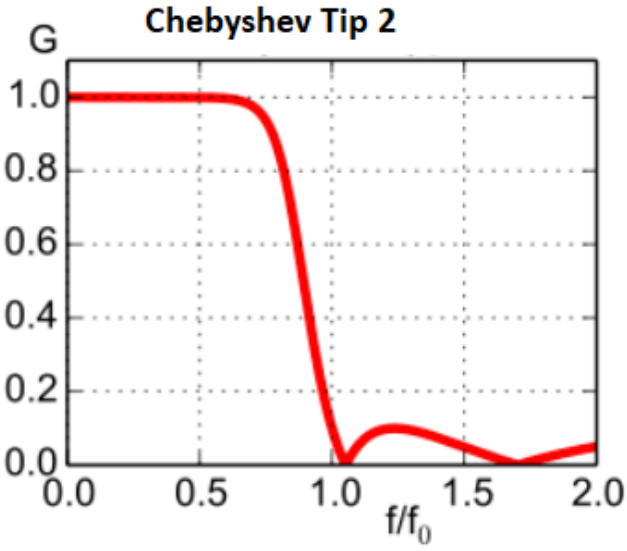
Şekil 3.3. Chebyshev Tip1 filtresinin frekans cevabı

Ters Chebyshev filtreleri olarak da bilinen Tip II Chebyshev filtre türü, Tip I kadar hızlı yuvarlanmadığı ve daha fazla bileşen gerektirdiği için daha az yaygındır. Geçiş bandında hiçbir dalgalanma yoktur, fakat durdurma bandında eşitlenmiş dalgalanmalar görülür.

Katsayılar formundaki Butterworth polinomları ise Çizelge 2.2'de görülmektedir.

Çizelge 3.3. Katsayılar formundaki Chebyshev polinomları

n	g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9
1	0,698	1								
2	1,402	0,707	1,984							
3	1,596	1,096	1,596	1						
4	1,670	1,192	2,366	0,841	1,984					
5	1,705	1,229	2,540	1,229	1,705	1				
6	1,725	1,247	2,606	1,313	2,475	0,869	1,984			
7	1,737	1,258	2,638	1,344	2,638	1,258	1,737	1		
8	1,745	1,264	2,656	1,359	2,696	1,338	2,509	0,879	1,984	
9	1,750	1,269	2,667	1,367	2,793	1,367	2,667	1,269	1,750	1

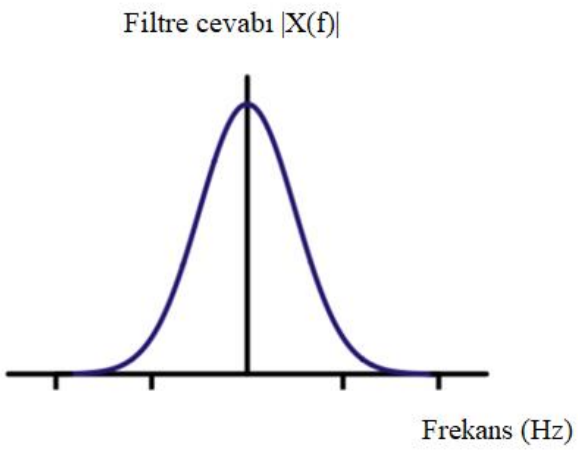


Şekil 3.4. Chebyshev Tip2 filtresinin frekans cevabı

3.1.3. Gaussian filtre yaklaşımı

Elektronik ve sinyal işlemede, Şekil 3.5'de görüldüğü üzere Gauss filtresi, dürtü tepkisi Gauss fonksiyonu olan bir filtredir (veya gerçek bir Gauss tepkisi sonsuz dürtü tepkisine sahip olacağından ona bir yaklaşımdır). Gauss filtreleri, yükselme ve düşme süresini en aza indirir. Bu davranış, Gauss filtresinin mümkün olan en düşük grup gecikmesine sahip olmasıyla yakından ilgilidir. "Sinc" ideal frekans alanı filtresi olduğu gibi, ideal zaman alanı filtresi olarak da kabul edilir [40]. Bu özellikler osiloskoplar ve sayısal haberleşme sistemleri gibi alanlarda önemlidir.

Gauss işlevi $x \in (-\infty , \infty)$ içindir ve teorik olarak sonsuz bir pencere uzunluğu gerektirir. Bununla birlikte, hızlı bir şekilde bozulduğundan, filtre penceresini kesmek ve filtreyi basit bir dikdörtgen pencere işlevi kullanarak doğrudan dar pencereler için uygulamak genellikle mantıklıdır. Diğer durumlarda, kesme işlemi önemli hatalara neden olabilir. Bunun yerine farklı bir pencere işlevi kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir.



Şekil 3.5. Gaussian filtresinin frekans cevabı

3.1.4. Eliptik filtre yaklaşımı

Eliptik filtre (Cauer filtresi olarak da bilinir), hem geçiş bandında hem de durdurma bandında eşitlenmiş dalgalanma davranışına sahip bir sinyal işleme filtresidir (Şekil 3.6). Her bir banttaki dalgalanma miktarı bağımsız olarak ayarlanabilir. Alternatif olarak, geçiş bandı ve durdurma bandı dalgalanmasını bağımsız olarak ayarlama yeteneğinden vazgeçilebilir ve bunun yerine bileşen varyasyonlarına en fazla duyarsız olan bir filtre tasarlanabilir. Ayrıca verilen dalgalanma değerleri için (dalgalanma eşitlenmiş olsun ya da olmasın) geçiş bandı ile durdurma bandı arasındaki geçiş çok hızlıdır.

Durdurma bandındaki dalgalanma sıfıra yaklaştıkça, filtre bir tip I Chebyshev filtresi haline gelir. Geçiş bandındaki dalgalanma sıfıra yaklaştıkça, filtre bir tip II Chebyshev filtresi haline gelir ve son olarak, her iki dalgalanma değeri sıfıra yaklaştıkça, filtre bir Butterworth filtresi haline gelir [41].

Açısal frekans *w*'nin bir fonksiyonu olarak düşük geçişli bir eliptik filtrenin kazancı;

$$G_n(w) = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2 R_n^2\left(\xi, \frac{w}{w_o}\right)}} \tag{3.13}$$

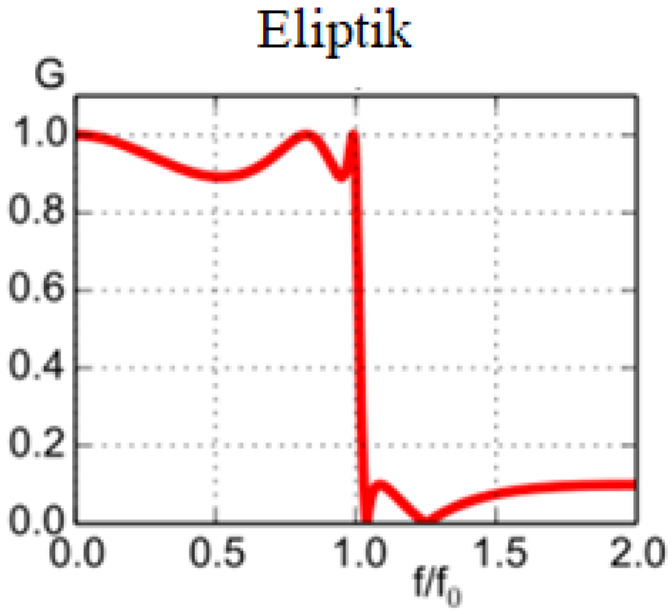
biçiminde verilir. Burada R_n, *n.* dereceden eliptik rasyonel fonksiyondur (bazen Chebyshev rasyonel fonksiyonu olarak bilinir) ve w_o kesim frekansı, ε dalgalanma faktörü, ξ ise

seçicilik faktörüdür. Rasyonel bir eliptik derece fonksiyonu n içinde x seçicilik faktörü ξ genellikle şu şekilde tanımlanır:

$$R_n(\xi, x) = cd\left(n\frac{K(1/L_n(\xi))}{K(1/\xi)}\ cd^{-1}\left(x, \frac{1}{\xi}\right), \frac{1}{L_n(\xi)}\right) \tag{3.14}$$

Burada, cd fonksiyonu Jacobi eliptik kosinüs fonksiyonu; K birinci dereceden eliptik integral; L_n ise ayrımcılık faktörüdür.

Dalgalanma faktörünün değeri geçiş bandı dalgalanmasını belirtirken, dalgalanma faktörü ve seçicilik faktörünün birleşimi durdurma bandı dalgalanmasını belirtir.



Şekil 3.6. Eliptik filtrenin frekans cevabı

4. ALÇAK GEÇİREN MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMI VE ÜRETİMİ

Bir alçak geçiren filtre, belirli bir kesim frekansının altındaki frekansları geçiren ve bu kesim frekansının üzerindeki frekansları zayıflatan filtredir. Bu tezin amacı, alçak geçiren bir mikroşerit filtre tasarımını uygun bir prototipte oluşturmaktadır. Bu prototip oluşturulurken uygun kesim frekansı ve buna uygun bir frekans cevabı, iletim bandı ve durdurma bantlarının davranışları, kullanılan elemanlar, elemanların sayıları ve hangi değerlerde kullanılacakları gibi parametreler ele alınmıştır.

Öncelikli olarak 5G haberleşmelerde kullanılan frekans değerleri araştırılmıştır. Kullanılan frekans değerlerinden birkaçı seçilerek yapılacak tasarım için uygun olup olmayacakları incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda frekans değerleri seçilmiş bir sonraki aşama olan filtre tiplerinin hangileri olacağına karar verilmiştir. Filtre tipleri belirlenirken bir karşılaştırma yapılmak istendiği için farklı filtre tipleri seçilmiştir. Bunlar Butterworth, Chebyshev ve Eliptik filtrelerdir. Butterworth frekans cevaplı filtreler analog sistemlerde kullanıldıklarından dolayı dalgalanma oluşturmayan filtrelerdir. Chebyshev ve Eliptik frekans cevaplı filtreler ise sayısal sistemlerde tercih edilirler. Bu tip filtrelerde dalgalanma oluşur. Bu nedenle de sayısal sistemlerde kullanılmalarında bir sıkıntı yaşanmaz. Filtre tipleri belirlendikten sonra hangi derecelerde çalıştırılacakları ve bu derecelerde kaç adet eleman kullanılacağı incelenmiştir. Dereceler de belirlendikten sonra eleman ve frekans dönüşümleri uygulanarak istenilen kesim frekansında filtreler elde edilmiş ve hepsi mikroşerit hatta dönüştürülmüştür. Her değer göz önüne alınarak en uygun mikroşerit hat seçilip gerçek bir mikroşerit filtre elde edilmiştir ve elde edilen mikroşerit filtrenin gerçek sonuçlarıyla simülatör sonuçları karşılaştırılmıştır. Resim 4.1'de örnek bir mikroşerit filtre prototipi verilmiştir.



Resim 4.1. Mikroşerit devre tasarımı örneği [42]

4.1. Alçak Geçiren Mikroşerit Filtre Tasarımı

Mikroşerit filtre tasarımını gerçekleştirmek için CST programı tercih edilmiştir. CST programı, elektromanyetik sistemleri tasarlamak, analiz etmek ve en uygun hale getirmek için kullanılan yüksek performansa sahip bir üç boyutlu programdır. Frekans aralığı fark etmeksizin elektromanyetik alanlar da analiz edilebilir.

CST programı ile Butterworth, Chebyshev ve Eliptik frekans cevaplı filtrelerin devre tasarımları oluşturulmuştur.

İlk olarak Butterworth filtre tasarımı oluşturulmuştur. Bunun için 5. dereceden filtrelerin kesim frekansları sırasıyla 3,5; 3,8; 4,2 GHz olarak seçilmiştir.

Tasarlanacak filtrede kullanılacak yalıtkan taban FR4 ve iletken kalınlığı ise t=0,035 mm seçilmiştir. Üretimde kullanılabilecek en uygun malzemelerden bakır alttaş olarak tercih edilmiştir ve onun da kalınlığı 1,6 mm seçilmiştir.

4.1.1. Butterworth alçak geçiren filtre devresi tasarımı

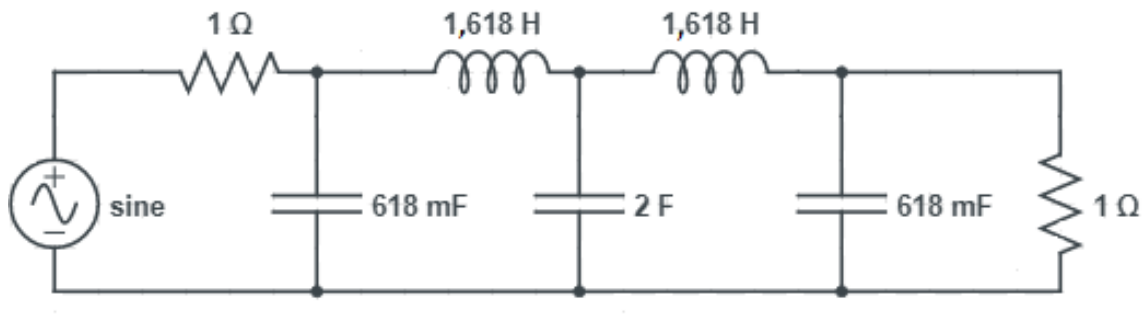
A. *Kesim frekansı 3,5 GHz olan 5. dereceden Butterworth alçak geçiren filtresi;*

5. dereceden bir Butterworth filtre oluşturmak için 7 elemanlı bir devre çizilir. Bu devrede; 2 endüktans, 3 kapasitans ve 2 empedans bulunur. Bu filtre için kullanılan değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Butterworth alçak geçiren filtre eleman değerleri

n	g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6
1	1	2	1				
2	1	1,4142	1,4142	1			
3	1	1	2	1	1		
4	1	0,7654	1,8478	1,8478	0,7654	1	
5	1	0,6180	1,6180	2	1,6180	0,6180	1

Buna göre 5. dereceden bir Butterworth filtresi Şekil 4.1'deki gibidir.



Şekil 4.1. Tasarlanan 5. dereceden Butterworth prototip devresi

Tasarımlarda kaynak ve yük empedans değeri 50 Ω seçilmiştir.

Bu prototip filtrelerden istenilen kesim frekansına ve kaynak / yük empedansına sahip devreler elde edebilmek için dönüşüm formüllerinin uygulanması gerekir.

Devredeki değerlerin uygulamada yer bulan herhangi bir empedans değerine dönüştürmek için, g_0=1 olarak kabul edilen bir prototip filtrede empedans ölçeklendirme faktörü kullanılması gerekir [37].

$$R_g = Z_0 \,/\, g_0 \quad (g_0 \text{ indüktans ise}) \tag{4.1}$$

$$R_g = g_0 \,/\, Y_0 \quad (g_0 \text{ kondüktans ise}) \tag{4.2}$$

$$Z_0 = 1 \,/\, Y_0 \tag{4.3}$$

Buradan direnç, kapasitans ve indüktans hesaplamalarına aşağıdaki eşitliklerle elde edilir [44, 45]:

$$L = \left(\frac{\Omega_c}{w_c}\right) * Rg * g \quad \text{(g, indüktansı ifade eder)} \tag{4.4}$$

$$C = \left(\frac{\Omega_c}{w_c}\right) * \frac{g}{R_g} \qquad \text{(g, kapasitansı ifade eder)} \tag{4.5}$$

Sonrasında eleman dönüşümlerinin uygulanması gerekir. Eleman dönüşüm değerleri de;

Eş. (4.1)'den direnç;

$$Rg = Z_0 \,/\, g_0 = \; 50 \,/\, 1 \; = \; 50\,\Omega$$

Eş. (4.2)'den direnç;

$$R_g = g_0 \,/\, Y_0 \;\; = \;\; 50 * 1 = \; 50\,\Omega$$

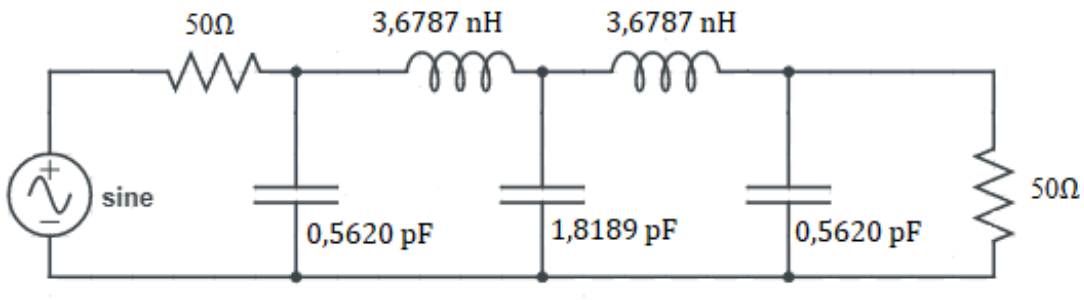
Eş. (4.1), Eş. (4.2) ve Eş. (4.3)'den indüktans ve kapasitans değerleri hesaplanarak bulunur.

$$\mathrm{L1} \;=\; \mathrm{L2} \;\; = \;\; \left(\frac{1}{2\pi * 3{,}5 * 10^9}\right) * \; 50 \; * \; 1{,}6180 \; = \; 3{,}6787\ \mathrm{nH}$$

$$\mathrm{C1} \;=\; \mathrm{C3} \;\; = \;\; \left(\frac{1}{2\pi * 3{,}5 * 10^9}\right) * \frac{0{,}6180}{50} \; = \; 0{,}5620\ \mathrm{pF}$$

$$\mathrm{C2} \; = \left(\frac{1}{2\pi * 3{,}5 * 10^9}\right) * \frac{2}{50} \; = \; 1{,}8189\ \mathrm{pF}$$

Hesaplamalar sonucunda Şekil 4.2'de görülen devre çizilmiştir.



Şekil 4.2. Kesim frekansı 3,5 GHz ve 5. dereceden (*n*=5 olan) Butterworth alçak geçiren filtre devresi

Şekil 4.2 mikroşerit tasarıma uygun bir devreye dönüştürülür. Bunun için de yüksek empedanslı ve düşük empedanslı hat parçalarına ihtiyaç duyulur. Burada seri indüktanslar yüksek empedanslı hat parçalarını, paralel kapasitörler ise düşük empedanslı hat parçalarını temsil eder.

Seri indüktansları temsil eden yüksek empedanslı hat parçaları için 150 Ω, paralel kondansatörleri temsil eden düşük empedanslı hat parçaları için ise 25 Ω kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra her bir hat parçası için elektriksel uzunluklar hesaplanmalıdır [43].

Yüksek empedanslı hat parçaları için elektriksel uzunluk;

$$\theta = \beta l = \frac{g_n Z_o}{Z_{oL}} \qquad n = 2{,}4 \text{ için} \tag{4.6}$$

olarak bulunur. Bu denklemde;

z_{o_L} = yüksek empedans hat parçası için karakteristik empedans,

z_o = devrenin giriş ve çıkışındaki karakteristik empedans,

g_n = Çizelge 4.1'deki eleman değerlerini ifade eder.

Düşük empedanslı hat parçaları için elektriksel uzunluk;

$$\theta = \beta l = \frac{g_n Z_{oC}}{Z_o} \qquad n = 1{,}3{,}5 \text{ için} \tag{4.7}$$

olarak bulunur. Bu denklemde;

z_{o_C} = düşük empedans hat parçası için karakteristik empedans,

z_o = devrenin giriş ve çıkışındaki karakteristik empedans,

g_n = Çizelge 4.1'deki eleman değerlerini ifade eder.

Bu denklemlere göre elektriksel uzunluklar;

$$\beta_{C_1} l_{C_1} = \beta_{C_3} l_{C_3} = \frac{0{,}618*25}{50} = 0{,}309 \text{ radyan} = 17{,}7044^\circ$$

$$\beta_{C_2} l_{C_2} = \frac{2*25}{50} = 1 \text{ radyan} = 57{,}2957^\circ$$

$$\beta_{L_1} l_{L_1} = \beta_{L_2} l_{L_2} = \frac{1{,}618*50}{150} = 0{,}5393 \text{ radyan} = 30{,}8996^\circ$$

olarak elde edilir. Hesaplanan elektriksel uzunluklara göre hat parçalarının uzunluk (*l*) ve genişlik (*W)* değerleri aşağıda verilen gerekli parametreleri için elde edilirler (Çizelge 4.2).

Dielektrik sabiti: ε_r = 4,3

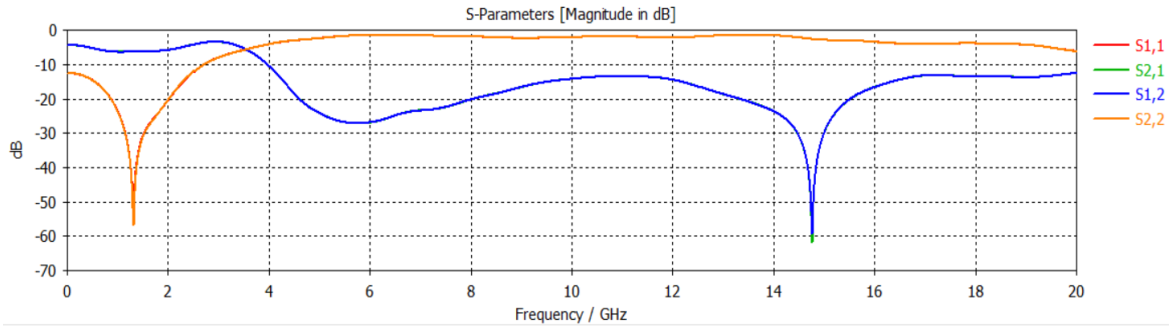
Dielektrik yüksekliği: h = 1,6 mm

Frekans: f_c = 3,5 GHz

Çizelge 4.2. Kesim frekansı 3,5 GHz olan 5. dereceden (n = 5) Butterworth yüksek ve düşük empedanslı hat parçalarına ait bilgi tablosu

Z (Ω)	$\beta l(^{\circ})$	W (mm)	l (mm)
$Z_{C_1} = Z_{C_3} = 25\ \Omega$	17,7044 °	8,4887	2,2329
$Z_{L_1} = Z_{L_2} = 150\ \Omega$	30,8996 °	0,1865	4,3873
$Z_{C_2} = 25\ \Omega$	57,2957 °	8,4887	7,2265
$Z_{in} = Z_{out} = 50\ \Omega$	13,11°	3,1118	1,7271

Bütün değerleri hesaplanan mikroşerit filtrenin S-parametreleri Şekil 4.3'de verilmiştir. Benzetim sonuç değerleri incelendiğinde kesim frekansı olan 3,5 GHz'e kadar iletimin gerçekleştiği görülmüştür. Kesim frekansı aşıldığında iletimin sönümlendiği görülmüştür. Sönüm bandında en fazla -60 dB bastırma sağlanmıştır.



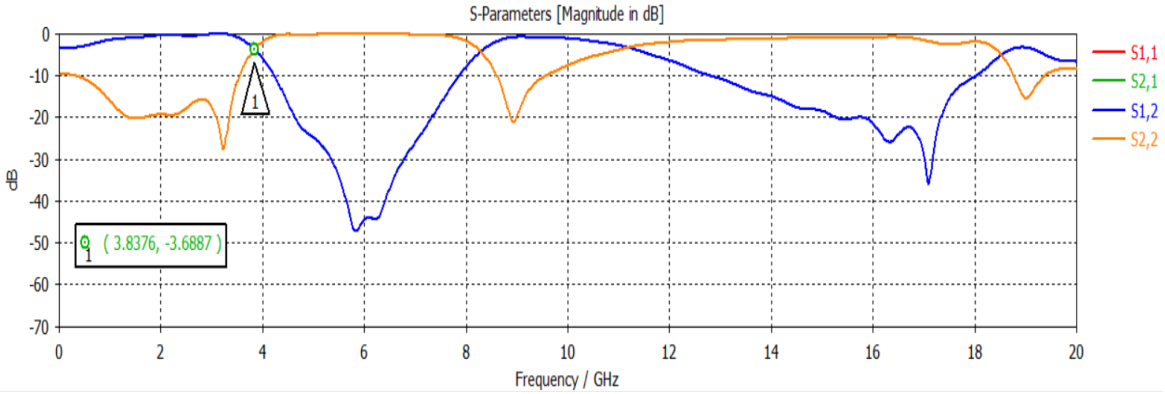
Şekil 4.3. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Butterworth 5. dereceden filtre için S-parametreleri

B. Kesim frekansı 3,8 GHz olan 5. dereceden Butterworth alçak geçiren filtresi

Bu bölümde yapılan hesaplamaların Bölüm 4.1.1 A'dan tek farkı seçilen kesim frekansıdır. Bu nedenle Eş.4.1-Eş.4.6 için hesaplamalar aynıdır.

Kesim frekansı 3,8 GHz olan alçak geçiren Butterworth 5. dereceden filtrenin S-parametreleri Şekil 4.4'de verilmiştir. Benzetim sonuç değerleri incelendiğinde kesim frekansı olan 3,8 GHz'e kadar iletimin gerçekleştiği görülmüştür. Kesim frekansı aşıldığında ise bastırma işleminin gerçekleştiği görülmüştür. Ancak Şekil 4.4'de de

görüldüğü gibi tasarlanan filtre, 8 GHz civarlarında alçak geçiren filtre özelliğini yitirmiştir.

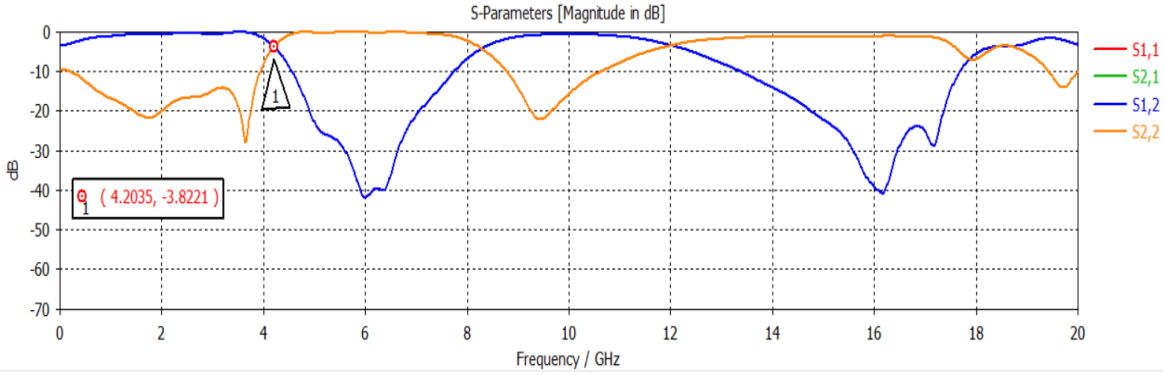


Şekil 4.4. Kesim frekansı 3,8 GHz olan alçak geçiren Butterworth 5. dereceden filtre için S-parametreleri

C. Kesim frekansı 4,2 GHz olan 5. dereceden Butterworth alçak geçiren filtresi;

Bu bölümde yapılan hesaplamaların Bölüm 4.1.1 A'dan tek farkı seçilen kesim frekansıdır. Bu nedenle Eş. 4.1-Eş. 4.6 için hesaplamalar aynıdır.

Kesim frekansı 4,2 GHz olan alçak geçiren Butterworth 5. dereceden filtrenin S-parametrelerinin benzetim sonuçları Şekil 4.5'de verilmiştir. Benzetim sonuç değerleri incelendiğinde kesim frekansı olan 4,2 GHz'e kadar iletimin gerçekleştiği görülmüştür. Kesim frekansı aşıldığında ise bastırma işleminin gerçekleştiği görülmüştür. Ancak Şekil 4.5'de de görüldüğü gibi tasarlanan filtre, 8 GHz civarlarında alçak geçiren filtre özelliğini yitirmiştir.



Şekil 4.5. Kesim frekansı 4,2 GHz olan alçak geçiren Butterworth 5. dereceden filtre için S-parametreleri

Bu üç sonuç ele alındığında sönüm bandında en fazla bastırma olan kesim frekansının 3,5 GHz olduğu görülmüştür. Bu nedenle diğer tasarlanacak filtrelerin frekansı 3,5 GHz seçilip seviyeleri değiştirilerek karşılaştırılacaktır.

D. Kesim frekansı 3,5 GHz olan 7. dereceden Butterworth alçak geçiren filtresi;

7. dereceden bir Butterworth filtre oluşturmak için 9 elemanlı bir devre çizilir. Bu devrede 3 endüktans, 4 kapasitans ve 2 empedans bulunur. Bu elemanların çizilmesi için kullanılan değerler aşağıda hesaplanmıştır [44, 45]. İki kapılı devre elemanları için

g_0 = 1.0

$g_i = 2\,sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right)$ $\quad i = 2, 3, \ldots n$ için (4.8)

$g_{n+1} = 1.0$

şeklinde hesaplanır.

7. dereceden Butterworth alçak geçiren filtresine Eş. (4.7) uygulanır. Burada n=7 olduğuna göre g_0'dan g_8'e kadar değerler alınır. Hesaplamalar sonucunda;

$g_1 = 2\,sin\left(\frac{\pi}{14}\right) = 0{,}4450$

$g_2 = 2\,sin\left(\frac{3\pi}{14}\right) = 1{,}2469$

$g_3 = 2\,sin\left(\frac{5\pi}{14}\right) = 1{,}8019$

$g_4 = 2\,sin\left(\frac{7\pi}{14}\right) = 2$

$g_5 = 2\,sin\left(\frac{9\pi}{14}\right) = 1{,}8019$

$g_6 = 2\,sin\left(\frac{11\pi}{14}\right) = 1{,}2469$

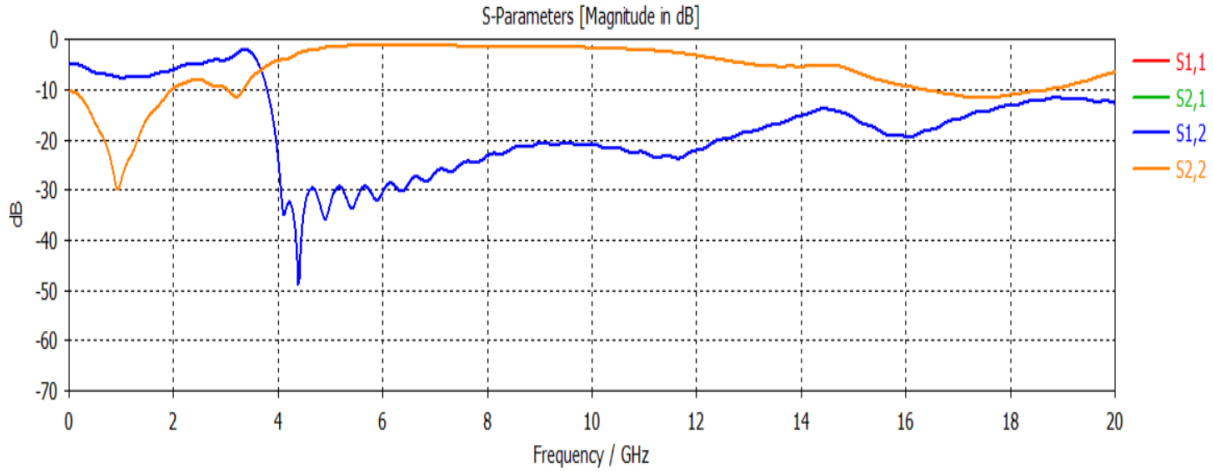
$g_7 = 2\,sin\left(\frac{13\pi}{14}\right) = 0{,}4450$

$g_8 = 1$

değerleri elde edilmiştir.

Bütün değerleri hesaplanan mikroşerit filtrenin S-parametreleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Benzetim sonuç değerleri incelendiğinde kesim frekansı olan 3,5 GHz'e kadar iletimin

gerçekleştiği görülmüştür. Kesim frekansı aşıldığında ise sönümlenmenin gerçekleştiği görülmüştür. Sönüm bandında en fazla -50 dB bastırma sağlanmıştır. Ek olarak, 4-12 GHz frekans bandı içerisinde ise -20 dB'den, 4-20 GHz frekans bandı içerisinde ise -10 dB'den daha iyi bastırma seviyeleri elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Butterworth 7. dereceden filtre için S-parametreleri

E. Kesim frekansı 3,5GHz olan 9. dereceden Butterworth alçak geçiren filtresi;

9. dereceden bir Butterworth filtre oluşturmak için 11 elemanlı bir devre çizilir. Bu devrede; 4 endüktans, 5 kapasitans ve 2 empedans bulunur. Bu elemanların çizilmesi için kullanılan değerler aşağıda hesaplanmıştır.

9. dereceden Butterworth alçak geçiren filtresine Eş. (4.7) uygulanır. Burada n=9 olduğuna göre g_0'dan g_{10}'e kadar değerler alınır.

$$g_1 = 2\,sin\left(\frac{\pi}{18}\right) = 0{,}3472$$

$$g_2 = 2\,sin\left(\frac{3\pi}{18}\right) = 1$$

$$g_3 = 2\,sin\left(\frac{5\pi}{18}\right) = 1{,}5320$$

$$g_4 = 2\,sin\left(\frac{7\pi}{18}\right) = 1{,}8793$$

$$g_5 = 2\,sin\left(\frac{9\pi}{18}\right) = 2$$

$$g_6 = 2\,sin\left(\frac{11\pi}{18}\right) = 1{,}8793$$

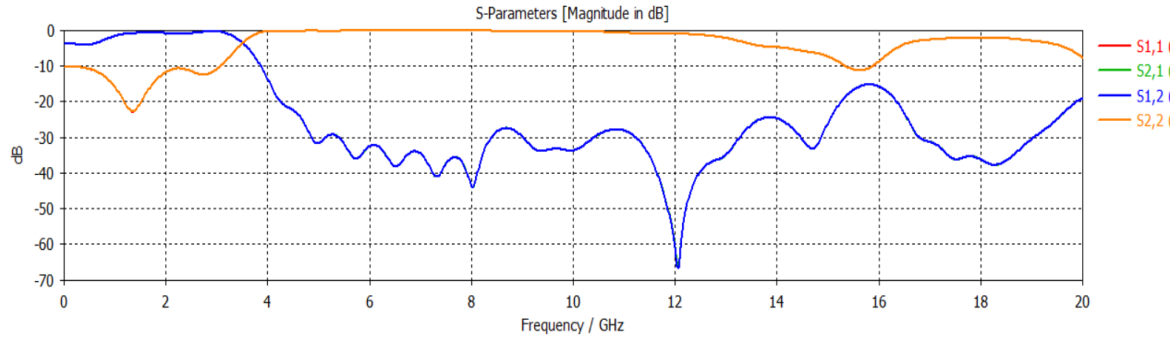
$$g_7 = 2\,sin\left(\frac{13\pi}{18}\right) = 1{,}5320$$

$$g_8 = 2\,sin\left(\frac{15\pi}{18}\right) = 1$$

$$g_9 = 2\,sin\left(\frac{17\pi}{18}\right) = 0{,}3472$$

$$g_{10} = 1$$

Bütün değerleri hesaplanan mikroşerit filtrenin S-parametreleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Benzetim sonuç değerleri incelendiğinde kesim frekansı olan 3,5 GHz'e kadar iletimin gerçekleştiği görülmüştür. Kesim frekansı aşıldığında ise sönümlenmenin gerçekleştiği görülmüştür. 4-20 GHz frekans bandı içerisinde önerilen filtrede -15 dB'den daha iyi bastırma seviye elde edilmiştir. Ek olarak sönüm bandında maksimum -65 dB bastırma sağlanmıştır.



Şekil 4.7. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Butterworth 9. dereceden filtre için S-parametreleri

4.1.2. Chebyshev alçak geçiren filtre devresi tasarımı

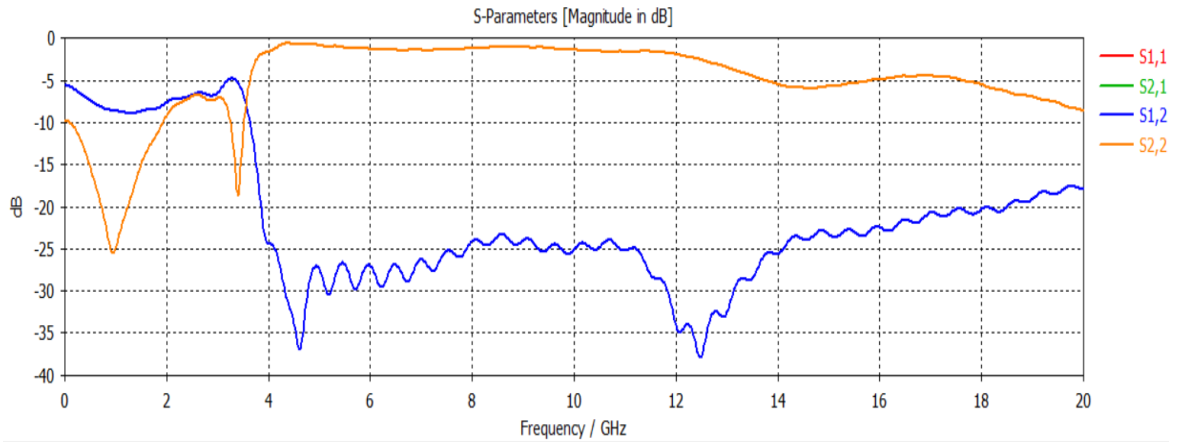
A. Kesim frekansı 3,5GHz olan 5. dereceden Chebyshev alçak geçiren filtresi;

5. dereceden bir Chebyshev filtre oluşturmak için 7 elemanlı bir devre çizilir. Bu devrede; 2 endüktans, 3 kapasitans ve 2 empedans bulunur. Bu elemanların çizilmesi için kullanılan değerler Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Chebyshev alçak geçiren filtre eleman değerleri n=5 için (0,5 dB iletim bandı dalgalanması)

n	g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0,6986	1				
2	1,4029	0,7071	1,9841			
3	1,5963	1,0967	1,5963	1		
4	1,6703	1,1926	2,3661	0,8419	1,9841	
5	1,7058	1,2296	2,5408	1,2296	1,7058	1

Bütün değerleri hesaplanan mikroşerit filtrenin S-parametreleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Benzetim sonuçlarından kesim frekansı olan 3,5 GHz'e kadar iletimin gerçekleştiği görülmüştür. Kesim frekansı aşıldığında ise sönümlenmenin gerçekleştiği görülmüştür. Sönüm bandında maksimum -37 dB bastırma sağlanmıştır. $|S_{12}|$'nin geçiş bandında salınım sorunu oluşmuştur, fakat durdurma bandı içerisinde 4-20 GHz frekans aralığında -15 dB'den daha iyi bastırma performansı elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Chebyshev 5. dereceden filtre için S-parametreleri

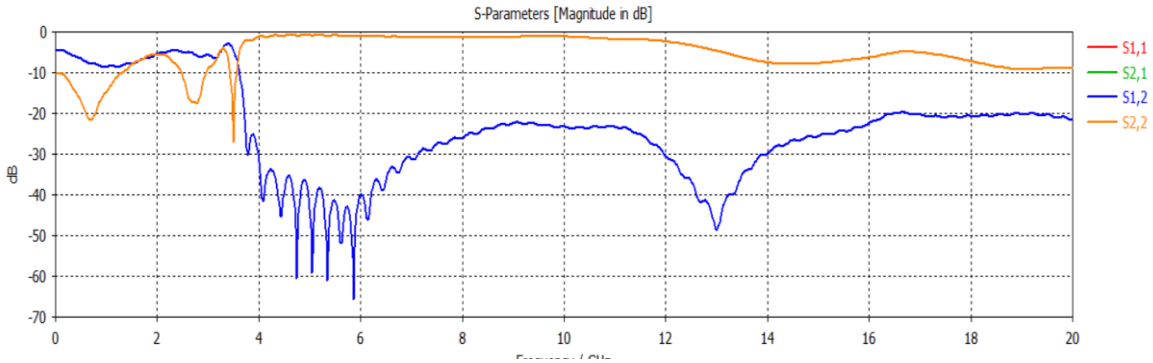
B. Kesim frekansı 3,5 GHz olan 7. dereceden Chebyshev alçak geçiren filtresi;

7. dereceden bir Chebyshev filtre oluşturmak için 9 elemanlı bir devre çizilir. Çizilen bu devrede; 3 endüktans, 4 kapasitans ve 2 empedans bulunur. Bu elemanların çizilmesi için kullanılan değerler Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Chebyshev alçak geçiren filtre eleman değerleri n=7 için (0,5 dB iletim bandı dalgalanması)

n	g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
1	0,6986	1						
2	1,4029	0,7071	1,9841					
3	1,5963	1,0967	1,5963	1				
4	1,6703	1,1926	2,3661	0,8419	1,9841			
5	1,7058	1,2296	2,5408	1,2296	1,7058	1		
6	1,7254	1,2479	2,6064	1,3137	2,4758	0,8696	1,9841	
7	1,7372	1,2583	2,6381	1,3444	2,6381	1,2583	1,7372	1

Bütün değerleri hesaplanan mikroşerit filtrenin S-parametreleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Benzetim sonuç değerleri incelendiğinde kesim frekansı olan 3,5 GHz'e kadar iletimin gerçekleştiği görülmüştür. Kesim frekansı aşıldığında ise sönümlenme görülmüştür. Sönüm bandında maksimum -60 dB bastırma sağlanmıştır. Fakat $|S_{12}|$'nin geçiş bandında salınım sorunu oluşmuştur.



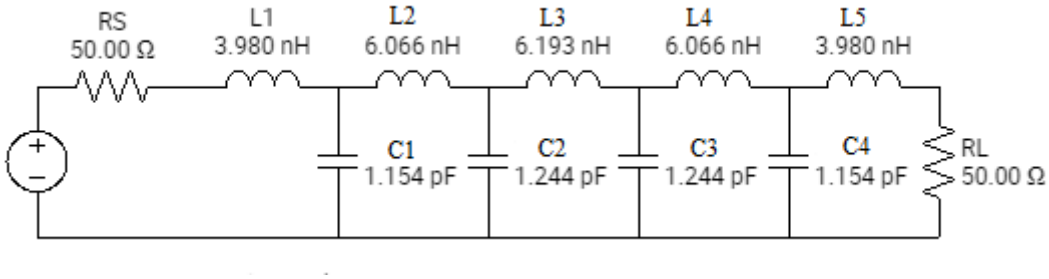
Şekil 4.9. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Chebyshev 7. dereceden filtre için S-parametreleri

C. Kesim frekansı 3,5 GHz olan 9. dereceden Chebyshev alçak geçiren filtresi;

9. dereceden bir Chebyshev filtre oluşturmak için 11 elemanlı bir devre çizilir. Bu devrede; 4 endüktans, 5 kapasitans ve 2 empedans bulunur. Bu elemanların çizilmesi için kullanılan değerler Çizelge 4.5'de verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen devre ise Şekil 4.10'da verilmiştir.

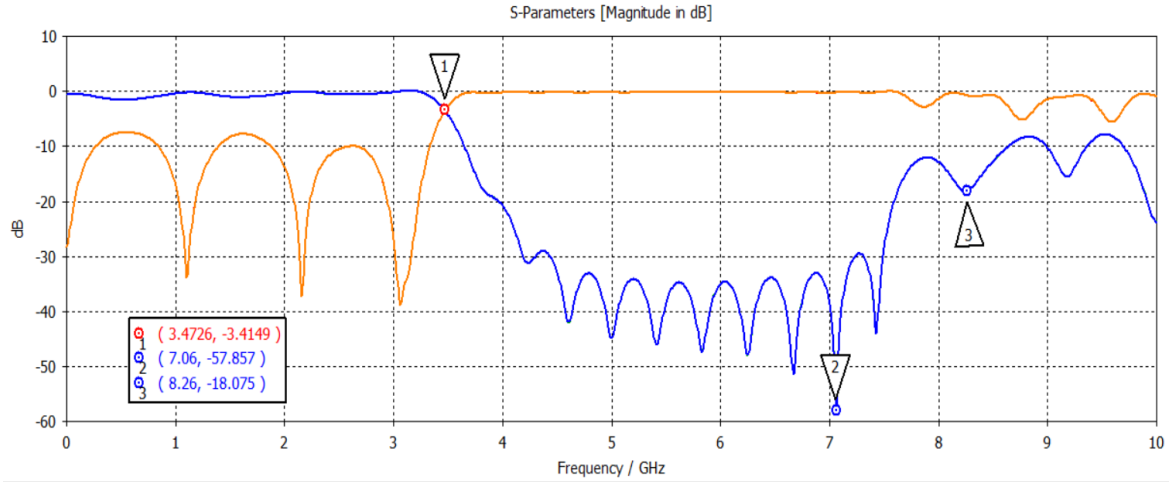
Çizelge 4.5. Chebyshev alçak geçiren filtre eleman değerleri n=9 için (0,5 dB iletim bandı dalgalanması)

n	g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9
1	0,698	1								
2	1,402	0,707	1,984							
3	1,596	1,096	1,596	1						
4	1,670	1,192	2,366	0,841	1,984					
5	1,705	1,229	2,540	1,229	1,705	1				
6	1,725	1,247	2,606	1,313	2,475	0,869	1,984			
7	1,737	1,258	2,638	1,344	2,638	1,258	1,737	1		
8	1,745	1,264	2,656	1,359	2,696	1,338	2,509	0,879	1,984	
9	1,750	1,269	2,667	1,367	2,793	1,367	2,667	1,269	1,750	1



Şekil 4.10. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Chebyshev 9. dereceden filtre devresi

S-parametresi benzetim sonuçları incelendiğinde; kesim frekansı olan 3,5 GHz'e kadar filtrenin giriş kapısına uygulanan sinyalin iletiminin gerçekleştiği, kesim frekansından daha yüksek frekans değerlerinde bastırma gerçekleştiği görülmüştür. Filtrenin 4 – 7,5 GHz frekans aralığında -30 dB seviyesinden daha iyi bir bastırma performansı sergilediği görülmüştür. Ayrıca, önerilen alçak geçiren filtrenin durdurma frekans bandı içerisinde en iyi bastırma değerinin -60 dB civarında olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, önerilen filtrenin araya girme kaybının ($|S_{21}|$) geçirme frekans bandı içerisinde -5 dB'den daha iyi olduğu görülmüştür (Şekil 4.11).



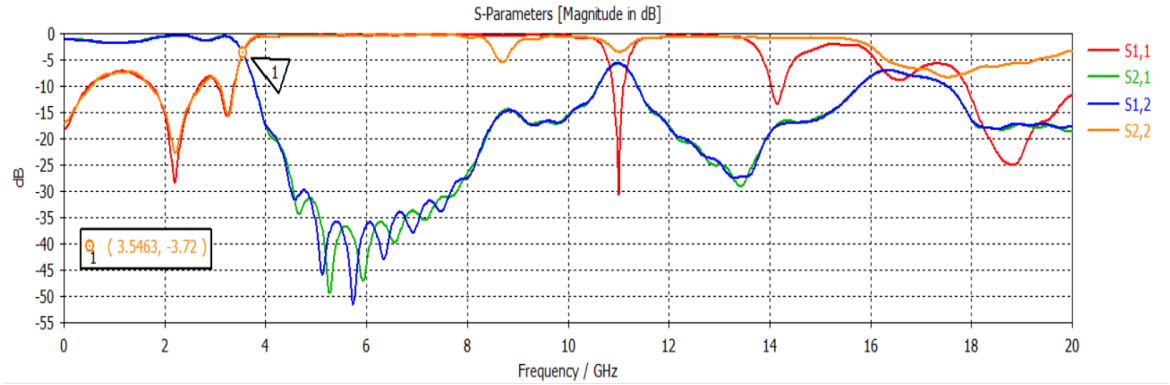
Şekil 4.11. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Chebyshev 9. dereceden filtre için S-parametreleri

4.1.3. Eliptik alçak geçiren filtre devresi tasarımı

A. Kesim frekansı 3,5 GHz olan 5. dereceden Eliptik alçak geçiren filtresi;

5. dereceden bir Eliptik filtre oluşturmak için 7 elemanlı bir devre çizilir. Bu devrede; 2 endüktans, 3 kapasitans ve 2 empedans bulunur.

Tasarlanan mikroşerit filtrenin S-parametre benzetim sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir. Kesim frekansı aşıldığında ise bastırma işleminin gerçekleştiği görülmüştür. Ancak şekilden de görüldüğü gibi tasarlanan filtre, 11 GHz civarlarında alçak geçiren filtre özelliğini yitirmiştir.

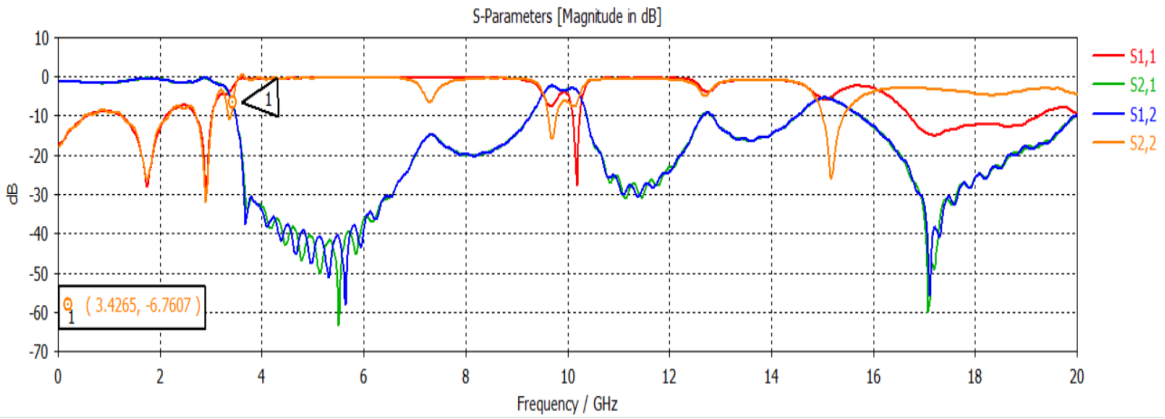


Şekil 4.12. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Eliptik 5. dereceden filtrenin S-parametreleri

B. Kesim frekansı 3,5 GHz olan 7. dereceden Eliptik alçak geçiren filtresi;

7. dereceden bir Eliptik filtre oluşturmak için 9 elemanlı bir devre çizilir. Bu devrede; 3 endüktans, 4 kapasitans ve 2 empedans bulunur.

Tasarlanan mikroşerit filtrenin S-parametre benzetim sonuçları Şekil 4.13'de verilmiştir. Kesim frekansı aşıldığında ise sönümlenme görülmüştür. Sönüm bandında en fazla -60 dB bastırma sağlanmıştır. Fakat 9,5 GHz'den itibaren $|S_{11}|$ ve $|S_{12}|$ birbiriyle aynı seviyeye geldiğinden bant geçiren özelliği göstermeye başlanmıştır.

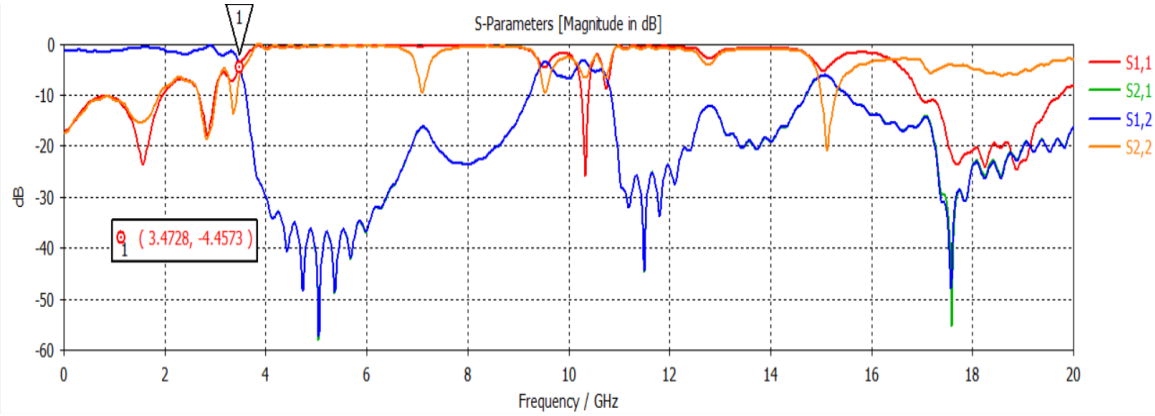


Şekil 4.13. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Eliptik 7. dereceden filtrenin S-parametreleri

C. Kesim frekansı 3,5 GHz olan 9. dereceden Eliptik alçak geçiren filtresi;

9. dereceden bir Eliptik filtre oluşturmak için 11 elemanlı bir devre çizilir. Bu devrede; 4 endüktans, 5 kapasitans ve 2 empedans bulunur.

Tasarlanan mikroşerit filtrenin S-parametreleri için benzetim sonuçları Şekil 4.14'de verilmiştir. Şekilden filtrenin alçak geçiren özelliğinin 10 GHz civarında bozulduğu görülmektedir. Bu frekans civarında filtre olarak bant geçiren özelliği gösterilmeye başlanmıştır.



Şekil 4.14. Kesim frekansı 3,5 GHz olan alçak geçiren Eliptik 9. dereceden filtrenin S-parametreleri

4.2. Kusurlu Zemin Yapısına Sahip Alçak Geçiren Mikroşerit Filtre Devresi Tasarımı

Kusurlu zemin yapısı uygulamaları, mikroşerit hattın bulunduğu metal malzemenin arka yüzeyinde yapılan fotolitografi işlemi ile elde edilir [46].

Kusurlu zemin yapısının uygulandığı yerlerde devreye sanki bir LC devresi ekleniyormuş gibi bir davranış sergilenir. Bu davranış hattın akım akışını da değiştirir [47].

Kusurlu zemin yapısı uygulamalarının sağladığı bazı avantajlı durumlardan aşağıda bahsedilmiştir [47]:

- Elektriksel performansları yüksektir,
- Kapladıkları alan azdır,
- Modellenmesi kolaydır,
- Üretmesi oldukça basittir,
- Maliyetli değildir,
- Oluşmuş harmonikleri bastırma özelliğine sahiptirler,
- Durdurma bantlarının ani ve geniş olmasını sağlarlar.

Kusurlu zemin yapısı ile bir kesme frekansı (f_c) ve zayıflama kutup frekansı (f_0) elde edilir. Kesme frekansı, ekleme kaybının geçiş bandının 3 dB altında olduğu frekanstır. Zayıflama kutup frekansı ise endüktans ve kapasitans elemanlarının kombinasyonu ile elde edilebilir [15].

Mikroşerit hattı, kusurlu zemin yapısı kullanılarak bant durdurma yanıtı sergiler ve frekans özellikleri, aşağıdaki denklemler kullanılarak indüktans ve kapasitans ile hesaplanabilir.

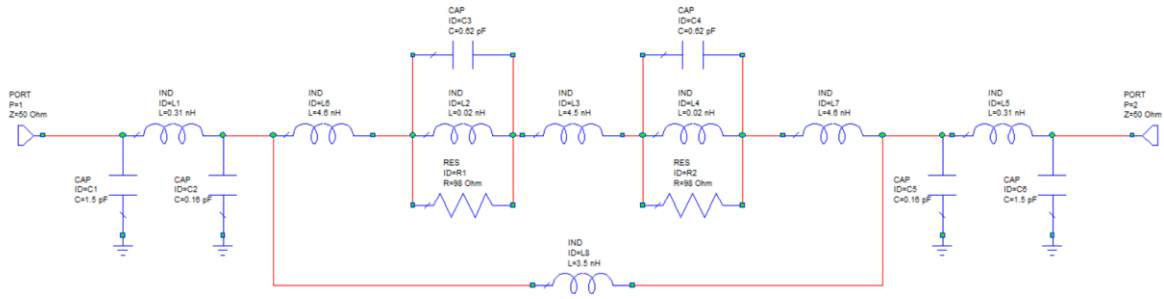
$$L = \frac{1}{4\pi^2 {f_0}^2 C} \tag{4.9}$$

$$\mathrm{C} = \frac{f_c}{2Z_0} \cdot \frac{1}{2\pi({f_0}^2 - {f_c}^2)} \tag{4.10}$$

$$\mathrm{R} = \frac{2Z_0}{\sqrt{\frac{1}{|S_{11(W_0)}|^2} - \left(2Z_0\left(w_0 C - \frac{1}{w_0 L}\right)\right)^2} - 1} \tag{4.11}$$

$$w_c C = \frac{1}{Z_{0C}} \sin\left(\frac{2\pi l_C}{\lambda_{gC}}\right) + 2 * \frac{1}{Z_{0L}} \tan\left(\frac{\pi l_L}{\lambda_{gL}}\right) \tag{4.12}$$

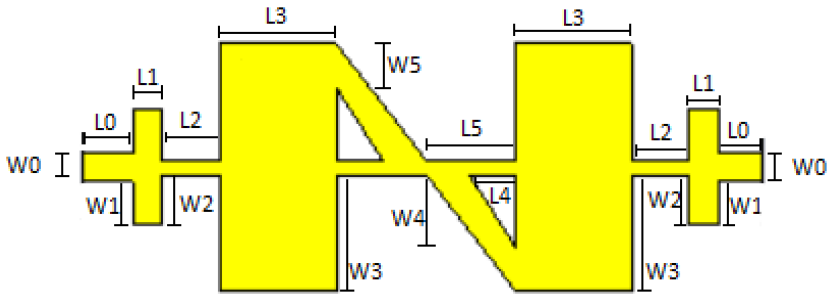
Yukarıdaki eşitliklerde Z_{0C}, l_C, l_L, w_c, λ_{gC} ve λ_{gL} sırasıyla; karakteristik empedansı, eklenen kapasitörün fiziksel uzunluğunu, seri reaktansın fiziksel genişliğini, eklenen kapasitansın genişliğini ve yönlendirilmiş dalga boylarını ifade eder. Bu hesaplamalardan kusurlu zemin yapısının empedansı 0,02 nH, kapasitansı 0,62 pF ve direnci 98 Ω olarak bulunur. Bulunan değerler Şekil 4.15'teki devrede gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Önerilen kusurlu zemin yapısı şeklinin devre modeli

Bu tez çalışmasında, kesim frekansı yaklaşık olarak 3,3 GHz olan kusurlu zemin yapısına sahip bir filtre tasarlanması amaçlanmıştır. Mikroşerit filtrenin ön yüzeyindeki bakır devre "N" şekline benzer bir şekilde oluşturulmaya çalışılmıştır. Filtrenin ön yüzü Şekil 4.16'daki gibi tasarlanmıştır. Tasarlanan alçak geçiren filtrenin boyutları;

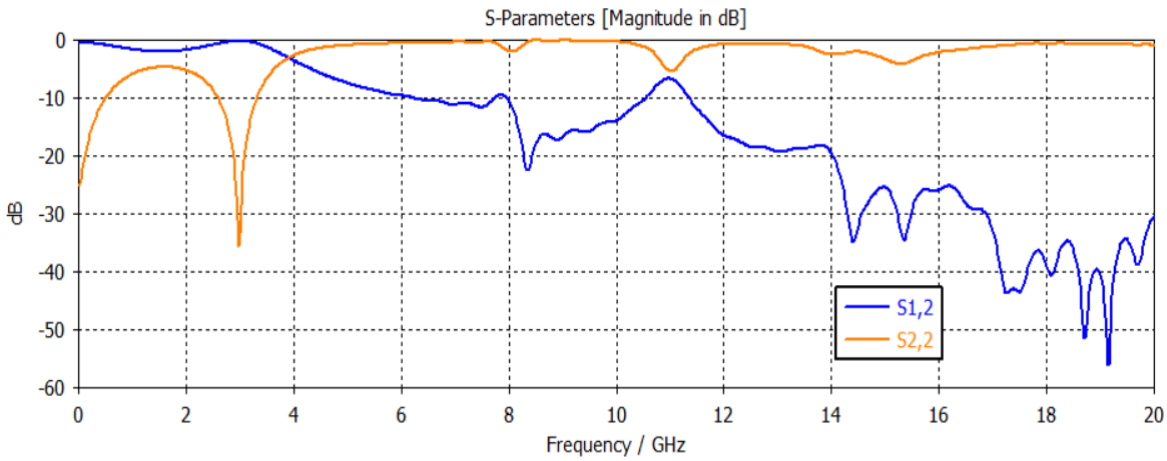
Boylar için; L_0= 1,78 mm, L_1= 1 mm, L_2= 2 mm, L_3= 4 mm, L_4= 1,6 mm, L_5= 3,10 mm ve Genişlikler için; W_0= 1,02 mm, W_1= 1,49 mm, W_2= 1,75 mm, W_3= 4 mm, W_4= 2,5 mm, W_5=1,5 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.16. Alçak geçiren filtrenin ön yüzeyi

Alçak geçiren filtre ünitesinde öncelikle kusurlu zemin yapısı elde edilmeden S-parametre sonucu Şekil 4.17'deki gibi modellenmiştir. Burada kesim frekansı 3,95 GHz'dir.

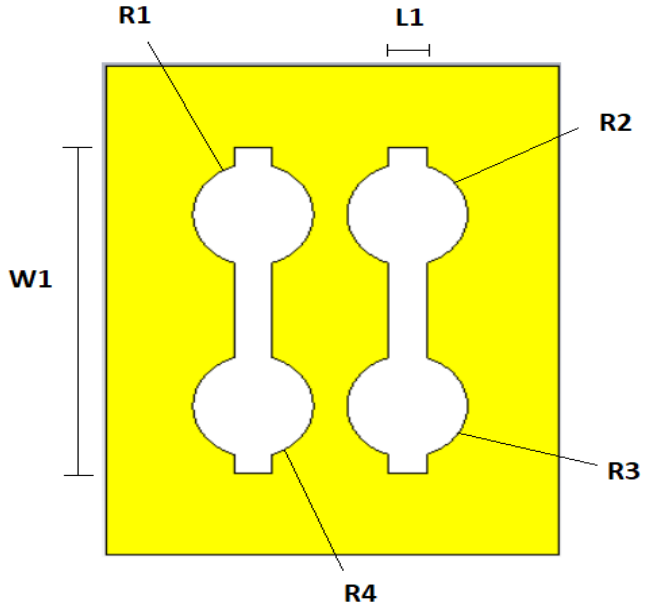
Filtre tasarımı simetrik ve karşılıklı iki kapılı bir devre olduğundan devrede giriş ve çıkış yansıma kayıpları ($|S_{11}|=|S_{22}|$) ile araya girme kaybı ve izolasyon ($|S_{21}|=|S_{12}|$) değerleri birbirine eşittir. Kusurlu zemin yapısı olmayan filtrenin S-parametresi benzetim sonuçlarına göre kesim frekansının 3,95 GHz olduğu ve yansıma kayıplarının ise -5 dB seviyesinde olduğu görülmüştür. Ayrıca, filtrenin geçirme bandı içerisinde araya girme kaybının ($|S_{21}|$) -2 dB'den iyi olduğu ve durdurma bandında ise 20 GHz'e kadar en az -7 dB bastırma performansı sergilediği ve kesim frekansından sonra net bir bastırma sağlanamadığı görülmüştür. Elde edilen S-parametresi benzetim sonuçlarına göre önerilen filtrenin zemin yapısına eklenecek kusurlarla devrenin giriş/çıkış yansıma kayıplarının -10 dB'den iyi hale getirilerek bastırma seviyesinin ise en az -20 dB olması hedeflenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Kusurlu zemin yapısına sahip olmayan devrenin S-parametreleri

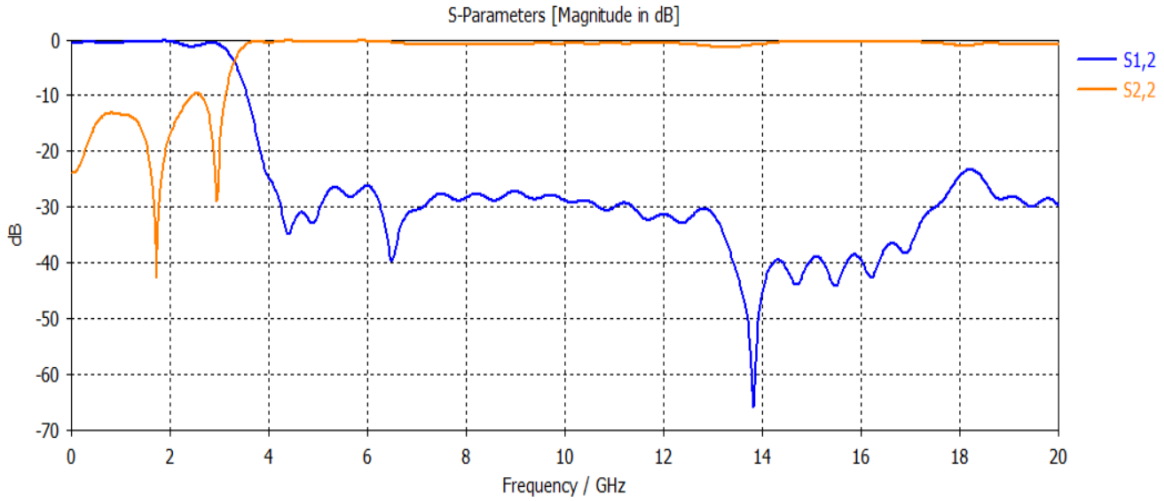
Yukarıda bahsedilen düzeltilmesi gereken durumlar için birçok kusurlu yapı oluşturulmuştur, fakat en başarılı olan yapı aşağıda verildiği gibidir.

S-parametre sonuçlarını iyileştirmek için Şekil 4.18'deki gibi filtreye aşındırma uygulanmıştır. 50 Ω mikroşerit hattının altındaki metal plaka, R_1, R_2, R_3 ve R_4 yarıçapına sahip tam dairelerle aşındırılmıştır. Daireler dışında ayrıca iki adet dikdörtgenle de aşındırma yapılmıştır. Dikdörtgenlerin her birinin boyu L_1, genişlikleri de W_1 kadardır. Şekil 4.18'de gösterildiği gibi, L endüktansı, C kapasitansı ve kesim frekansı f_c; R_1= R_2= R_3= R_4= 3 mm yarıçapları, L_1= 2 mm boyu ve W_1= 20 mm genişliğine sahip kusura göre belirlenir.



Şekil 4.18. Bakır levha üzerinde oluşturulan kusur

Kusurlu zemin sonucu oluşan S-parametrelerinin değişimi Şekil 4.19'de verilmiştir.



Şekil 4.19. Kusurlu zemin yapısına sahip olan devrenin S-parametreleri

Kusurlu zemin yapısına sahip mikroşerit filtrenin S-parametreleri incelediğinde, kesim frekansının istenilen seviyelere, yani 3,3 GHz'e yaklaştığı görülmektedir.

Elde edilen benzetim sonuçlarına göre giriş yansıma kaybı ($|S_{11}|$), geçiş bandı içerisinde -10 dB'den daha düşük seviyelerde elde edilmiştir. Ek olarak, $|S_{11}|$'in söndürme bandı içerisinde ise -1,5 dB'nin altına hiç düşmediği görülmektedir. Yani $|S_{11}|$'in durdurma bandındaki dalgalanması en kötü -5 dB'den -1,5 dB seviyesine gelmiştir. $|S_{11}|$'in dalgalanma sorunu aslında kusurlu zemin yapısıyla çözülmüştür.

$|S_{22}|$'in grafiğinden geçiş bandında dalgalanma sorunu olmadığı görülmektedir, yani kusurlu yapı mevcut $|S_{22}|$ grafiğinin geçiş bandını bozmamıştır. Durdurma bandında ise hedeflenmiş olan en kötü bastırma -23 dB seviyelerine gelmiştir, 20 GHz'e kadar hesaplanmış olup hiç bu seviyenin altına düşmediği görülmüştür. Kesim frekansından sonraki bastırma -35 GHz seviyelerindedir. Maksimum bastırma ise -65 dB civarındadır.

4.3. Tasarlanan Mikroşerit Filtrenin Üretimi

Yukarıdaki bölümlerde benzetim sonuçlarının elde edilmesinden sonra kesim frekansı 3,5 GHz olan 9. dereceden Chebyshev alçak geçiren filtresinin ve kesim frekansı 3,3 GHz olan kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin üretilmesine karar verilmiştir.

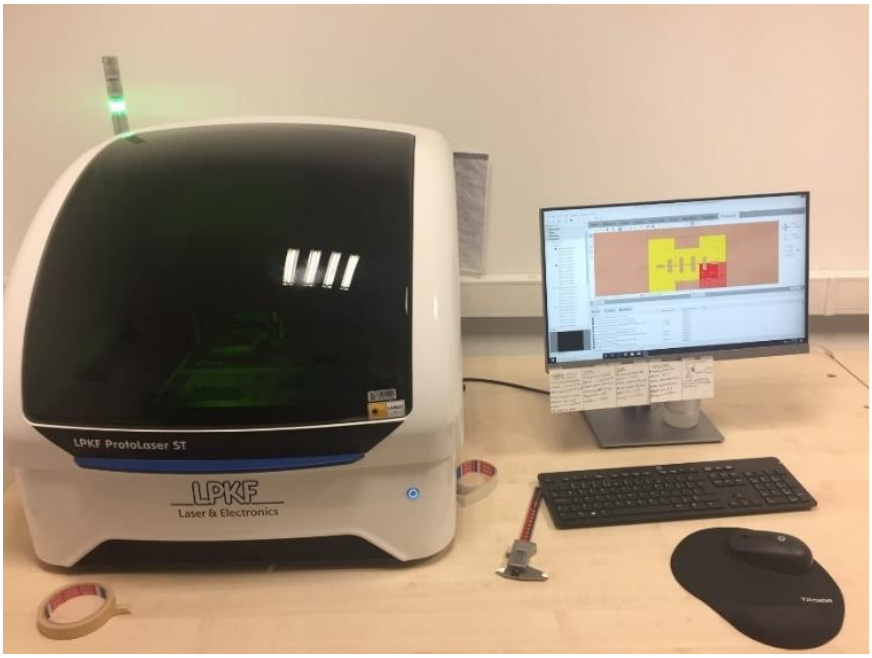
İki tip filtrenin ilk önce elektromanyetik benzetimleri yapılmış ve tasarımı doğrulamak için FR4 alttaş üzerinde üretilerek S-parametresi ölçümleri gerçekleştirilmiştir, metal olarak ise bakır seçilmiştir. Devre tasarımında baskı devre kartı (printed circuit board - PCB) üzerine mikroşerit teknolojisi kullanılmıştır.

Prototip üretimi FR4 dielektrik alttaş malzemesi kullanılarak LPKF lazer prototipleme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. LPKF teknolojisi lazer kaynak teknolojisi olarak geçmektedir. LPKF ile plastik olan parçalar güvenilir ve kalıcı bir biçimde birleştirilir, ayrıca kullanılan parçalar üzerinde mekanik, kimyasal ve termel bir stres oluşturulmaz.

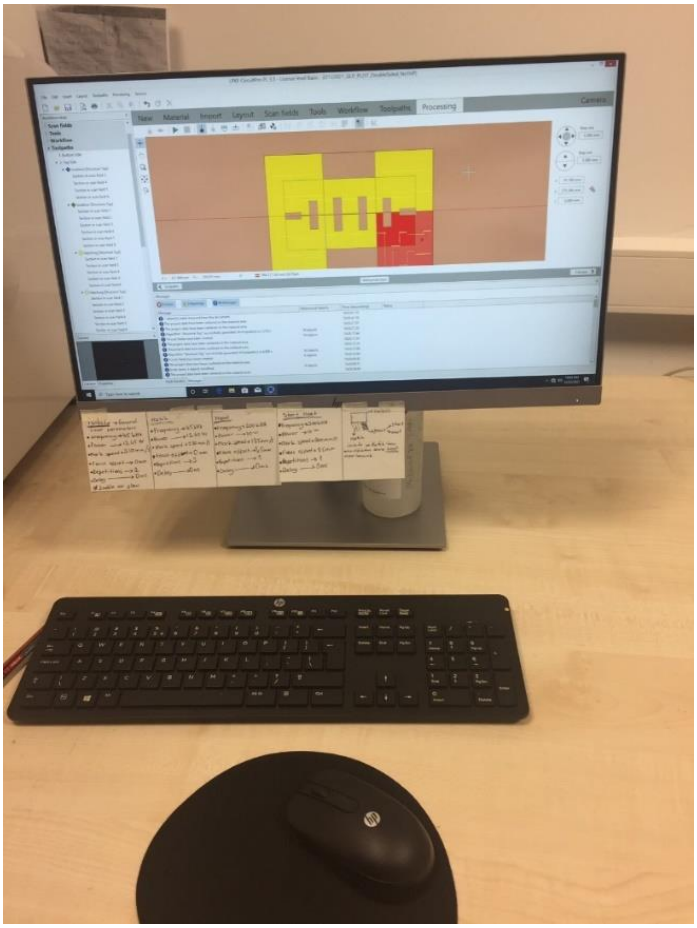
LPKF'nın avantajları [48];

- Kalite standardı yüksektir,
- İşlem kurulumu basittir,
- Kısa sürede etkili bir işlem gerçekleştirilir,
- Bakım ihtiyacı düşüktür,
- İş kurulumu kolaydır,
- Her işlemde aynı kalitede sonuç alınır,
- Yüzeyde partikül, kimyasal veya hasar bırakmaz.

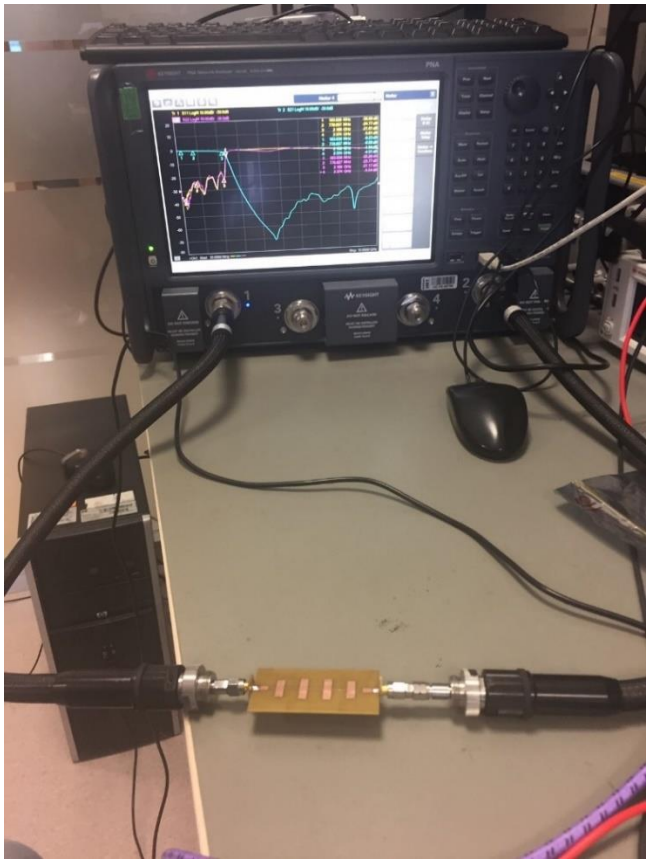
Üretim gerçekleştirilirken her iki yüzü de bakır kaplı olan FR4 dielektrik alttaş LPKF cihazında kazınmak suretiyle CST programında tasarlanan filtre serimine uygun olarak bakır plaka üzerine filtre deseni oluşturulmuştur. Kart kazıma işlemi tamamlanan filtrenin daha sonra giriş ve çıkış portlarına ölçüm yapabilmek amacıyla SMA konektörler lehimlenmiştir. Üretim sırasındaki görüntüler Resim 4.2 – Resim 4.5'de verilmiştir.



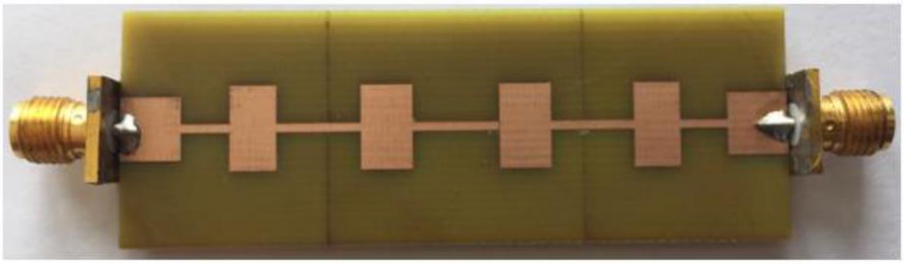
Resim 4.2. Mikroşerit devrenin cihaz içinde üretimi



Resim 4.3. Bilgisayar üzerinden üretim aşamalarının gösterimi

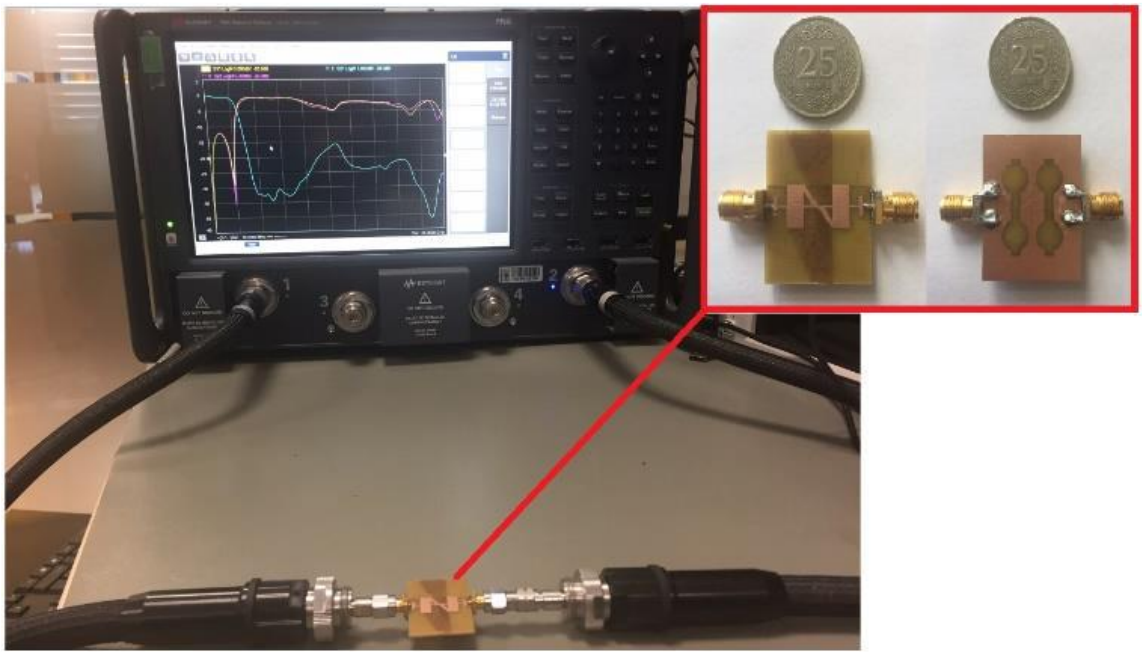


Resim 4.4. Üretilen mikroşerit filtrenin sembolik gösterimi



Resim 4.5. Üretilen Chebyshev mikroşerit filtresi

Resim 4.6'da S-parametresi test düzeneği ile ölçüm altındaki önerilen kusurlu zemin yapılı alçak geçiren filtre gösterilmektedir. S-parametresi ölçümleri Keysight firmasının N5224B network analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektriksel testlere başlamadan önce network analizörün referans noktalarından Keysight firmasının N4691B model elektronik kalibrasyon kiti ile kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen S-parametresi ölçüm sonucuna göre üretilen filtrenin kesim frekansının 3,15 GHz olduğu ve Elektromanyetik Benzetim (EM) sonuçlarında elde edilen 3,3 GHz kesim frekansı değerine yakın olduğu görülmüştür.

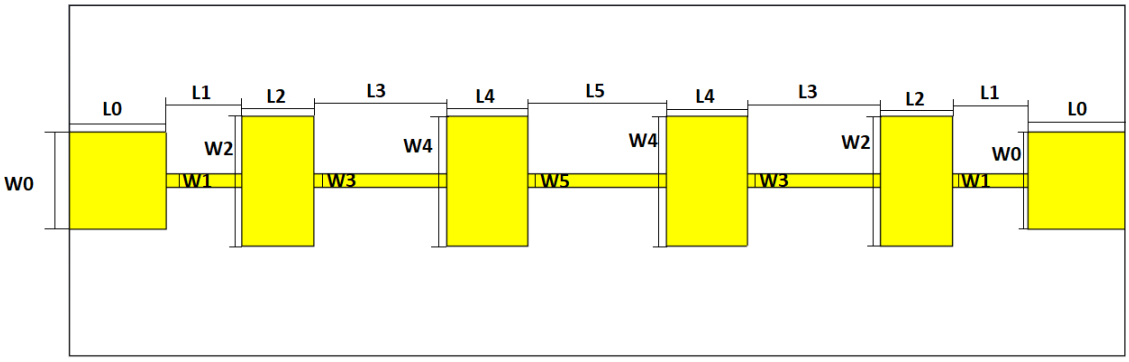


Resim 4.6. Üretilen kusurlu zemin yapısına sahip mikroşerit filtre

4.4. Benzetim ve Üretim (Ölçüm) Sonuçlarının Karşılaştırılması

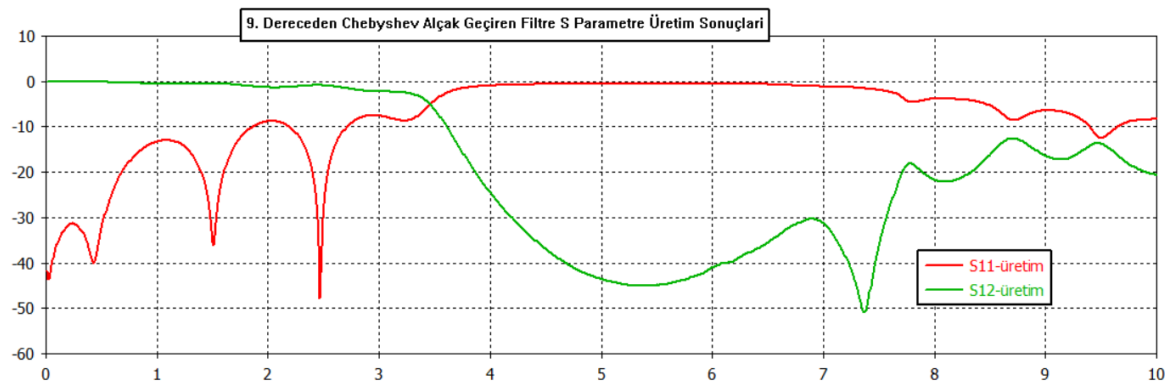
4.4.1. Benzetim ile elde edilen ve üretilen kesim frekansı 3,5 GHz olan 9. dereceden Chebyshev alçak geçiren filtre

Şekil 4.11'de verilen, kesim frekansı 3,5 GHz olan 9. dereceden Chebyshev alçak geçiren filtrenin CST programında çizilmiş olan devre serimi Şekil 4.20'da gösterilmiştir. Filtre tasarımında, giriş ve çıkış iletim hatları 50 Ω empedansa uyumlanmış olup hat genişliği W_0=2,95 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, önerilen filtrenin geçirme bandının DC - 3,5 GHz olacak şekilde tasarlanması için, tasarımda indüktans görevinde kullanılan iletim hatlarının genişlikleri; W_1=W_3=W_5=0,4217 mm, kapasitansların genişlikleri ise W_2=W_4=4 mm olarak seçilmiştir. İletim hatlarının uzunlukları ise; L_0= 5,956 mm, L_1= 4,657 mm, L_2=4,512 mm, L_3=8,190 mm, L_4= 5,037 mm, L_5=8,509 mm olacak şekilde tasarımda kullanılmıştır.

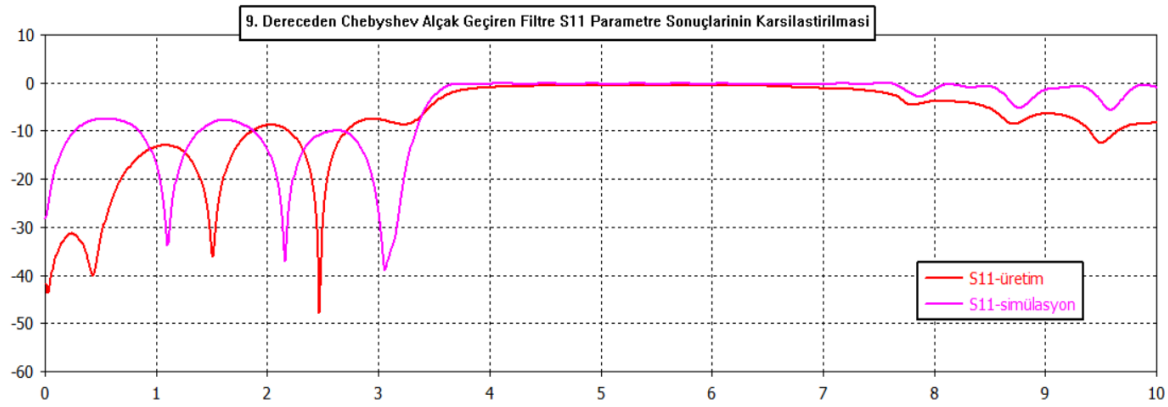


Şekil 4.20. Chebyshev alçak geçiren filtre tasarımına ait devre

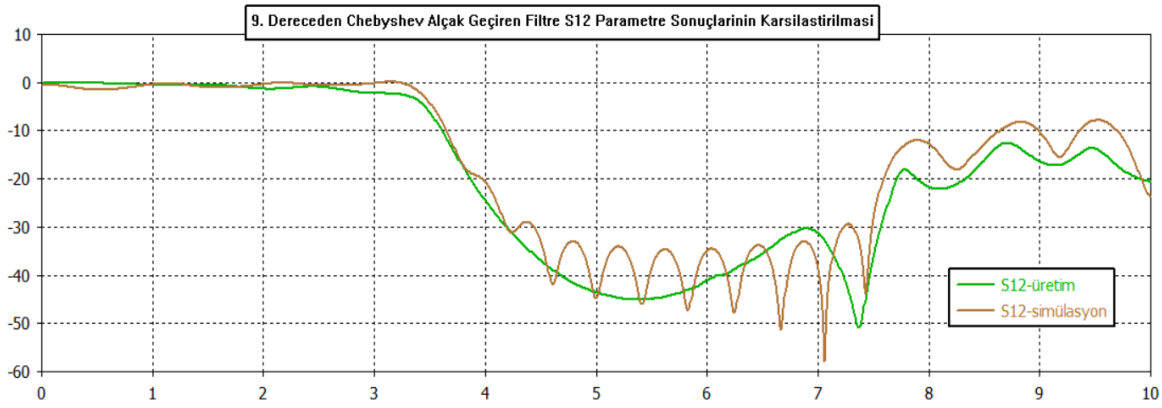
Şekil 4.21-Şekil 4.23'te 9. dereceden Chebyshev geleneksel alçak geçiren filtresinin benzetim ve üretim sonuçları karşılaştırılmıştır. Birbirine simetrik bir devre olduğundan $|S_{11}|=|S_{22}|$ ve $|S_{12}|=|S_{21}|$ değerleri birbirine eşittir. Elde edilen sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. S-parametresi benzetim sonuçları incelendiğinde kesim frekansı olan 3,5 GHz'e kadar filtrenin giriş portuna uygulanan sinyalin iletiminin gerçekleştiği ve kesim frekansından yüksek frekans değerlerindeki sinyallerin ise 4–7,5 GHz frekans aralığında -30 dB seviyesinden daha iyi bir bastırma performansı sergilediği görülmüştür. Ek olarak, önerilen alçak geçiren filtrenin durdurma frekans bandı içerisinde en iyi noktada yaklaşık -50 dB seviyesine kadar bir bastırma performansı sağladığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, önerilen filtrenin araya girme kaybının ($|S_{21}|$) geçirme frekans bandı içerisinde -5 dB'den daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 4.21. Chebyshev 9. dereceden filtreye ait alçak geçiren filtrenin üretim sonucunun S grafiği



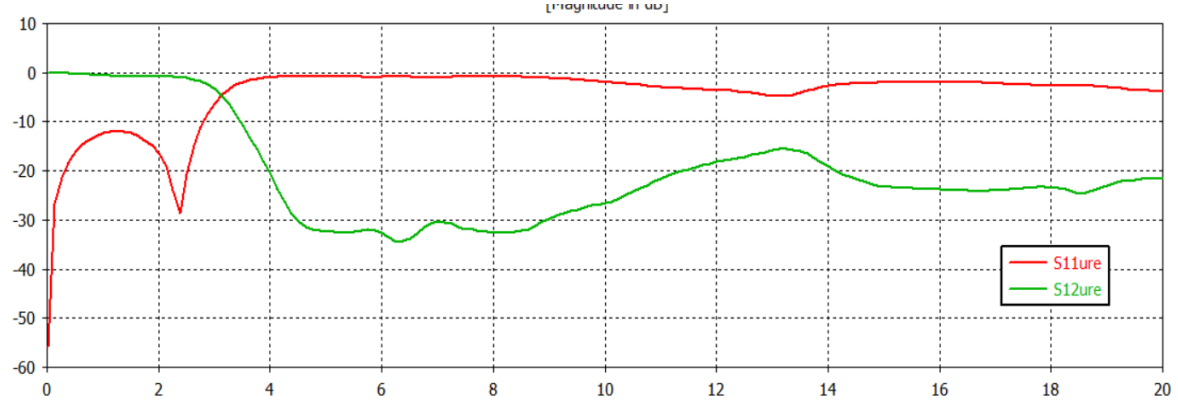
Şekil 4.22. Chebyshev 9. dereceden filtreye ait alçak geçiren filtrenin $|S_{11}|$ parametre sonuçlarının karşılaştırılması grafiği



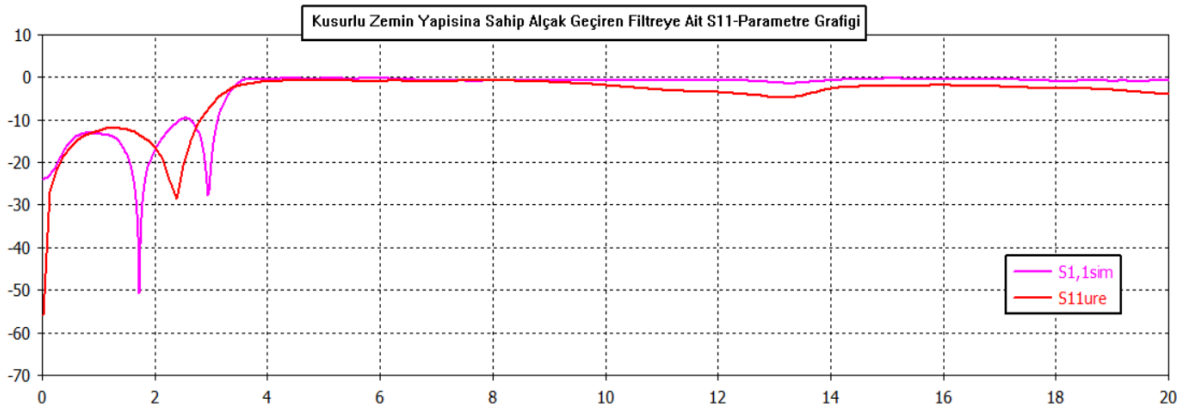
Şekil 4.23. Chebyshev 9. dereceden filtreye ait alçak geçiren filtrenin $|S_{12}|$ parametre sonuçlarının karşılaştırılması grafiği

4.4.2. Benzetim ile elde edilen ve üretilen kusurlu zemin yapısına sahip alçak filtre

Üretilen kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin S-parametresi ölçüm sonuçları Şekil 4.24'te verilmiştir. Şekil 4.25'de kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtresinin $|S_{11}|$ benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzetim sonucuna göre $|S_{11}|$'in geçiş bandının en kötü noktası -10 dB iken üretimin -12 dB'dir, durdurma bandında ise benzetim ve üretim sonucunun en kötü çıktığı noktalar 13,25 GHz civarıdır ve sırasıyla -1,4 dB ve -4,5 dB'dir.

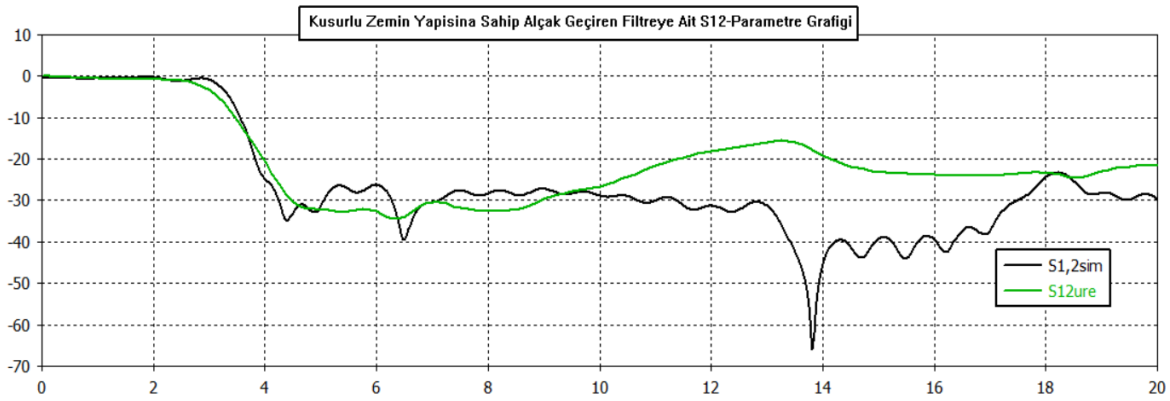


Şekil 4.24. Üretilen kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin S-parametreleri



Şekil 4.25. Kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin $|S_{11}|$ parametre sonuçları

Şekil 4.26'da da kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtresinin $|S_{12}|$ benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre $|S_{12}|$'in geçirme bandı içerisinde oldukça düz olduğu ve kazanç dalgalanması göstermediği görülmüştür. Ek olarak, durdurma bandında ise kesim frekansından sonraki bastırma seviyesinin benzetim ve ölçüm sonucunda benzer bir şekilde bastırma keskinliğine sahip olduğu ve sırasıyla -34,6 dB ve -31,4 dB seviyelerinde elde edildikleri görülmüştür. Benzetim sonuçlarına göre en kötü bastırma noktası olan 18,24 GHz frekansında -23,3 dB bastırma elde edilirken, ölçüm sonuçlarında en kötü bastırma seviyesi -15,6 dB olarak 13,27 GHz frekans değerinde elde edilmiştir. Ölçüm sonuçlarında ise 3,5 - 20 GHz frekans aralığında yaklaşık olarak en düşük -15,6 dB bastırma seviyesine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca en yüksek bastırma seviyesi benzetim sonuçlarında 13,8 GHz frekans değerinde -65 dB seviyesinde elde edilirken, ölçüm sonuçlarında en yüksek bastırma seviyesi -35 dB ile 6,3 GHz frekans değerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.26. Kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin $|S_{12}|$ parametre sonuçları

Literatürdeki kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtre uygulamaları incelendiğinde, elde edilen S-parametre sonuçlarının birçok güçlü yönü olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.6'da da literatürdeki örneklerle kendi çalışmamızdaki sonuçlar karşılaştırılmıştır. İncelenen çalışmalarda kesim frekansları birbirlerine yakın seçilmeye çalışılmıştır. Kesim frekansları çizelgedeki "f_c" sütununda verilmiştir.

Üretilen alçak geçiren filtrelerin boyutları "alan" sütununda incelenmiştir. Burada en düşük alana sahip filtre 90 mm^2, en büyük alana sahip filtre ise 356 mm^2 alana sahiptir. Bu çalışmada ise filtrenin alanı 161,6 mm^2'dir, ortalama bir büyüklüğe sahiptir.

Bastırma bant aralıklarında ise S-parametre sonuçları incelenmiştir. Burada -20 dB ve altındaki bastırmalar baz alınarak "Bastırma bant aralığı" sütununa işlenmiştir. Bu karşılaştırmada bizim çalışmamızdaki bant genişliği 16,5 GHz iken, bizim çalışmamıza en yakın bant genişliği 6 GHz ile [52]'inci çalışmaya aittir. Buradan elde ettiğimiz bastırmanın ne kadar iyi olduğunu da görmüş oluyoruz.

Ayrıca $|S_{12}|$'lerinin de en fazla bastırmaya sahip olduğu noktalar "$|S_{12}|_{max}$" sütununda verilmiştir. Burada da en yüksek bastırmaya sahip çalışma yine bu çalışmadır ve -65 dB bastırmaya sahiptir. Bu çalışmaya en yakın bastırma -60 dB ile [51]'inci çalışmaya aittir.

Çizelge 4.6. Tasarlanan kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin literatürdeki benzerleriyle karşılaştırması

Kaynakça	f_c [GHz]	Bastırma bant aralığı [GHz]	Alan[mm^2]	$\|S_{12}\|_{max}$ [GHz]
[49]	3,4	4,5-6,5	144,8	-12
[50]	3,15	3,4-3,6	356	-40
[51]	3,65	6-10	90	-60
[52]	2,36	4-10	231,35	-45
Bu çalışma	3,3	3,5-20	161,6	-65

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, iki adet alçak geçiren mikroşerit filtre tasarlanıp, üretilerek ölçülmüştür. Önerilen filtre tasarımlarının benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

İlk filtre 9. dereceden Chebyshev filtre, ikincisi ise kusurlu bir zemin yapısına sahip filtredir. İki filtre için de 5G haberleşmeye uygun kesim frekansları seçilmiştir. Geleneksel Chebyshev filtrenin kesim frekansı 3,5 GHz iken kusurlu zemin yapısına sahip olan filtrenin kesim frekansı 3,3 GHz'dir. İki filtrede de tasarlanırken kapasitans ve indüktanslar kullanılmıştır ve tasarımları CST programında gerçekleştirilmiştir. CST programında alttaş olarak dielektrik sabiti 4,4 olan FR4 seçilmiş ve kalınlığı 1,55 mm seçilmiştir. Ayrıca mikroşerit iletimi için kullanılacak metal bakır seçilmiş olup kalınlığı da 0,035 mm seçilmiştir.

Geleneksel Chebyshev mikroşerit filtre sonuçlarında, $|S_{12}|$ geçiş bantlarında dalgalanma gözlemlenmemiştir. Bastırma benzetimde en fazla -52 dB iken üretimde -58 dB'dir. 7,5 GHz'den sonra bastırma -10 dB seviyesine kadar düşmüştür. Fakat 4 –7,5 GHz aralığında her iki sonuç da -30 dB bastırmanın altına düşmeyerek iyi bir performans sergilemiştir.

Kusurlu zemin yapısına sahip alçak geçiren filtrenin öncelikle $|S_{11}|$ benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzetim sonucuna göre $|S_{11}|$'in geçiş bandının en kötü noktası -10 dB iken üretimin -12 dB'dir, durdurma bandında ise benzetim ve üretim sonucunun en kötü çıktığı noktalar 13,25 GHz civarıdır ve sırasıyla -1,4 dB ve -4,5 dB'dir. Sonrasında $|S_{21}|$ benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre $|S_{21}|$'in geçirme bandı içerisinde kazanç dalgalanması olmamıştır. Durdurma bandında ise kesim frekansından sonraki bastırma seviyesinin benzetim ve ölçüm sonucunda benzer bir şekilde bastırma keskinliğine sahip olduğu ve sırasıyla -34,6 dB ve -31,4 dB seviyelerinde elde edildikleri görülmüştür. Benzetim sonuçlarına göre en kötü bastırma noktası olan 18,24 GHz frekansında -23,3 dB bastırma elde edilirken, ölçüm sonuçlarında en kötü bastırma seviyesi -15,6 dB olarak 13,27 GHz frekans değerlerinde elde edilmiştir.

Her iki tasarım için de elde edilen benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında Chebyshev filtresinin 7,5 GHz'den yüksek frekans değerlerini istenilen seviyede bastıramadığı, bunun yanında kusurlu zemin yapısına sahip filtrenin ise 20 GHz'den daha yüksek frekans değerlerine kadar bastırma bandına sahip olduğu görülmüştür. Ek olarak, kusurlu zemin yapısına sahip filtrenin giriş yansıma kaybının ($|S_{11}|$) geçirme frekans

bandında geleneksel filtre yapısına kıyasla daha iyi seviyelerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, Chebyshev prototipinin benzetim ve üretim sonuçları birbirleriyle daha benzerdir, bu yönüyle kusurlu zemin yapısına sahip filtreden daha başarılıdır. İki tasarımın üretim ve simülasyon sonuçlarının farklı olmasının nedeni filtrenin üretiminden sonraki ölçüm aşamasında kondüktör eklenerek ölçümün yapılmasıdır.

Elde edilen sonuçlarda geleneksel Chebyshev tipi alçak geçiren filtre için benzetim ve ölçüm sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Chebyshev tipi alçak geçiren filtre yapısının dar bantlı (4 -7,5 GHz) bir bastırma aralığına sahip olduğu ve filtrenin 3. ve daha yüksek dereceli harmonikleri geçireceği görülmüştür. Geniş bir bastırma aralığı için, zemin iletkeni kusurlu bir alçak geçiren filtre yapısı önerilmiştir. Önerilen zemin iletkeni kusurlu filtre yapısının geniş bastırma (3,5-20 GHz) özelliğine sahip olduğu ve seçiciliğinin geleneksel filtre yapısına göre yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, zemin iletkeni kusurlu filtre yapısının geleneksel filtre yapısına göre daha küçük boyut ile yüksek elektriksel performans sergilediği görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Sagarkumar, P., Vatsal, S., Maharshi, K. (2018). Comparative study of 2G, 3G and 4G, *International Journal of Scientific Research in Computer Science*, Engineering and Information Technology, 3(3).

2. Tikhomirov, A., Omelyanchuk, E., Semenova, A. (2018). *Recommended 5G frequency bands evaluation,* Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moskova, Rusya.

3. Bertenyi B., Nagata S., Koorapaty, H., Zhou, X., Wanshi, C., Younsun, K., Xizeng, D., Xiaodong, X.U. (2018). 5G NR radio interface, *Journal of ICT Standardization*, 6(1), 31-58.

4. Qualcomm Hong Kong Ltd. (2019). *Coexistence analysis between 5G NR and FSS in different scenarios in the 3300 – 4200 MHz band,* Hong Kong: Qualcomm Ltd., 50.

5. Wang, CX., Haider, F., Gao, X., You, XH., Yang, Y., Yuan, D., Aggoune, HM., Haas, H., Fletcher, S., Hepsaydir, E. (2014), 5G wireless communication systems: prospects and challenges: cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Communication Magazine*, 52(2), 122-130.

6. Jain, AK., Acharya, R., Jakhar S., Mishra, T.(2018). Fifth generation (5G) wireless technology revolution in telecommunication. *2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, 1867-1872.

7. Nordrum, A., Clark K. (2017). Eveything you need to know about 5G. *IEEE Spectrum*, 2(3), 56-59.

8. Gallagher JC., Devine ME. (2019). Fifth-generation telecommunications technologies: issues for congress. *Congress Book Research*, 5(1), 13-14.

9. Resonant Inc. (2016). *RF innovation and the trasition to 5G wireless technology*. Kaliforniya: Resonant Inc, 15-17.

10. Zhang, Y., Yin, X., Zhang. (2019). A two-port microwave component with dual-polarized filtering antenna and single-band bandpass filter operations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, (67)8, 5590-5601.

11. Pozar, DM. (2012). *Microwave engineering* (Third edition). New York: Wiley, 401–404.

12. Kapoor, A., Mishra, R. and Kumar, P. (2021). Novel wideband frequency selective surface based spatial filters for sub-6 GHz 5G devices. *IEEE 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering*, 1-7.

13. Guha, D., Antar, Y. (2011). *Microstrip and printed antennas new trends, techniques and applications* (First edition). New York: Wiley, 504.

14. Joshi, SA., Jayavignesh, T., Harsh, R. (2018). *Comparison of butterworth and chebyshev prototype of bandpass filter for MRI receiver front end* (Third edition). Berlin: Springer, 395-405.

15. Dokmetas, B., Arican, G. O., Akcam, N., Yazgan, E. (2021). A compact bandstop filter design using DMS-DGS technique for radar applications, *Applied Computational Electromagnetic Society (ACES)*, 36(11), 1460-1467.

16. Rekha, T.K., Abdulla, P., Jasmine, P. M., Anu, A.R.. (2020). Compact microstrip lowpass filter with high harmonics suppression using defected structures, *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 115(153032), 1-10.

17. Li, X., Shao Z., You, C.J. (2015). X-band substrate integrated waveguide bandpass filter using novel defected ground structure cell, *Microwave Opt Technol Lett*, 57(1), 1156–1160.

18. Kim, C., Lim, J., Park, J., Ahn, D., Nam S. (2000). A 10dB branch line coupler using defected ground structure. *30th European Microwave Conference*, 1-4.

19. Xiaojun, W., Chong, N. (2012). Design of two-band band-pass filter using defected ground structure (DGS) resonators. *Proceedings of 2012 5th Global Symposium on Millimeter-Waves*, 5(1), 644-647.

20. Sharkawy, M., Boutejdar, A., Mahmoud, E. (2013). Design of ultra-wide stop-band DGS low-pass filter using meander and multilayer techniques. *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(6), 1276-1281.

21. Tu, W., Chang, K. (2005). Compact microstrip low-pass filter with sharp rejection. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 15(6), 404-406.

22. Chen, J., Li, J., Wan, K., Xue, Q. (2006). Compact quasi-elliptic function filter based on defected ground structure. *IEEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, 153(4), 320-324.

23. Sung, Y., Kim, Y. (2005). An improved design of microstrip patch antennas using photonic bandgap structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(5), 1799-1804.

24. Oraizi, H., Esfahlan, M. (2008*).* Miniaturization of wilkinson power dividers by using defected ground structures. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 4(4), 113-120.

25. Lim, J.S., Park, J.S., Lee, Y.T., Ahn, D., Nam S. (2002*).* An Application of defected ground structure in reducing the size of amplifiers. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 12(7), 261-263.

26. Dzhankhotov, V. (2009). *Hybrid LC filter for power electronic drives: theory and implementation* (Doctoral dissertation, Lappeenranta University, 2009). Dissertation Abstracts International, 50, 621314.

27. Dimopoulos, H. (Editör). (2012). *Passive filters: basic theory and concepts*, Berlin: Springer, 219–248.

28. Deliyannis, T. L., Sun, D. Y., Fidler, J. K. (1999). *Continuos time active filter design*, Florida: CRC Press, 310-321.

29. Thede, L. (2004). *Practical analog and digital filter design* (First edition). New York: Artech House, 48-53.

30. İnternet: Electronics Tutorials, Active Low Pass Filter. URL: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_5.html, Son Erişim Tarihi : 13.06.2022

31. İnternet: Electronics Tutorials, Active High Pass Filter. URL: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_6.html, Son Erişim Tarihi : 13.06.2022

32. Raduca, E. (2003). *Study of the lowpass and highpass, first and second order actives filters*, Seventh International Symposium Interdisciplinary Regional Research, 3(2), 100-115.

33. K. D. Xu, F. Zhang, Y. Liu, and W. Nie (2018). High selectivity seventh-order wideband bandpass filter using coupled lines and open/shorted stubs. *Electron Organization*, 54(4), 223–225.

34. İnternet: Electronics Tutorials, Active Band Pass Filter. URL: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_7.html, Son Erişim Tarihi : 13.06.2022

35. Khmailia, S., Taghouti H., Mami A. (2013). Study of a band stop filter. *European Journal of Scientific Research*, 95(4), 582–588.

36. İnternet: Electronics Tutorials, Band Stop Filter. URL: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/band-stop-filter.html, Son Erişim Tarihi : 13.06.2022

37. Hong, J.S., Lancaster, M.J. (2001). *Microstrip filters for RF/microwave applications* (First edition). New York: Wiley, 41-42.

38. Daniels, Richard W. (1974). *Approximation methods for electronic filter design* (First edition). New York: McGraw-Hill, 109-122.

39. Lutovac, M.D., Tosic, D.V., Evans, B.L. (2001). *Filter design for signal processing using MATLAB and mathematica* (First edition). New Jersey: Prentice Hall, 41-89.

40. Bottacchi, S. (2008). *Noise and signal interference in optical fiber transmission systems* (Second edition). New York: Wiley, 242.

41. Wong, J., Lancaster, M.J. (2002). Microstrip filters for RF/microwave applications. *IEEE Microwave Magazine*, 3(2), 62- 65.

42. Solanki, A., Sharma, N., and Kumar Gupta, H. (2015*).* Design of microstrip low pass filter for l-band application. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 3(5), 212-215.

43. Pozar, DM. (1998). *Microwave engineering* (Third edition). New York: Wiley, 732.

44. Chauhan, D., Raval, F. (2016). Design of microstrip low pass filter, *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*, 3(1), 184.

45. Kumar, P., Chaturvedi, A. (2009). Design and analysis of microstrip elliptical low pass filter, *International Conference on Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices and Systems*, 1(2), 15-17.

46. Lee, K., Luk, K. (2017). Microstrip patch antennas, *World Science*, 5(5), 8–12.

47. Kumar, A., Machavaram K. (2013). Microstrip filter with defected ground structure: a close perspective, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 5(2), 23-29.

48. He, D.F., Itozaki, H. (2006). Making printed circuit boards (PCBs) using an LPKF plotter, *Circuit World*, 32(3), 40-43.

49. Vala, A., Patel, A., Goswami, R., Mahant, K. (2016). Defected ground structure based wideband microstrip low-pass filter for wireless communication, *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(5), 993-996.

50. Shi, L., Fan, Z., Xin, D. (2019). Miniaturized low-pass filter based on defected ground structure and compensated microstrip line, *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(5), 1093-1097.

51. Guan, X., Li, G., Ma. Z. (2005). Optimized design of a low-pass filter using defected ground structures, *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, 1(1), 23-27.

52. Lim, J., Kim, C., Ahn, D. (2005). Design of low-pass filters using defected ground structure, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(1), 2539-2545.



GAZİ GELECEKTİR...