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

ÇENTİK FİLTRE TASARIMI VE ANALİZLERİ

Hazırlayan
Gökhan ŞAHİN

Danışman
Prof. Dr. Nurhan KARABOĞA

Yüksek Lisans Tezi

Ağustos 2022
KAYSERİ

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

ÇENTİK FİLTRE TASARIMI VE ANALİZLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Gökhan ŞAHİN

Danışman
Prof. Dr. Nurhan KARABOĞA

Ağustos 2022
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Gökhan ŞAHİN

YÖNERGEYE UYGUNLUK

‘‘Çentik Filtre Tasarımı ve Analizleri’’ adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan	**Danışman**
Gökhan ŞAHİN	Prof. Dr. Nurhan KARABOĞA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmasını yöneten, bilgi birikimi ve tecrübesiyle beni aydınlatan, çalışmam boyunca ilgi ve alakasını esirgemeyen, tez çalışması sırasında yaşanan problemlere pozitif bir bakış açısıyla yaklaşan sayın hocam Prof. Dr. Nurhan KARABOĞA' ya teşekkürü bir borç bilir ve saygılarımı sunarım. Ayrıca eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkür ederim.

Gökhan ŞAHİN

Ağustos 2022, KAYSERİ

ÇENTİK FİLTRE TASARIMI VE ANALİZLERİ

Gökhan ŞAHİN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2022
Danışman: Prof. Dr. Nurhan KARABOĞA

ÖZET

Elektronik cihazlar arasında veya ortamdan kaynaklanan sinyal bozucu frekansların, istenilen sinyale ulaşılmasını engellediği durumlarda bu tip cihazlarda filtrelerin kullanılmasının gerekli olduğu bilinmektedir. Filtreler belirlenen frekanslardaki sinyalleri mesaj sinyalini bozulmaya uğratmadan, en uygun yöntemin belirlenip bastırılmasını sağlayan elektronik elemanlardan oluşmuş sistemdir. Çentik filtreler bant durduran filtrelerin alt türü olup, bant durdurma işlemini dar bir bant aralığında gerçekleştirdiği bilinmektedir. Çentik filtrelerdeki genel sorun filtrenin uygulanacağı devreye uyumu ve bu devre üzerindeki göstereceği performansı ifade eden kalite faktörüdür. Hazırlanan yüksek lisans tez çalışmasında filtre tasarımında farklı yaklaşımlar olan Bessel, Chebyshev ve Butterworth tasarım yöntemleri kullanılarak farklı derecelerden, farklı merkez frekanslarda çentik filtreler tasarlanmış ve derecenin değişmesine bağlı olarak filtrenin gösterdiği tepki kalite faktörünün değişimi açısından ele alınarak değerlendirilmiştir. Kullanılan frekans aralıkları ses düzeyinde olup 50, 55 ve 60 Hz'dir. Bunun sebebi biyomedikal sistemlerden gürültü sinyalinin ayırt edilebilmesi bu frekans düzeyinde gerçekleştiği içindir. Gürültülerin bastırılması konusunda tasarlanan üç tip filtre de başarılı olmuştur fakat tasarım yapılırken kullanılacak cihaz seçimleri bu noktada önemli hale gelmiştir. Kullanılan elemanların tasarımda meydana getireceği tolerans düzeyleri %5 civarında olurken dalgalanma seviyesine göre Chebyshev filtreler yüksek dalgalanma göstererek dalgalanmanın tercih edilmediği sistemlerde Chebyshev filtreler kullanılmamıştır. Dalgalanma faktörü az fakat kalite faktörü nispeten düşük olması durumunda Bessel ve Butterworth çentik filtrelerin kullanılması önerilmiştir. Tasarımda kullanılan yöntemlere göre filtre dereceleri kıyaslandığında maliyet, performans ve tasarım kolaylığı açısından altıncı dereceden filtre tasarımı yapılması uygun görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bessel çentik filtre, Chebyshev çentik filtre, Butterworth çentik filtre, çentik filtre, dalgalanma faktörü, kalite faktörü

NOTCH FILTER DESIGN AND ANALYSIS

Gökhan ŞAHİN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, August 2022

Supervisor: Prof. Dr. Nurhan KARABOĞA

ABSTRACT

It is known that filters should be used in electronic devices in cases where the interference frequencies between electronic devices or caused by the environment prevent reaching the desired signal. Filters are systems consisting of electronic elements that enable the most appropriate method to be determined and suppressed without jamming the message signal at the determined frequencies. Notch filters are subtypes of band-stop filters and are known to perform band-stopping in a narrow bandwidth. The general problem with notch filters is the quality factor that indicates the compliance with the circuit to which the filter is to be applied and the performance on this circuit. In the master thesis study, notch filters of different degrees were designed using different approaches in filter design, Bessel, Chebyshev, and Butterworth design methods, and the reaction of the filter to the change in degree and center frequencies was evaluated in terms of the change in quality factor. The frequencies range used was at the sound level and 50, 55, 60 Hz. The reason of this seperation of the noise signal from biomedical systems occurs at this frequency level. Three types of filters designed for noise suppression have been successful, but the selection of devices to be used while designing has become important at this point. While the tolerance levels of the elements used in the design were around 5%, Chebyshev filters had high fluctuation according to the fluctuation level and Chebyshev filters were not used in systems where fluctuation was not preferred. If the fluctuation factor was low but the quality factor was relatively low, it was recommended to use Bessel and Butterworth notch filters. When the filter grades were compared according to the methods used in the design, it was shown that sixth-level filters can be preferred in general in terms of cost, performance and design simplicity.

Keywords: Bessel notch filter, Chebyshev notch filter, Butterworth notch filter, notch filter, fluctuation factor, quality factor

İÇİNDEKİLER

ÇENTİK FİLTRE TASARIMI VE ANALİZLERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii

YÖNERGEYE UYGUNLUK iii

KABUL VE ONAY iv

TEŞEKKÜR v

ÖZET vi

ABSTRACT vii

İÇİNDEKİLER viii

KISALTMALAR ve SİMGELER xi

TABLOLAR LİSTESİ xiii

ŞEKİLLER LİSTESİ xiv

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Tarihsel Bakış 3

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı 4

1.3. Filtreler ve Türleri 5

1.3.1. Pasif Filtreler 6

1.3.2. Aktif Filtreler 6

1.3.2.1. Aktif Filtrelerin Avantaj ve Dezavantajları 6

1.4. Alçak Geçiren Filtreler 8

1.4.1. Pasif Alçak Geçiren Filtreler 8

1.4.1.1. RC Alçak Geçiren Filtreler 9

1.4.1.2. RC Birinci Derece Filtrenin Frekans Cevabı 10

1.4.1.3. RC İkinci Derece Filtrenin Frekans Cevabı 11

1.4.2. Aktif Alçak Geçiren Filtreler 12

1.5. Yüksek Geçiren Filtreler 16

1.5.1. Pasif Yüksek Geçiren Filtreler 16

1.5.2. Aktif Yüksek Geçiren Filtreler 19

1.6. Bant Geçiren Filtreler 21

1.7. Bant Durduran Filtreler 22

2.BÖLÜM

KULLANILAN YÖNTEMLER VE PARAMETRELER

2.1. 'Q' ve 'f_c' Parametreleri..... 24

2.1.1. Alçak Geçiren Filtrelerde Kalite Faktörü ve Kesim Frekansı 24

2.1.2. Yüksek Geçiren Filtrelerde Kalite Faktörü ve Kesim Frekansı..... 25

2.1.3. Bant Geçiren Filtrelerde Kalite Faktörü ve Kesim Frekansı 26

2.1.4. Bant Durduran Filtrelerde Kalite Faktörü ve Kesim Frekansı 27

2.2. Filtre Tipleri ve Analiz Yöntemleri..... 29

2.2.1. Butterworth Filtreler..... 30

2.2.2. Chebyshev Filtreler..... 32

2.2.3. Bessel Filtreler..... 34

2.3. Butterworth, Chebyshev, Bessel Filtrelerin Karşılaştırılması ve Analizi 36

2.4. Çentik Filtre Tipleri 37

2.4.1. Aktif Çentik Filtreler..... 37

2.4.2. Pasif Çentik Filtreler 38

2.4.2.1. RLC Çentik Filtreler 38

2.4.3. Optik Çentik Filtreler..... 40

2.4.4. RF Çentik Filtreler 40

2.4.5. Butterworth Çentik Filtreler 41

2.5. Çentik Filtrelerin Transfer Fonksiyonu..... 42

2.6. Çentik Filtreler ile Yapılabilecek Uygulamalar..... 43

3. BÖLÜM

ÇENTİK FİLTRE TASARIMI

3.1. Araştırmanın Genel Yapısı 45

3.2. Bessel Çentik Filtre Tasarımı 45

3.2.1. Farklı Derecelerden Bessel Çentik Filtrelerin Karşılaştırılması 49

3.3. Butterworth Çentik Filtre Tasarımı 53

3.3.1. Farklı Derecelerden Butterworth Çentik Filtrelerin Karşılaştırılması .. 56

3.4. Chebyshev Çentik Filtre Tasarımı 60

3.4.1. Farklı Derecelerden Chebyshev Çentik Filtrelerin Karşılaştırılması 63

3.5. Bessel, Butterworth, Chebyshev Çentik Filtrelerin Kalite Faktörü Kıyaslaması 66

3.6. Bessel, Butterworth, Chebyshev Çentik Filtrelerin Sapma Miktarı Kıyaslaması 69

3.7. Bessel, Butterworth ve Chebyshev Filtrelerin Eşdeğerlerinin Bulunması 73

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuç ve Öneriler 75

KAYNAKÇA 77

ÖZGEÇMİŞ 80

KISALTMALAR ve SİMGELER

Sembol	**Anlamı**	**Birimi**
R	Direnç	(Ω)
L	Bobin	(H)
C	Kapasite	(F)
f_c	Kesim frekansı	(Hz)
f_r	Rezonans frekansı	(Hz)
X_c	Kapasitif reaktans	(Ω)
V	Voltaj	(V)
V_c	Kondansatör gerilimi	(V)
V_r	Direnç gerilimi	(V)
A_v	Voltaj kazancı	--
f_c	Kesim frekansı	(Hz)
f_h	Yüksek kesim frekansı	(Hz)
f_l	Alçak kesim frekansı	(Hz)
ω_0	Kutup frekansı	(Hz)
Q	Kalite faktörü	--
H_0	Devre kazancı	--
ω_z	Sıfır frekansı	(Hz)

Kısaltmalar	**Açıklaması**
hi-fi	High fidelity (Yüksek bağlılık)
IC	Integrated circuit (Entegre devre)
Op-amp	Operational amplifier (Operasyonel kuvvetlendirici)
FET	Field effect transistor (Alan etkili transistör)
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım

dB	Desibel
BW	Bant genişliği
DSL	Dijital abone hattı
IP	Imaginary part (Sanal kısım)
RF	Radyo frekansı
SDR	Yazılım tanımlı radyo
FM	Frekans Modülasyonu
EKG	Elektrokardiyogram

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. 55 Hz Bessel çentik filtre toplam maliyeti....49
Tablo 3.2. 50 Hz farklı derecelerden tasarlanan Bessel çentik filtrenin kalite faktörü değişimi....50
Tablo 3.3. 55 Hz farklı derecelerden tasarlanan Bessel çentik filtrenin kalite faktörü değişimi....51
Tablo 3.4. 60 Hz farklı derecelerden tasarlanan Bessel çentik filtrenin kalite faktörü değişimi....52
Tablo 3.5. 55 Hz Butterworth çentik filtre toplam maliyeti....56
Tablo 3.6. 50 Hz farklı derecelerden tasarlanan Butterworth çentik filtrenin kalite faktörü değişimi....57
Tablo 3.7. 55 Hz farklı derecelerden tasarlanan Butterworth çentik filtrenin kalite faktörü değişimi....58
Tablo 3.8. 60 Hz farklı derecelerden tasarlanan Butterworth çentik filtrenin kalite faktörü değişimi....59
Tablo 3.9. 55 Hz Chebyshev çentik filtre toplam maliyeti....63
Tablo 3.10. 50 Hz farklı derecelerden tasarlanan Chebyshev çentik filtrenin kalite faktörü değişimi....64
Tablo 3.11. 55 Hz farklı derecelerden tasarlanan Chebyshev çentik filtrenin kalite faktörü değişimi....65
Tablo 3.12. 60 Hz farklı derecelerden tasarlanan Chebyshev çentik filtrenin kalite faktörü değişimi....66
Tablo 3.13. Bessel, Butterworth ve Chebyshev filtrelerin iki bant genişliğinde ve farklı merkez frekanslarda ideal filtre dereceleri....72
Tablo 3.14. Bessel, Butterworth ve Chebyshev filtrelerin diğer türlerde eşdeğerlikleri.73

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Elektronik filtrelerin sınıflandırılması 5
Şekil 1.2. Birinci dereceden pasif alçak geçiren RC devresi 9
Şekil 1.3. RC birinci derece filtre frekans cevabı grafiği 10
Şekil 1.4. RC birinci dereceden filtre faz değişim grafiği 11
Şekil 1.5. İkinci dereceden RC filtre yapısı 12
Şekil 1.6. İkinci dereceden RC alçak geçiren filtre frekans cevabı 12
Şekil 1.7. Basit aktif alçak geçiren filtre örneği 13
Şekil 1.8. Voltaj kazancı sağlayan aktif alçak geçiren filtre 14
Şekil 1.9. İkinci dereceden aktif alçak geçiren filtre 15
Şekil 1.10. İkinci dereceden aktif alçak geçiren filtre frekans cevabı 16
Şekil 1.11. RC pasif yüksek geçiren filtre 16
Şekil 1.12. RC pasif yüksek geçiren filtre frekans cevabı 17
Şekil 1.13. Pasif yüksek geçiren filtre faz kayması grafiği 17
Şekil 1.14. İkinci dereceden pasif yüksek geçiren filtre 18
Şekil 1.15. Evirmeyen op-amp'lı aktif yüksek geçiren filtre 19
Şekil 1.16. Eviren op-amp'lı aktif yüksek geçiren filtre 20
Şekil 1.17. Kuvvetlendirici devresi bant genişliği ve aktif alçak geçiren filtre frekans cevabı 20
Şekil 1.18. Pasif bant geçiren filtre 21
Şekil 1.19. Aktif bant geçiren filtre frekans cevabı 22
Şekil 1.20. Aktif bant geçiren filtre faz değişim grafiği 22
Şekil 1.21. Bant durduran filtrelerin frekans cevabı grafiği 23
Şekil 2.1. Değişken '*Q*' değerlerine karşılık alçak geçiren filtre cevabı 25
Şekil 2.2. Değişken '*Q*' değerlerine karşılık yüksek geçiren filtre cevabı 26
Şekil 2.3. Değişken *Q* değerlerine karşılık bant geçiren filtre cevabı 27
Şekil 2.4. Standart, düşük geçiren ve alçak geçiren çentik filtre frekans cevabı 28
Şekil 2.5. Çentik Filtre genliği ve çeşitli '*Q*' değerlerine karşılık frekans değerleri 29
Şekil 2.6. Butterworth filtrelerin: (a) genel frekans yanıtı, (b) detaylı frekans yanıtı, (c) grup gecikmesi, (d) dürtü yanıtı, (e) basamak yanıtı analizlerini gösterir [13] 31
Şekil 2.7. Chebyshev filtrelerin: (a) genel frekans yanıtı, (b) detaylı frekans yanıtı, (c) grup gecikmesi, (d) dürtü yanıtı, (e) basamak yanıtı analizlerini gösterir [13] 33

Şekil 2.8. Bessel filtrelerin: (a) genel frekans yanıtı, (b) detaylı frekans yanıtı, (c) grup gecikmesi, (d) dürtü yanıtı, (e) basamak yanıtı analizlerini gösterir [13] 35
Şekil 2.9. Bessel, Butterworth ve Chebyshev filtrelerin genlik yanıtı analizleri karşılaştırması [13] 36
Şekil 2.11. Temel aktif çentik filtre örneği 37
Şekil 2.12. Pasif çentik filtre İkiz-T modeli örneği 38
Şekil 2.13. RLC çentik filtre örneği 39
Şekil 2.14. RLC çentik filtre eşdeğer devresi 39
Şekil 2.15. RF çentik filtre çalışma prensibi akış şeması 41
Şekil 3.1. 55 Hz merkez frekanslı Bessel çentik filtrenin birinci katmanı 46
Şekil 3.2. 55 Hz Bessel çentik filtre frekans-genlik yanıtı eğrisi 46
Şekil 3.3. 55 Hz Bessel çentik filtre frekans-faz cevabı grafiği 47
Şekil 3.4. 55 Hz Bessel çentik filtre frekans-grup gecikmesi grafiği 47
Şekil 3.5. 55 Hz Bessel çentik filtrenin ikinci katmanı 48
Şekil 3.6. 55 Hz Bessel çentik filtrenin üçüncü katmanı 48
Şekil 3.7. 55 Hz Butterworth çentik filtrenin birinci katmanı 53
Şekil 3.8. 55 Hz Butterworth çentik filtrenin ikinci katmanı 54
Şekil 3.9. 55 Hz Butterworth çentik filtrenin üçüncü katmanı 54
Şekil 3.10. 55 Hz Butterworth çentik filtre frekans-kazanç eğrisi 55
Şekil 3.11. 55 Hz Butterworth çentik filtre frekans-faz cevabı grafiği 55
Şekil 3.12. 55 Hz Butterworth çentik filtre frekans-grup gecikmesi grafiği 56
Şekil 3.13. 55 Hz Chebyshev çentik filtre birinci katmanı 60
Şekil 3.14. 55 Hz Chebyshev çentik filtrenin ikinci katmanı 60
Şekil 3.15. 55 Hz Chebyshev çentik filtrenin üçüncü katmanı 61
Şekil 3.16. 55 Hz Chebyshev filtrenin frekans-grup gecikmesi grafiği 61
Şekil 3.17. 55 Hz Chebyshev filtrenin frekans-genlik yanıtı grafiği 62
Şekil 3.18. 55 Hz Chebyshev filtrenin frekans-faz yanıtı grafiği 62
Şekil 3.19. 50 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-kalite faktörü grafiği 67
Şekil 3.20. 55 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-kalite faktörü grafiği 68
Şekil 3.21. 60 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-kalite faktörü grafiği 69

Şekil 3.22. 50 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-sapma miktarı grafiği 70
Şekil 3.23. 55 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-sapma miktarı grafiği 70
Şekil 3.24. 60 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-sapma miktarı grafiği 71

GİRİŞ

20. yy başlarında elektronik hiç olmadığı kadar büyük bir hızla gelişip büyümekteydi. Bu büyüme büyük bir hızla devam ederken yanında bazı yeni sorunlar da getirdi. Bu yeni sorunlardan bazıları günümüzde elektronik elemanların kullanıldığı elektronik devrelerin arasında meydana gelen kanallar arası etki denilen sinyal bozucu etkidir. Bunun yanında çevreden dolayı meydana gelen gürültüler de ayrı bir sorun olarak ortaya çıktı. Bu olumsuz etkileri yok etmek için bazı özel elektronik devreler ve bu devreleri farklı şartlarda çalıştırmak için bazı teoriler öne sürüldü. Bu yapılan devreler filtre (süzgeç) olarak adlandırılmaya başlandı. Bu yapılan elektronik filtreler farklı frekans ve özelliklere sahip sinyallerin bazı kısımlarını geçirip, bazı kısımlarını bastıran devrelerdir. Bu sayede karşı tarafa iletilmek istenen sinyal dışında kalan girişimden dolayı oluşmuş istenmeyen sinyaller veya dış ortamdan dolayı meydana gelen parazitler ortadan kaldırılmış oldu. Zamanla araştırmalar artarak devam etti ve özel filtre tipleri ortaya çıktı, bunlar; alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren, bant durduran filtrelerdir. Filtreler bu amaçların yanında zamanla başka amaçlar içinde kullanıldı. Kullanım alanlarından bazıları en temel olarak haberleşme örnek verilebilir. Buna ek olarak işaret biçimlendirme, işaret zayıflatma, güç faktörü düzeltmeleri dolayısıyla bunlarla ilişkili olarak jeofizik, tıbbi elektronik ve uzaktan ölçüm gibi birçok bilimsel konuda araştırma yapılırken filtreler kullanılır. Gerek kullanım alanı olarak gerekse yapılan araştırmalar ve analizler son dönemde arttırılmıştır.

Çentik filtreler biyomedikal sistemlerde dar bir bant aralığında şebeke geriliminden kaynaklanan parazitlerin baskılanmasında kullanılan filtre tipleri olmuştur. Bu tür önemli sistemlerde çentik filtrelerin dar bir bant aralığında yapacağı bant durdurma işlemi mümkün oldukça yüksek verimde ve maliyet açısından uygun olması gerekmektedir. Bu nedenle tasarlanan sistem için en uygun filtrenin üretilmesi aynı zamanda maliyet açısından da uygun olması önemli olmaktadır. Gelecekte bu sistemlerin tasarımında kullanılan yöntemlerin ve malzemelerin önemi daha da artacaktır. Bu sebeple bu tez çalışmasında çeşitli tasarım yöntemleri kullanılıp bu sistemlerin avantaj ve dezavantajları

vurgulanmıştır. Ayrıca bu tasarım yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarından bağımsız olarak kalite faktörleri karşılaştırılmıştır.

Çentik filtreler alçak geçiren, yüksek geçiren gibi farklı filtre türlerini yapısında barındırdığından dolayı bu filtreler ayrıntılı olarak ayrı ayrı incelenerek frekans-faz ve frekans-genlik yanıtları değerlendirilmiştir. Çentik filtreler kendi içerisinde kullanıldıkları yerlere göre ayrı ayrı sınıflandırılmıştır. Çentik filtreler genel olarak aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılır fakat pasif ve aktif olmasından bağımsız olarak RC sistemlerde kullanılan çentik filtreler, optik sistemlerde kullanılan optik çentik filtreler ve geniş bir aralıkta bant aralığında çalışacak olan RLC çentik filtreler olarak da ayrılmışlardır. Bu çentik filtrelerin kullanım alanları farklı olsa da işleyiş ve yapı olarak tamamen aynı olmuştur.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Tarihsel Bakış

Kablosuz haberleşmenin başladığı ilk zamanlarda seçicilik veya bir diğer adıyla eliminasyon tek seri devrelerle veya paralel rezonatörlerle sağlanmıştır. Çok amaçlı modern anlamda üretilen filtreler Amerika'da Campbell ve Almanya'da Wagner şirketlerinin bağımsız çalışan filtre fikriyle ilk defa ön plana çıktı [1]. 1923'de Bell Laboratuvar'larında çalışan Otto Julius Zobel basit matematiksel yöntemler kullanılarak filtre tasarımı yapmanın bir yöntemini yayınladı [2]. Zobel'in bulduğu yöntem ''görüntü parametresi'' olarak adlandırıldı ve on yıllarca yıl pratik filtre tasarımının tek yöntemi olarak tanımlandı [2].

1940'larda Foster tarafından ortaya çıkarılan teoriler transfer fonksiyonunu ifade etmek ve elektronik cihazlar arası bağlantıları tam olarak ifade etmek için Darlington ve Cauer tarafından genişletilmiştir [3]. Fakat Darlington ve Cauer tarafından ortaya atılan bu teoriler ağır bir matematiksel hesap yükü nedeniyle bu metot akademik amaçlı olarak kullanılmıştır. Daha sonraki dönemlerde ise diğer filtre yapılarının kolayca türetilebildiği alçak geçiren filtre prototiplerini sentezlemek için sayısal (dijital) bilgisayarların kullanılmaya başlanılmasıyla bu metot akademik alanın dışarısına çıkmış olmuştur. Bu alçak geçiren filtre prototipleri polinomların geliştirilmesiyle tanınan Butterworth, Chebyshev, Bessel, Gaussian ve diğerleri gibi matematikçilerin adını taşıyan birçok özel ve faydalı transfer yaklaşımı için tablo haline getirilmiştir. 1950'lerden beri bu metot pratik kullanımda olmasına rağmen anlatılan üç metodun en yenisi bu metot olduğundan dolayı bu metot modern filtre teorisi olarak adlandırılmıştır.

Bu noktada çalışmalar iki farklı şekilde ilerlemiş ve geliştirilmiştir. Birincisi filtre matematiğinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesini izlemiştir. Örneğin alçak geçiren filtrelerin yerine bant geçiren filtrelerin doğrudan sentezi denendiğinde dijital bilgisayarların hassasiyeti bile genellikle bu durum için yeterli olamamaktaydı [3]. Bunun

sonucunda çalışmanın transfer fonksiyonu polinomları veya filtre maskeleri tarafından saptanan geçiş bandı ve durdurma bandı yanıtının neredeyse keyfi gereksinimlerine filtreleri sentezleme yeteneğidir [3].

Yürütülen ikinci çalışma birincisinden daha çok mevcut olan sorunları gidermeye yönelik olmuştur. Alçak geçiren, bant geçiren, yüksek geçiren ve bant durduran filtrelerin geliştirilmesine engel olan alçak geçiren filtre prototiplerin tasarımıyla ilgili pratik uygulamalarda birçok problemle karşılaşılmıştır. Problemler genellikle şunları içermekteydi; elektronik elemanlar içerisinde gerçekleşen bileşen parazitleri, dış etkilerden meydana gelen parazitler, girilen değerlerin sistem tarafından tanımlanabilirliği, farklı reaktörler ve rezonatör teknolojiler, iletim hattı kesintileri, ayarlanabilirlik ve diğer sorunlar. Bu çalışma her biri belirli uygulamalar için çok uygun olan alçak geçiren filtre prototipinden çeşitli filtre yapılarına kadar bir dizi dönüşüm içerisindeki daha önceden bahsedilen sorunların giderilmesi ve geliştirilmesini içermiştir. Sonuç olarak filtre tipi ve bu filtrelerin uygulamaları uygun bir şekilde eşleştirilebilirse çok sayıda filtrede uygulanabilirlik ve maksimum performans elde edilebilir.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

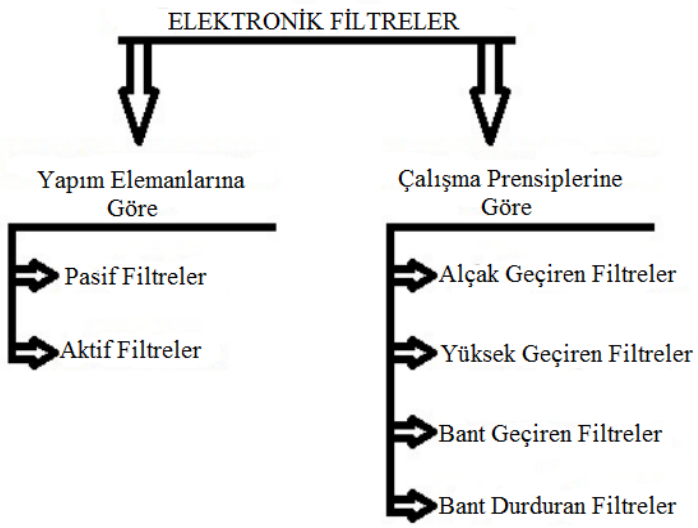
Günümüzde kullanılan elektronik cihazlar sinyal iletimi sırasında kanalların birbiri ile etkileşimi sonucu ve iletim sırasında çevredeki bozucu etkilere maruz kalmaktadır. Bu gerek elektronik sistemlerde gerekse haberleşme sistemlerinde böyle bir durum mümkün oldukça azaltılmaya çalışılmış olsa da tam anlamıyla önlenememiştir. Bu yüzden gönderilen sinyaller, alıcıya ulaştığı zamanda arasına karışmış olan bozucu sinyallerin, istenen sinyallerden ayırt edilmesi gerekir. Bunun için çeşitli amaçlar doğrultusunda filtreler kullanılmıştır. Filtre tasarımı yapılırken maliyet düşünülen ilk konudur ve kullanılan malzemeler ve filtrenin kullanılacağı bant genişliği bunu direkt olarak etkilemiştir.

Bu çalışmanın amacı, yeni elektronik cihazlarla uyumlu, istenilen bant genişliğinde istenmeyen sinyalleri bastırarak iyi bir frekans cevabı oluşturan çentik filtre tasarımıdır. İstenilen aralıkta filtreleme yapabilen, çeşitli filtre üretim yöntemlerini deneyen ve bu yöntemlerin analizini yaparak birbiri ile kıyaslayan bir filtre tasarımı yapılmıştır. Tez çalışmasında çeşitli yöntemler denenerek yapılan tasarımların birbirleriyle avantaj ve dezavantajları kıyaslanarak en iyi tasarım ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

1.3. Filtreler ve Türleri

Elektronik filtreler bir sinyal içerisinde istenmeyen sinyal veya farklı frekanslara sahip elektriksel sinyallerin bastırılmasını sağlayan devrelerdir [4]. Filtreler; istenmeyen elektriksel sinyal olarak anlatılan veya elektriksel gürültü olarak bilinen devre çıkışına veya diğer elektronik katmanlara etkisinin oluşması istenmeyen işaretlerin bastırılarak yok edilmesini sağlanmıştır.

Filtreler elektronik konseptli tasarımlar açısından aşırı derecede önemli olmuştur. Filtreler radyo, televizyon, ses ve veri haberleşmesi için son derecede önemlidir. Ayrıca telefon haberleşmesi filtreler olmadan gerçekleştirilememiştir. Ses ve hi-fi (high-fidelity, yüksek bağlılık) sistemlerde ihtiyaç olduğu kadar elektronik müzik aletlerinin de filtrelere ihtiyacı olmuştur. Sismoloji, beyin dalgası araştırmaları, telemetri, biyomedikal elektronik, jeofizik, konuşma terapisi ve proses enstrümantasyonu büyük ölçüde filtre kavramlarına dayanmıştır.



Şekil 1.1. Elektronik filtrelerin sınıflandırılması

Şekil 1.1'de gösterildiği üzere elektronik filtreler ana hatlarıyla iki gruba ayrılmıştır: yapım elemanlarına ve çalışma prensiplerine göre. Yapım elemanlarına göre pasif ve aktif filtreler olarak iki gruba ayrılmıştır. Bu şekilde ayrılmalarının en temel nedeni filtrelerin üretildikleri elektronik elemanların farklı işlevler göstermesidir. Pasif filtre devreleri direnç, kapasite ve bobin; aktif filtreler ise bu devre elemanlarına ek olarak güç kaynağı, op-amp (operational amplifier, operasyonel kuvvetlendirici) veya mikroişlemci kullanılarak oluşturulan devrelerdir.

Filtre devreleri, girişlerindeki belli frekanslı büyüklükleri çıkışlarına aktaran veya girişlerindeki belli frekanslı büyüklükleri çıkışlarına aktarmayan dolayısıyla frekans seçiciliği yapan devrelerdir [5]. Bu devreler, bobin ve kapasite elemanlarının frekansa bağlı olarak reaktanslarının değişmesi ve rezonans olayının birlikte ele alınmasıyla tasarlanmıştır.

Çalışma Prensiplerine göre devreler dört ana gruba ayrılmıştır. Bunlar; alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durduran filtrelerdir. Alçak geçiren filtreler belirli frekansın altındaki frekanstaki sinyalleri geçirirken yüksek geçiren filtreler ise belirli frekansın üstündeki frekanstaki sinyalleri geçirmektedir. Eğer tasarlanan filtre belirli bir sinyal aralığındaki frekansları geçiriyor ve sönümlüyorsa bunlar sırasıyla bant geçiren ve bant durduran filtre olarak adlandırılmıştır.

1.3.1. Pasif Filtreler

Değişken frekanslı elemanlar olan kapasitörler ve indüktörler ne kadar aynı devreler içerisinde kullanılsalar da kullanıldıkları devre içerisindeki işlevleri tamamen farklı olmuştur. Kapasitörler yüksek frekanslarla başa çıkmak için kullanılırken, bobinler daha düşük frekansları daha iyi idare etmiştir. Böylelikle geleneksel olarak üretilen çoğu filtre kapasitör ve indüktör kombinasyonu temel alınarak tasarlanmıştır. Bu tür filtreler pasif filtreler olarak adlandırılmıştır.

1.3.2. Aktif Filtreler

Aktif filtre teknolojisi günümüzde filtrelemede daha çok tercih edilen ve filtrelemenin en iyi yolu olarak gösterilmiştir. Bütünleşik devre sistemleri, özellikle IC op-amp sistemlerde geleneksel yöntemlerle üretilen indüktör ve kapasitörler oluşan filtrelerin performanslarını doğru bir şekilde simüle etmek için dirençler ve kapasitörlerle kombine edilmiştir. Bu yeni yaklaşım genellikle bir kazanç sağladığından dolayı ek bir güç kaynağına ihtiyaç duymuştur. Bu şekilde üretilen filtreler aktif filtreler olarak adlandırılmıştır. Aktif filtreler bir kavram olarak oldukça uzun süredir ortalıkta olsa da ancak son zamanlarda güvenilir, kullanımı ve kurulumu kolay devrelere sahip oldular ve basit tasarım süreçleri ortaya çıkmıştır.

1.3.2.1. Aktif Filtrelerin Avantaj ve Dezavantajları

Pasif ve aktif filtreler arasındaki farklılıkların temel sebebi önceki konu başlıklarının altında da anlatıldığı üzere devrelerde kullanılan elektronik elemanların farklı olmuştur. Pasif filtrelerde kapasitör ve bobin kullanılırken, aktif filtrelerde kapasitör ve bobinin

yanında güç kaynağı, op-amp veya mikroişlemciler kullanılmıştır. Temel olarak aktif filtrelerin avantajları şöyle sıralanabilir;

- Düşük maliyet aktif filtrelerin avantajlarından biri olmuştur. Aktif filtrelerin bileşen maliyetleri pasif filtrelere göre kıyaslandığında açık ara daha ucuzdur. Özellikle indüktörlerin pahalı ve büyük yer kapladığı düşük frekanslarda avantajlı olmuştur.
- İzolasyon aktif filtrelerin avantajlarındandır. Çoğu aktif filtre çok yüksek giriş empedansına sahip ve çok düşük çıkış empedansına sahip olmuştur. Bu esasen aktif filtrelerin çıkış yanıtını kaynak ve yükleme empedansından ve bunların değişiminden bağımsız kılmıştır.
- Aktif filtrelerin bir diğer avantajı kademelendirilebilirliktir. Aktif filtrelerin iyi izolasyona sahip olması kompleks filtre problemlerinin istenen nihai sonucu üretmek için bir araya gelen basit bölümlerin kolayca ayrılabilmesini sağlamıştır.
- Kazanç aktif filtrelerin bir diğer avantajıdır. Aktif filtreler filtre gereksinimlerine veya sisteme uyum sağlayabilmek amacıyla ihtiyaç duyulduğu durumlarda kazanç veya kayıp sağlamıştır. Uygulanan devrelerde genellikle akım kazancı sağlandığı görülmüştür, fakat voltaj kazancı bir seçenek olarak sunulmuştur.
- Aktif filtrelerin bir diğer avantajı ayarlanabilme özelliğidir. Birçok aktif filtre çıkış cevabını değiştirmeksizin geniş bir aralıkta kolayca ayarlanabilmiştir. Filtrelerin ayarlanması elektronik olarak, manuel olarak veya voltaj kontrolü tarafından yapılmıştır. Aktif filtrelerde ayarlanma aralıkları 1000:1 oranına kadar yapılmıştır. Daha yüksek oranda ayarlanma yapılması gerekirse bunun için aktif filtreler uygun değildir. Bu tür durumlar genellikle pasif devrelerle mümkün olmuştur.
- Küçük boyutlu ve hafif olmaları aktif filtrelerin avantajlarından biri olmuştur. Bu özellikle indüktörlerin büyük ve ağır olduğu düşük frekanslarda geçerli bir durum oluşturmuştur.
- Aktif filtrelerin avantajlarından birisi neredeyse hiç alan hassasiyetinin olmamasıdır. Koruma ve kuplajlama sorunu esasen şimdiye kadar yapılan çalışmaların hiçbirinde meydana gelmemiştir. Bu sebeple aktif filtrelerde bu problemim varlığından söz edilmemiştir.

- Tasarım kolaylığı aktif filtrelerin avantajlarından birisidir. Geleneksel tasarım metotlarıyla karşılaştırıldığında aktif filtrelerin tasarımı diğer filtrelere göre oldukça basit, anlaşılır ve kolay olmuştur.

Aktif filtrelerin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar bir miktarda olsa aktif filtrelerin kullanım alanını kısıtlamıştır. Bu dezavantajlar aktif filtrelerin avantajlarının çok olması sebebiyle bir kenara bırakılsa da bu dezavantajların bilinmesi önemlidir. Aşağıda bazı dezavantajları sıralanmıştır;

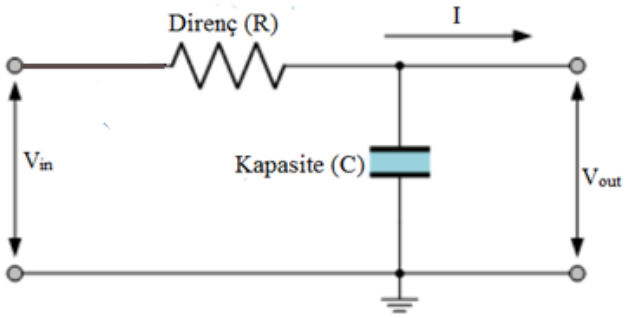
- Besleme kaynağı aktif filtrelerin dezavantajlarından biridir. Bazı tür güç kaynakları tüm aktif filtre devreleri zorunlu bir şekilde kullanılması gerekmiştir.
- Aktif filtrelerin bir diğer dezavantajı sinyal sınırlandırmalarıdır. Kullanılan operasyonel kuvvetlendirici belirli sinyal sınırlarını belirlemiştir. Kullanılan işlemsel yükseltecin giriş gürültüsü, dinamik aralığı, yüksek frekans yanıtı ve büyük sinyalleri işleme yeteneği üzerinde kesin sinyal sınırları belirlemiştir.
- Hassasiyet aktif filtrelerin dezavantajlarından birisidir. Çıkış cevabındaki şekil ve büyüklük olarak değişim bileşenlerden biri veya operasyonel kuvvetlendirici toleransları sıcaklıkla değiştiğinde veya sıcaklığı takip ettiğinde mümkün olmuştur. Bu da devrelerde istenmeyen bir durum olmuş ve devreler sıcaklıktan bağımsız çalışmış olmalıdır.

1.4. Alçak Geçiren Filtreler

Bir elektronik filtrenin temel görevi daha önceki bölümlerde anlatıldığı karşıya iletilmek istenen elektriksel sinyalin içerisinden istenmeyen sinyallerin bastırılmasını sağlamak, istenen frekanslardaki sinyalleri geçirmek için yeniden şekillendirmektir. Alçak geçiren filtreler istenmeyen sinyal olarak belirlenen, mevcut sinyalin üst frekans bölgesinde bulunan sinyallerin bastırılmasını sağlamıştır. Alçak geçiren filtrelerin iki türü vardır. Bunlar; pasif alçak geçiren, aktif alçak geçiren filtreler olmuştur.

1.4.1. Pasif Alçak Geçiren Filtreler

Pasif alçak geçiren filtreler R, L ve C kullanılarak oluşturulan elektronik devrelerdir. Düşük frekanslı devreler olarak bilinen 100 kHz frekans bölgesinin altında bulunan pasif filtreler genellikle basit bir direnç ve kondansatör (RC) devresinden oluşmaktadır. 100 kHz frekans üstü olarak bilinen yüksek frekanslı devrelerde ise direnç, kondansatör ve bobin (RLC) kullanılmıştır.



Şekil 1.2. Birinci dereceden pasif alçak geçiren RC devresi

Birinci dereceden basit bir RC devresi Şekil 1.2'de verilmiştir. Şekil 1.2'den de görüldüğü üzere basit bir şekilde direnç ve kondansatörün bağlanmasıyla elde edilmiştir.

1.4.1.1. RC Alçak Geçiren Filtreler

Bu tür filtreler en kolay şekilde kurulabilen filtreler olmuştur. Şekil 1.2'deki örnekten görüldüğü üzere giriş gerilimine seri bağlanmış bir dirençten oluşmuştur. Çıkış gerilimi kondansatörün her iki bacağından ölçülerek bulunur. Bu tür tasarlanmış filtreler birinci dereceden filtreler veya tek kutuplu filtreler olarak adlandırılmıştır. Bu şekilde adlandırılmasının sebebi devrede sadece tek reaktif bileşen olduğu içindir.

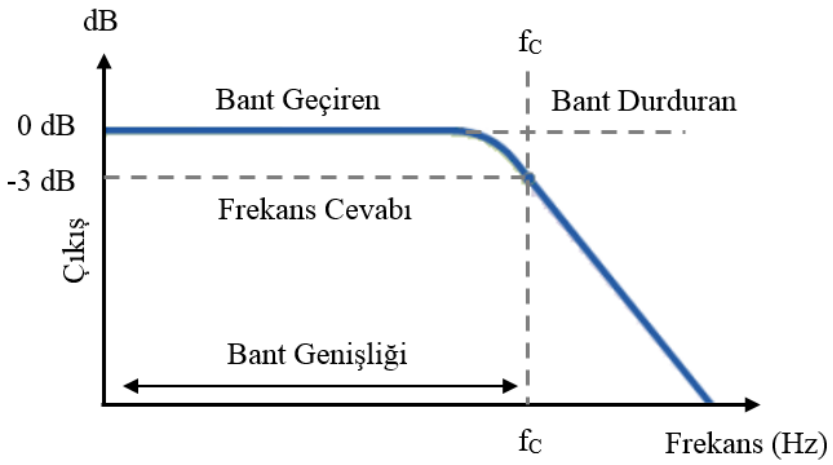
Devrede kullanılan reaktif bileşen Şekil 1.2'de kondansatördür. Kondansatörün reaktansı değişken ve frekans ile ters orantılı olarak değişir. Kondansatörler tek başına yüksek frekanslı devreleri kontrol etmede daha uygun olmuştur. Bu sebeple düşük frekanslarda kondansatörün kapasitif reaktansı (X_c), devredeki direncin değeri ile karşılaştırıldığında çok büyük olmuştur. Yani bir bakıma devredeki direnç (R) değeri çok düşük kaldığı için hesaplamalar yapılırken devre direnci yok sayılmıştır. Bu durumda kondansatör üzerine düşen gerilimin (V_c), direnç üzerinde oluşan gerilim düşümünden (V_r) çok daha yüksek olmuştur. Bu yüzden genelde düşük frekanslarda çalışıldığında bobin kullanımı tercih edilmiştir. Yüksek frekanslarda ise bu durumun tam tersi söz konusudur. Yüksek frekanslarda kapasitif reaktans çok daha düşük olmuştur ve bu da kondansatör üzerine düşen gerilimin devredeki direnç üzerine düşen gerilimden çok daha düşük olmasını sağlamıştır. Şekil 1.2'deki gibi bir devrede frekansı değişken bir gerilim bölücü devre olarak gösterilmiştir. RC birinci dereceden devrenin çıkış gerilimi Denklem 1.1'de ifade edilmiştir.

$$V_{out}=V_{in}\times\frac{X_c}{\sqrt{R^2+X_c^2}}=V_{in}\times\frac{X_c}{Z} \tag{1.1}$$

Kapasitelerin yüksek frekansları daha iyi kontrol edebildiğine bir örnek verelim. 4,7 kΩ'luk bir direnç 47 nF'lık bir kondansatörden oluşan alçak geçiren filtre devresinin girişine 100 Hz ve 10 kHz'lik iki ayrı frekansa sahip gerilimleri aynı sinyaller uygulandığını varsayalım. Hesaplamalar sonucunda 100 Hz'lik frekanslı sinyalin çıkışından elde edilen gerilim 9.9 V olarak ölçülmüştür. 10 kHz'lik frekansa sahip sinyalin çıkışından ise 0.718 V ölçülmüştür.

1.4.1.2. RC Birinci Derece Filtrenin Frekans Cevabı

Önceki konudan görüldüğü üzere devreye uygulanan gerilim frekansı gerilim frekansı yükseldikçe çıkıştan ölçülen gerilim frekansının 0.718 V'a kadar düştüğü görülmüştür. Böylelikle devrenin girişine uygulanan gerilim frekansının çıkış üzerinde etkisi görülmüştür. Bunun grafik olarak temsili Şekil 1.3'de giriş geriliminin frekansındaki değişikliğe karşılık çıkışın logaritmik değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1.3. RC birinci derece filtre frekans cevabı grafiği

Şekil 1.3'de görüldüğü üzere düşük frekanslarda uygulanan gerilim değerinin hiç azalmadığı görülmektedir. Kesim frekansı (f_c)'den sonra çıkış frekans cevabı hızlı bir şekilde düştüğü görülmüştür. Bu durumdan anlaşılacağı üzere kesim frekansından sonra oluşan gerilim değerlerini kurulan devre geçirmeyecektir. Böylelikle uygun direnç ve kondansatörler kullanılarak istenilen frekansları durduracak bir filtre tasarlanmıştır. Bir RC filtre için kesim frekansı;

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \text{ Hz} \qquad (1.2)$$

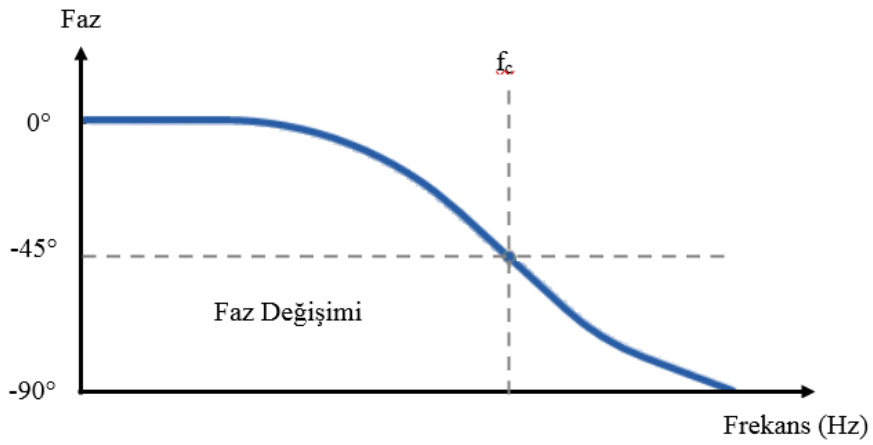
ifadesi ile elde edilmiştir. Böylelikle bu tür bir filtrede kesim frekansı direnç ve kondansatöre bağlı ve ters orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu tip filtrelerde aynı zamanda giriş gerilimin frekansına bağlı olarak elde edilen çıkış geriliminin fazında da bazı değişiklikler olması beklenmiştir. Şekil 1.4'de faz değişimi gösterilmektedir.

RC birinci dereceden filtrelerde faz değişimi;

$$\theta = -\tan^{-1}(2\pi fRC) \tag{1.3}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Denklem 1.3'de gösterildiği üzere faz değişimi üzerinde giriş frekansı, devre direnci ve kapasite etkilidir.



Şekil 1.4. RC birinci dereceden filtre faz değişim grafiği

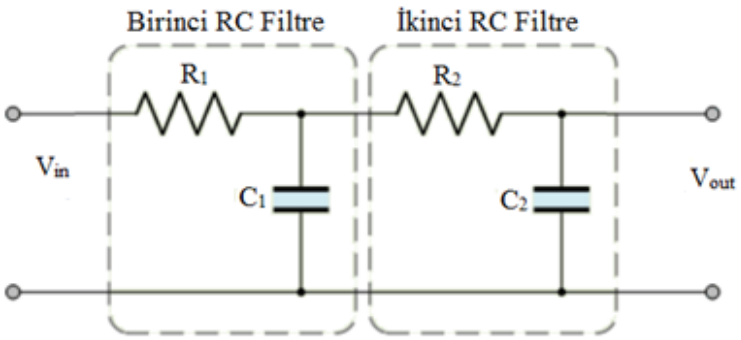
1.4.1.3. RC İkinci Derece Filtrenin Frekans Cevabı

Önceki konularda birinci derece basit yapılı alçak geçiren filtre örnekleri anlatılmıştır. Bazı durumlarda bu tür filtreler sinyallerin bastırılması için yeterli olmamıştır. Böyle bir durumda ikinci derece filtreler kullanılmıştır. İkinci derece filtreleri basit yapılı birinci derece filtrelerden ayıran en temel özellik yapılarında iki reaktif bileşen bulunmuştur.

Şekil 1.5'deki devre iki adet basit yapılı RC filtresinin seri şekilde bağlanmasıyla oluşmuştur. Böylelikle birinci derece filtreler kullanılarak ikinci derece filtreler elde edilmiştir. Aynı zamanda iki adet reaktif bileşen bulunmaktadır. İkinci derece RC filtrelerde kesim frekansı daha önce gösterildiğinden farklı olmuştur. İkinci dereceden bir filtrenin kesim frekansı denklem 1.4'de verilmektedir.

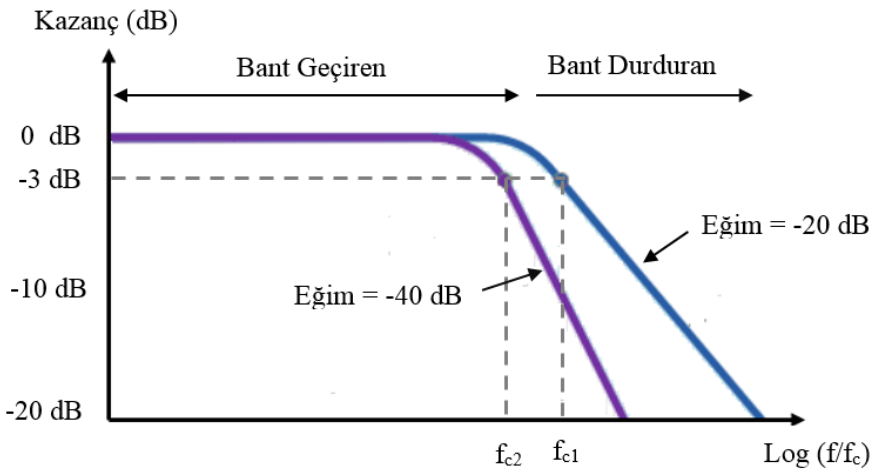
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}\,\text{Hz} \tag{1.4}$$

Denklem 1.4'den de görüldüğü üzere ikinci derece RC filtrelerde kesim frekansı devredeki dirençler ve kapasitelerle ters orantılıdır.



Şekil 1.5. İkinci dereceden RC filtre yapısı

Bu filtrelerin kazanç-frekans eğrisi Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Şekil 1.6'da görüldüğü üzere ikinci derece alçak geçiren filtrenin kesim frekansı, daha önce incelenen birinci derece alçak geçiren filtreye göre daha küçük olduğu görülmüştür. Şekil 1.6'da kesim frekansından sonraki düşüş eğiminden görmekteyiz ki ikinci dereceden alçak geçiren filtrelerin kesim frekansının birinci dereceden alçak geçiren filtrelerin kesim frekansına göre daha dar bir bant aralığından düşüş gerçekleşmiştir.



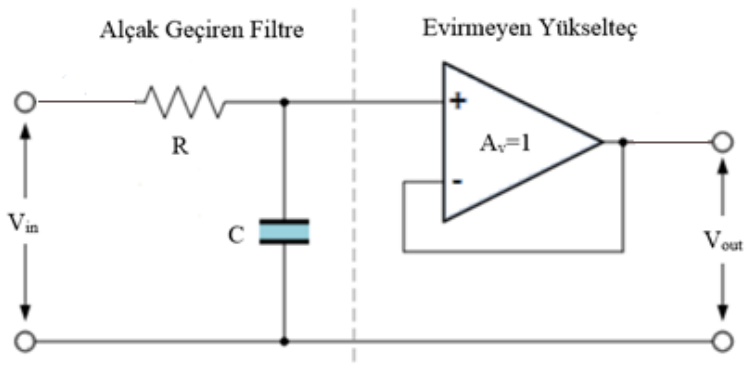
Şekil 1.6. İkinci dereceden RC alçak geçiren filtre frekans cevabı

1.4.2. Aktif Alçak Geçiren Filtreler

Aktif filtreler daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere devre içerisinde transistör, FET veya op-amp gibi devre elemanlarını bulunduran filtrelerdir. Daha önceki bölümlerde basit yapılı pasif filtre örneğini görülmüştür. Aktif filtrelerin tercih edilme sebeplerinden birisi pasif filtrelere göre aktif filtreler giriş sinyalinin genliğinin çıkış sinyali genliğinden daha büyük olması veya eşit olması durumu olmuştur. Pasif filtrelerde giriş sinyali genliği

çıkış sinyali genliğinden daha büyük olmuştur. Bu durum pasif filtreler bir sinyali çıkışa iletirken bir miktar kayıp verdiği anlamına gelmiştir. Bu nedenle aktif filtrelerdeki kuvvetlendirici elemanlar kullanılarak bu kaybın önüne geçilmiştir. Bu bölümde aktif alçak geçiren filtreler anlatılacaktır.

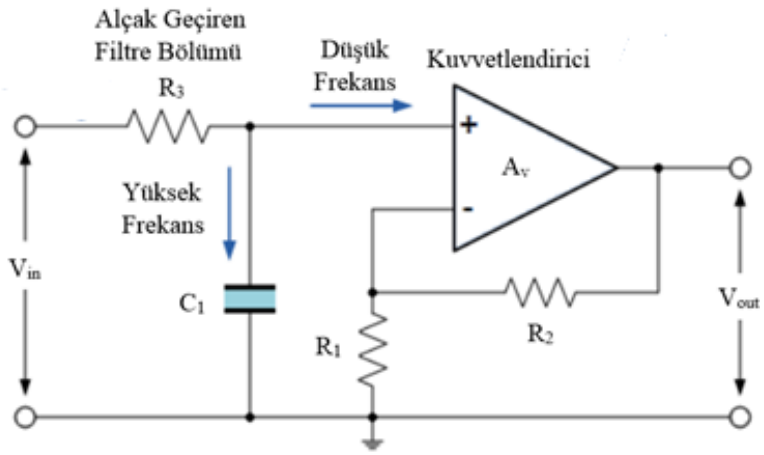
En çok tercih edilen, devreleri filtrelemede kullanılan ve anlaşılması en kolay aktif filtre, alçak geçiren aktif filtredir. Aktif alçak geçiren filtreler ele alındığında frekans cevabı ve çalışma prensipleri pasif filtreler ile aynı olmuştur. Bu noktada aktif filtreleri pasif filtrelerden ayıran en önemli özellik aktif filtrelerde kazanç ve bu kazancı sağlayabilmek için op-amp veya diğer kuvvetlendirici devre elemanları kullanılmış olmasıdır. Şekil 1.7'de gösterildiği üzere aktif alçak geçiren bir filtrenin en basit ifadesi eviren veya evirmeyen bir op-amp ile seri bağlı bir pasif alçak geçiren filtrenin birleştirilmesi ile elde edilmiştir.



Şekil 1.7. Basit aktif alçak geçiren filtre örneği

Birinci derece alçak geçiren aktif filtre, Şekil 1.7' de gösterildiği gibi basit bir RC pasif filtresinin evirmeyen bir operasyonel kuvvetlendiriciye düşük frekans sağlamasıyla oluşmuştur. Şekil 1.7'deki örnekte kullanılan op-amp, DC kazanç sağlayan voltaj takipçisi yapısı kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 1.7'deki devrenin avantajı alçak geçiren pasif filtre ile oluşturulan düşük çıkış empedansına sahip filtrenin, kesim frekansındaki empedans değişimlerinin oluşturduğu etkileri engellemiştir. Aynı zamanda filtre çıkışında kullanılan yükseltecin yüksek giriş empedansındaki aşırı yüklenmeleri önleyerek elemanları korumuştur. Böylelikle devrede yüksek kararlılığa sahip bir yapı oluşturulur fakat bu durum voltaj kazancının hiçbir durumda biri geçmemesini sağlamıştır. Bu tür filtrelerin en büyük dezavantajı voltaj kazancının yüksek olması istenilen bir durumda kazanç hiçbir durumda biri geçemediği için bu tür filtre devreleri

kullanılmamıştır. Eğer voltaj kazancının yüksek olduğu bir durum isteniliyorsa Şekil 1.8'deki gibi bir devre kullanılmıştır.



Şekil 1.8. Voltaj kazancı sağlayan aktif alçak geçiren filtre

Şekil 1.7 ve Şekil 1.8'deki filtrelerin kesim frekansı daha önce anlatılan pasif alçak geçiren filtreler ile aynıdır ve Denklem 1.5'deki gibi;

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}\ \text{Hz} \tag{1.5}$$

olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi frekans cevabı pasif filtrelerle aynı olmuştur.

Şekil 1.8'de gösterilen aktif alçak geçiren filtreye eklenen op-amp sayesinde belirli bir oranda kazanç sağlanılarak çıkışa aktarılmıştır. Bu op-amp'ın geçiş bandı kazancı Denklem 1.6'da ifade edilmiştir.

$$A_f = 1+\frac{R_2}{R_1} \tag{1.6}$$

olarak ifade edilmiştir. Bu denklemde A_f geçiş bandı kazancını ifade etmiştir. Evirmeyen yükselteç devresinde voltaj kazancının büyüklüğü geri besleme direnci olan R_2 direncinin, giriş direnci olan R_1 direncine bölünmesiyle elde edilen fonksiyon ile bulunmuştur. Sonuç olarak tüm devrenin kazancı Denklem 1.7'de olduğu gibi ifade edilmiştir.

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \tag{1.7}$$

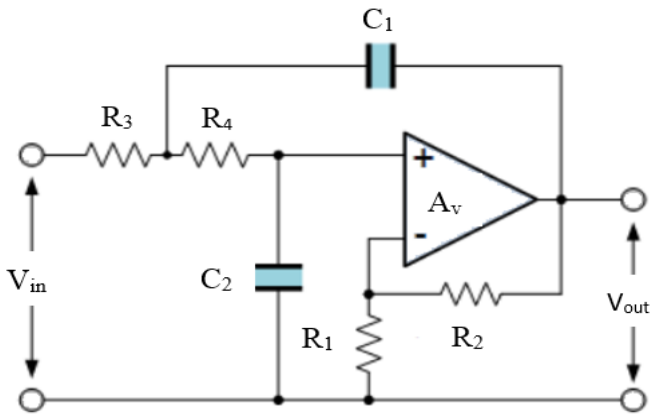
olarak ifade edilmiştir. Çıkış ve giriş gerilimlerinin açılımı yapılırsa;

$$A_v = \frac{A_f}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \tag{1.8}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Devrenin dış empedansı devre girişlerinin değişimine bağlıysa bu değişim aynı zamanda devrenin kesim frekansını da etkilemiştir. Bunu önlemek amacıyla devredeki kondansatör devredeki geri besleme direnci olan R_2 direncine paralel olarak bağlanmıştır. Şekil 1.9'da bu şekilde oluşturulan ikinci dereceden aktif alçak geçiren filtre örneği verilmiştir. Aynı zamanda devrenin kesim frekansı Denklem 1.9'da ifade edilmiştir.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C} \text{ Hz} \tag{1.9}$$

şeklinde ifade edilmiştir. İkinci dereceden aktif alçak geçiren filtrenin kesim frekansı aynı zamanda RC alçak geçiren filtrelerin kesim frekansı ile aynı olduğu görülmüştür.



Şekil 1.9. İkinci dereceden aktif alçak geçiren filtre

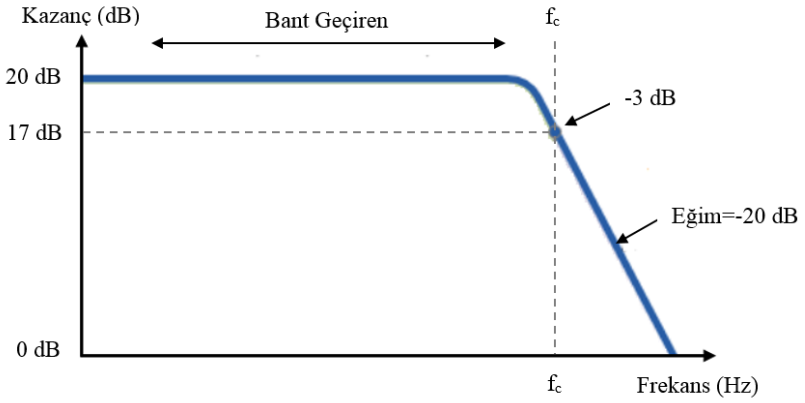
Şekil 1.9'da verilen devrenin frekans yanıtı grafiği Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Şekil 1.9'daki ikinci dereceden aktif alçak geçiren filtrenin voltaj kazancı kullanılan evirmeyen kuvvetlendiricinin kazancı ile eşdeğerdir ve bu kazanç;

$$A_v = 1+\frac{R_2}{R_1} \tag{1.10}$$

olarak ifade edilmiştir. Devrede birden fazla kapasite ve direnç kullanıldığından dolayı kesim frekansı diğer devrelerden farklı olmuştur. Dolayısıyla kesim frekansı;

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_3 R_4 C_1 C_2}} \text{ Hz} \tag{1.11}$$

olarak ifade edilmiştir.



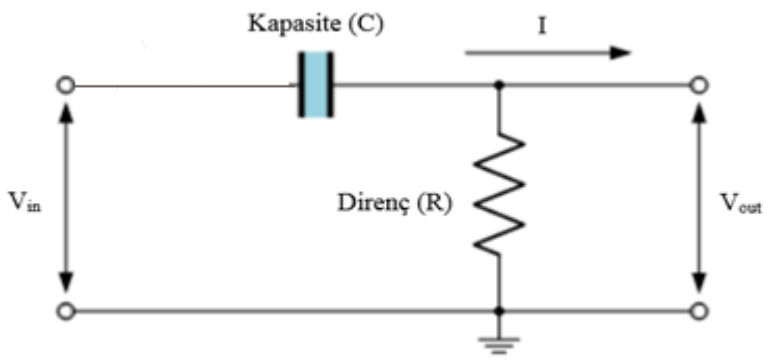
Şekil 1.10. İkinci dereceden aktif alçak geçiren filtre frekans cevabı

1.5. Yüksek Geçiren Filtreler

Yüksek geçiren filtreler, frekans bileşenleri kesim frekansının altında bulunduğu kısımlarını bastırırken kesim frekansı üstünde bulunan frekanslardaki sinyalleri çıkışa aktaran filtreler olmuştur. Yüksek geçiren filtreler genellikle hoparlörlere zarar verecek bas sinyallerini bastırarak ses uygulamalarında kullanılmıştır. Ayrıca bir diğer yaygın kullanım alanı dijital görüntü işleme ve resim içerikli çalışmalarda görüntü modifikasyonlarının yapılması için kullanılmıştır. Yüksek geçiren filtreler, alçak geçiren filtrelerde olduğu gibi aktif ve pasif filtreler olarak ikiye ayrılmıştır.

1.5.1. Pasif Yüksek Geçiren Filtreler

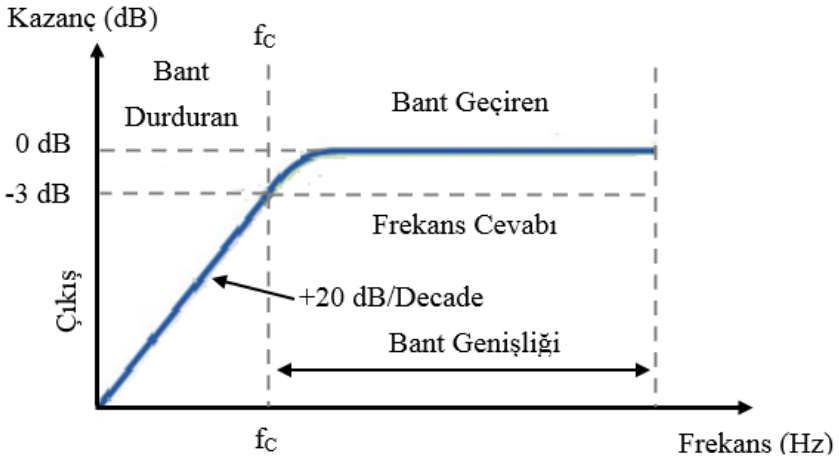
Pasif yüksek geçiren filtre devreleri daha önceki bölümlerde anlatılan pasif alçak geçiren filtreler gibi basit devre elemanlarından oluşmuştur. Pasif yüksek geçiren filtrelerin devre yapısı pasif alçak filtrelerin devre yapısının tam tersi olmuştur. RC pasif yüksek geçiren filtre devresi Şekil 1.11'de gösterildiği gibi kondansatör ve direncin seri bağlanmasıyla oluşmuştur.



Şekil 1.11. RC pasif yüksek geçiren filtre

Şekil 1.11'de oluşturulan devrede kondansatörün reaktans değeri çok yüksek olduğundan dolayı kondansatörün bulunduğu kol açık devre gibi davranmıştır. Buradaki açık devre gibi davranma durumu bütün giriş gerilimi değerlerinde, frekans kesim frekansına çıkana kadar devam etmiştir.

Şekil 1.12'de gösterilen RC pasif yüksek geçiren filtre frekans cevabında kesim frekansının üstünde bulunan frekans değerlerinde kondansatörün reaktansı uygun miktarlarda indirgenmiş ve kondansatörün bulunduğu göz kısa devre gibi davranmış ve kesim frekansı üzerinde uygulanan bütün gerilimler doğrudan çıkıştan elde edilmiştir.

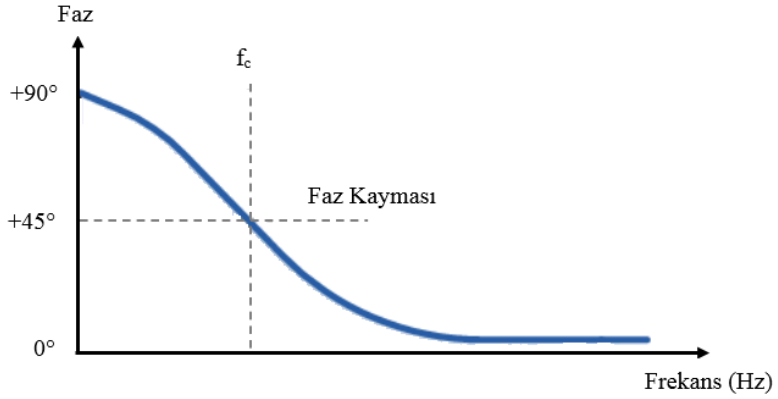


Şekil 1.12. RC pasif yüksek geçiren filtre frekans cevabı

Pasif yüksek geçiren filtre frekans cevabının eğrisi pasif alçak geçiren filtrenin eğrisinin tam tersi olmuştur. Şekil 1.12'de gösterildiği gibi kesim frekansı (f_c);

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \text{ Hz} \qquad (1.12)$$

şeklinde hesaplanmıştır.



Şekil 1.13. Pasif yüksek geçiren filtre faz kayması grafiği

Aynı zamanda bu devrenin elemanlarından meydana gelen bir faz kayması yaşanmıştır. Şekil 1.13'de bu faz kayması gösterilmiştir. Şekil 1.13'de gösterilen faz kayması ifadesinde filtrenin fazında bir değişme görülmüştür. Bu değişim;

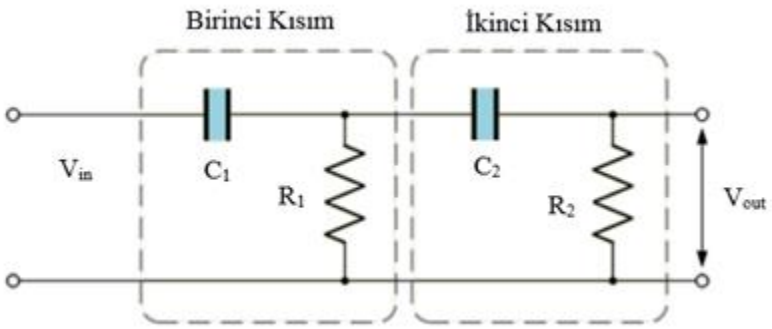
$$\varphi = \tan^{-1}\frac{1}{2\pi fRC} \tag{1.13}$$

olarak ifade edilmiştir. Maksimum devre kazancı ise;

$$A_v = \frac{R}{\sqrt{R^2+X_C^2}} \tag{1.14}$$

olarak bulunmuştur. Denklem 1.14'de belirtilen kapasitör reaktansı düşük frekanslara sonsuz olarak kabul edildiğinden dolayı böyle bir durumda çıkış voltajı sıfır olmuştur. Yüksek frekanslarda ise kapasitör reaktansı yaklaşık olarak sıfir olup, bu durum çıkış voltajının giriş voltajına eşit olmasına neden olmuştur.

Yukarıda ifade edilen filtre devresi birinci dereceden filtre olup bazı durumlarda bu filtre tam olarak filtrelenmek istenen sinyali filtrelemek için yeterli olmamıştır. Böyle bir durumda ikinci dereceden filtreler kullanılmıştır. Bu filtrelerde de daha önceden bahsedildiği üzere iki adet reaktif eleman bulunduğundan dolayı böyle ifade edilmiştir. Şekil 1.14'de ikinci dereceden yüksek geçiren bir pasif filtre gösterilmiştir.



Şekil 1.14. İkinci dereceden pasif yüksek geçiren filtre

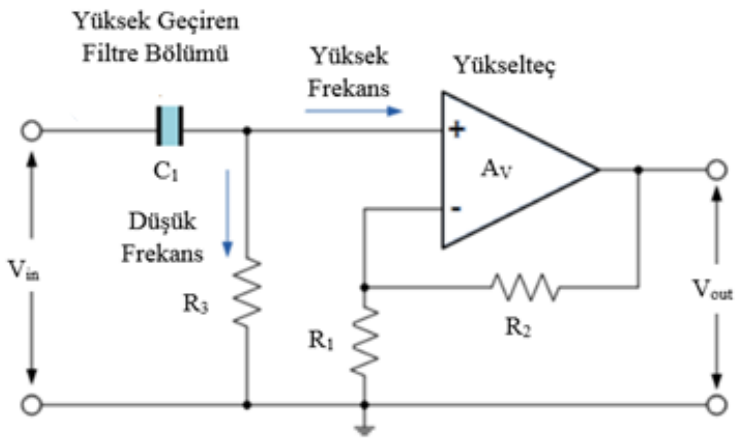
Filtreleme işleminin yanında bazı durumlarda birinci dereceden yüksek geçiren pasif filtreler istenilen kesim frekanslarını sağlamamıştır. Böyle bir durumda da ikinci dereceden pasif yüksek geçiren filtreler tercih edilmiştir. İkinci dereceden pasif yüksek geçiren bir filtrenin kesim frekansı;

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}\ \text{Hz} \tag{1.15}$$

olarak hesaplanmıştır. Denklem 1.15'den görüleceği üzere kesim frekansı alçak geçiren filtrelerde olduğu gibi burada da kondansatörlerin ve dirençlerin değerlerine bağlıdır.

1.5.2. Aktif Yüksek Geçiren Filtreler

Birinci dereceden aktif yüksek geçiren filtreler, alçak frekanslı sinyalleri bastırıp yüksek frekanslı sinyalleri geçiren filtreler olmuştur. Aktif alçak geçiren filtre devrelerinde olduğu gibi aktif yüksek geçiren filtreler de pasif filtre devre elemanlarına ek olarak bir yükselteç kullanılarak tasarlanmıştır.



Şekil 1.15. Evirmeyen op-amp'lı aktif yüksek geçiren filtre

Aktif yüksek geçiren filtreler, Şekil 1.15'de gösterildiği gibi pasif bir filtre sistemini takip eden bir evirmeyen işlemsel yükselteçten oluşmuştur. Aktif yüksek geçiren filtrenin frekans cevabı pasif yüksek geçiren filtreler ile aynı olmuştur. Evirmeyen op-amp'lı devrede voltaj kazancının büyüklüğü, geri besleme direnci olan R_2 direncinin, giriş direnci olan R_1 direncine bölünmesiyle elde edilmiştir. Toplam voltaj kazancı ise;

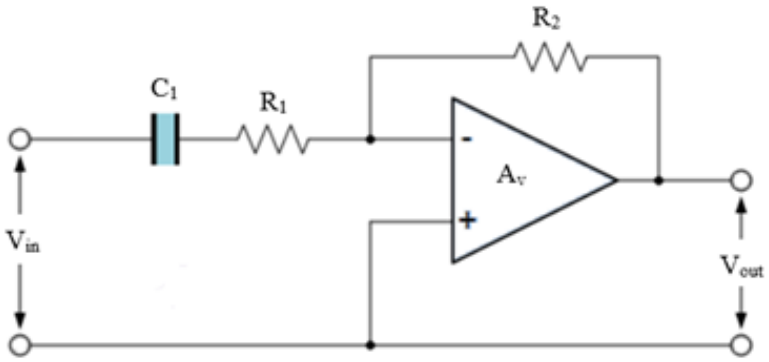
$$A_v = \frac{A_f(\frac{f}{f_c})}{\sqrt{1+(\frac{f}{f_c})^2}} \tag{1.16}$$

şeklinde elde edilmiştir. Denklem 1.16'da ifade edilen A_f (Sistemin geçiş bant kazancı), evirmeyen op-amp devresinin kazancına eşit olmuştur. Yani R_2 direncinin R_1 direncine bölünüp bir eklenmesiyle bulunmuştur. Aktif filtrelerde olduğu gibi aktif yüksek geçiren filtrelerde de kesim frekansı;

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}\ \text{Hz} \tag{1.17}$$

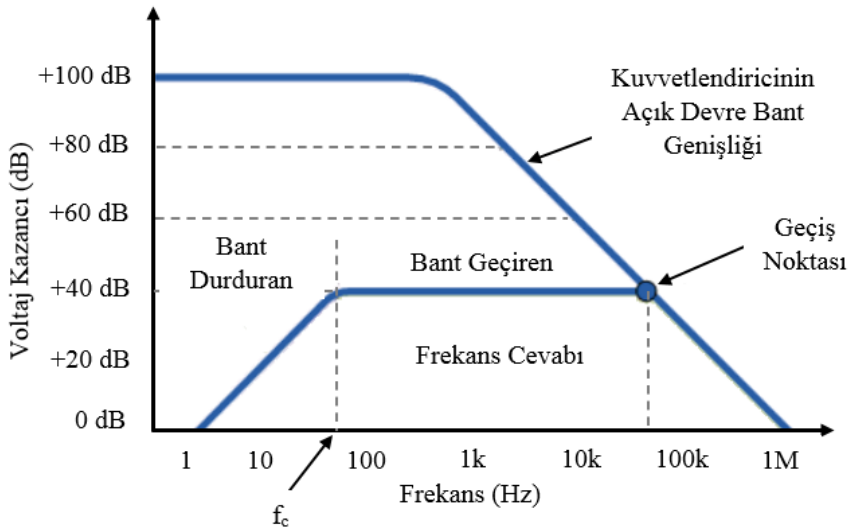
olarak ile ifade edilmiştir.

Aynı zamanda evirmeyen yükselteç ile tasarlanan bu filtre devresi bunun yerine eviren bir yükselteç ile tasarlanmıştır. Böyle bir durumda filtrenin kesim frekansı değişmezken kazanç filtrede kullanılan op-amp değiştiğinden dolayı eviren op-amp'ın kazancına bağlı olarak değişmiştir. Bu kazanç R_2 direncinin R_1 direncine bölümünün negatif değeri kadar olmuştur. Şekil 1.16'da eviren yükseltecin devre üzerindeki bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Eviren op-amp'lı aktif yüksek geçiren filtre

Hem eviren hem de evirmeyen yükselteçli devrenin frekans cevap grafiği aynıdır ve Şekil 1.17'de ifade edilmiştir.

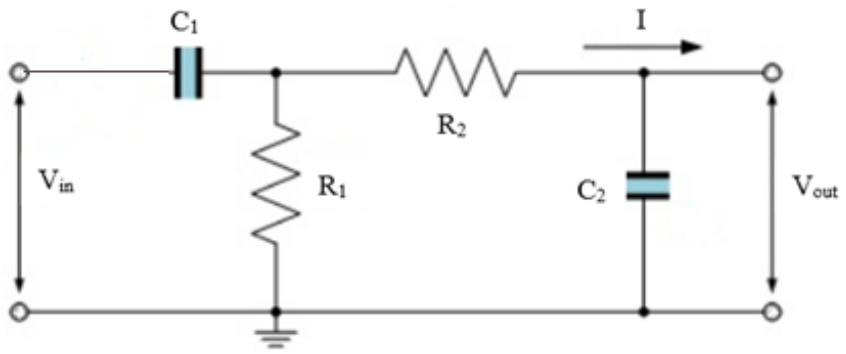


Şekil 1.17. Kuvvetlendirici devresi bant genişliği ve aktif alçak geçiren filtre frekans cevabı

Şekil 1.17'de ifade edilen grafikte alttaki çizgi aktif yüksek geçiren filtrenin frekans cevabını ifade ederken, üstte bulunan çizgi ise devrede kullanılan kuvvetlendiricinin açık devre bant genişliğini ifade edilmiştir. İkinci dereceden aktif yüksek geçiren filtreler, ikinci dereceden aktif alçak geçiren filtrelerle birebir aynı olduğundan dolayı burada bahsedilmemiştir.

1.6. Bant Geçiren Filtreler

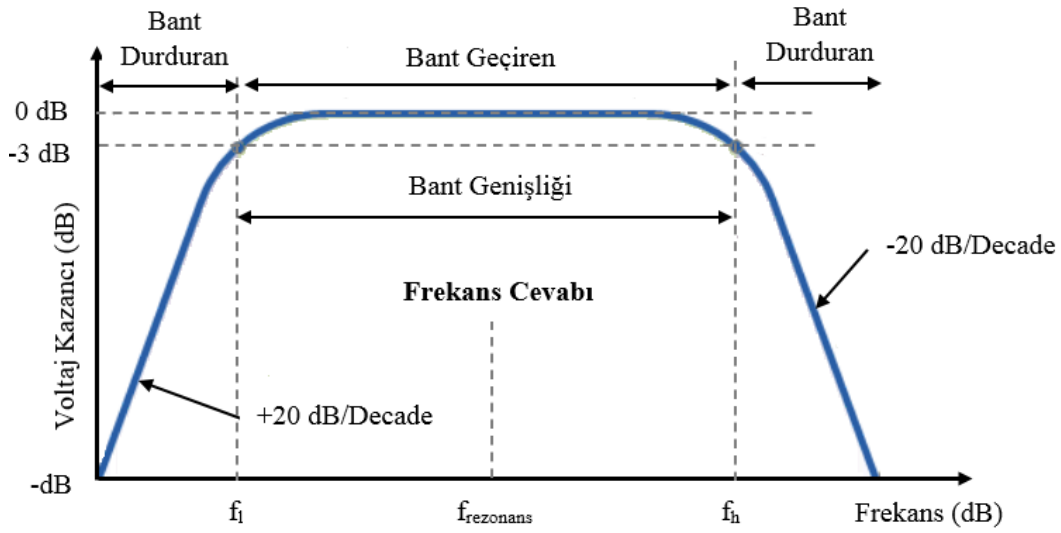
Bant geçiren filtreler en basit ifadeyle bir adet yüksek geçiren filtre ile bir adet alçak geçiren filtrenin birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Bant geçiren filtrelerin frekans cevabı grafiği bant durduran filtreler ile benzer olup, iki adet frekans aralığı vardır. Dolayısıyla iki adet frekans aralığı olduğuna göre iki adet kesim frekansı bulunmuştur. Şekil 1.18'de gösterilen devre pasif bir bant geçiren filtredir.



Şekil 1.18. Pasif bant geçiren filtre

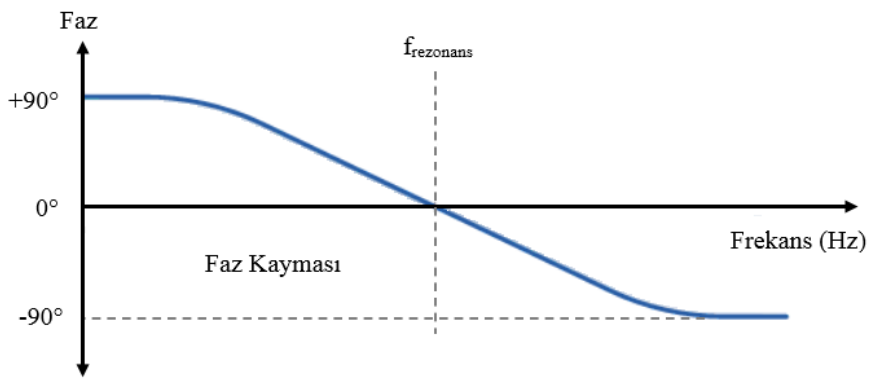
Bant geçiren filtrelerde iki adet kesim frekansı bulunmuştur. Bu kesim frekansları Şekil 1.19'da gösterilmiştir. Şekil 1.19'da gösterilen birinci kırılma noktası yüksek geçiren filtrenin kesim frekansını ifade ederken, ikinci kırılma noktası ise alçak geçiren filtrenin kesim frekansını ifade etmiştir. Pasif yüksek geçiren filtrelerin frekans cevabı, aktif yüksek geçiren filtrelerin frekans cevabı ile aynıdır ve Şekil 1.19'da frekans yanıtı grafiği gösterilmiştir. Bant geçiren filtreler aktif filtre olarak da tasarlanmıştır. Bunun için daha önceki filtre türlerinde olduğu gibi bir yükseltece ihtiyaç duyulmuştur. Aktif bant geçiren filtre, birleştirilen yüksek geçiren filtre ve aktif geçiren filtre arasına bir yükselteç eklenerek kurulmuştur. Aktif bant geçiren filtrelerin kesim frekans bölgeleri daha dik açılı olduğundan dolayı daha kesin sonuçlar vermiştir. Bu nedenle pratik uygulamalarda genellikle aktif bant geçiren filtreler tercih edilmiştir.

Şekil 1.19'daki grafikten görüldüğü üzere eğim açısı 20 dB/Decade verilmiştir. Bu açı pasif bir filtreye göre tasarlanmıştır. Eğer eğimde daha keskin bir düşüş istenilen bir devrede kullanılacaksa aktif bir filtre tercih edilmiştir. Alçak kesim frekansı ve yüksek kesim frekans değerleri arasındaki sinyaller çıkışa aktarılırken bu değerler dışındaki frekanslar kesime uğrayarak bastırılmış ve çıkışa aktarılmamıştır.



Şekil 1.19. Aktif bant geçiren filtre frekans cevabı

Aynı zamanda bu filtrenin faz değişim eğrisi Şekil 1.19'da gösterilmiştir. Şekil 1.20'de ifadeye göre aktif bant geçiren filtrenin merkez frekansında faz değişimi görülmüştür.



Şekil 1.20. Aktif bant geçiren filtre faz değişim grafiği

Şekil 1.20'de ifade edilen rezonans frekansı ise alçak geçiren filtre ve yüksek geçiren filtrelerin kesim frekanslarının geometrik ortalaması ile elde edilmiştir.

$$f_{rezonans} = \sqrt{f_l \times f_h} \tag{1.18}$$

1.7. Bant Durduran Filtreler

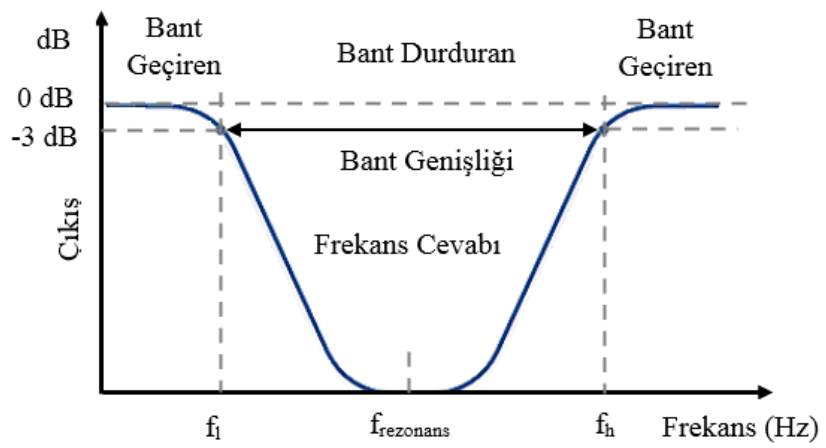
Bant durduran filtreler kullanıldıkları özel durumlara ve amaçlarına göre ayrıca çentik (notch) filtreler veya reddetme filtreleri olarak bilinir. Bu filtreler belirli frekans aralığındaki frekansları durduran veya engelleyen, bu frekanslar dışındaki sinyallerin geçişine olanak sağlayan filtreler olmuştur. Bant geçiren filtrelerin özel bir türü olan çentik filtreler, dar bir frekans bandının iletimini ortadan kaldıran ve diğer frekansların iletimini sağlayan filtrelerdir. Bu tip filtreler bir bant aralığında frekansları durdurduğu için ayrıca bant eleme filtresi olarak da bilinmektedir.

Önceki bölümlerde görüldüğü üzere bant geçiren filtrelerde olduğu gibi bant durduran filtrelerde de geniş bant ve dar bant durumu mevcut olmuştur. Eğer filtre geniş bant bir filtre ise bant durdurma filtresi olarak adlandırılmış, dar bir bant aralığını durduruyorsa çentik filtre olarak adlandırılmıştır. Bant durdurma filtreleri, bant geçiren filtrelerin çalışma prensiplerinin tam tersi şekilde çalışmıştır. Bu sebepten dolayı çentik filtreler bant geçiren filtrelerin tamamlayıcısı olarak sayılmıştır.

Çentik filtrelerin bant genişliği iki kesim frekansı bulunarak elde edilmiştir. Bu kesim frekansları klasik olarak düşük geçiren filtrelerde olduğu gibi düşük geçiren bölgenin kesim frekansı ve yüksek geçiren filtrelerde olduğu gibi yüksek geçiren filtrenin kesim frekansı farkı alınarak elde edilmiştir. Denklem 1.19'da bant genişliği;

$$BW = f_h - f_l \tag{1.19}$$

olarak bulunmuştur ve Şekil 1.21'de grafik olarak bu durum ifade edilmiştir.



Şekil 1.21. Bant durduran filtrelerin frekans cevabı grafiği

Sinyal içerisinde gürültünün mevcut olduğu bir durumda dar bant sinyallerin tespiti ve filtrelenmesi, sinyal işleme tekniklerinin önemli uygulamalarından olmuştur. Bu şekilde uygulanan çoğu sistem düşük güç sistemlerine entegre olduğundan dolayı minimum enerji kaybıyla bu sinyallerin filtrelenmesi gerekmiştir. Bu nedenle bant enerjisini değiştirmeden dar bant sinyali ortadan kaldırmak gerekmiştir. Bu tür sinyaller bir çentik filtre kullanılarak filtrelenmiştir.

2.BÖLÜM

KULLANILAN YÖNTEMLER VE PARAMETRELER

2.1. '*Q*' ve 'f_c' Parametreleri

'f_c' ile temsil edilen filtrenin kesim frekansı genel olarak frekans yanıtının geçiş bandındaki değerinin 3 dB daha aşağıya düştüğü nokta olarak belirlenmiştir. Kısaca geçiş bandının düşüşe geçtiği frekans olarak da ifade edilebilir. Örneğin, 0,1 dB Chebyshev filtresinde yanıtın 0,1 dB'den büyük olduğu frekanslarda bir kesim frekansına sahiptir denilmiştir.

Q filtrenin kalite faktörü olarak adlandırılmaktadır. Bu parametrenin *a* cinsinden karşılığı Denklem 2.1'de verilmiştir.

$$\alpha = \frac{1}{Q} \tag{2.1}$$

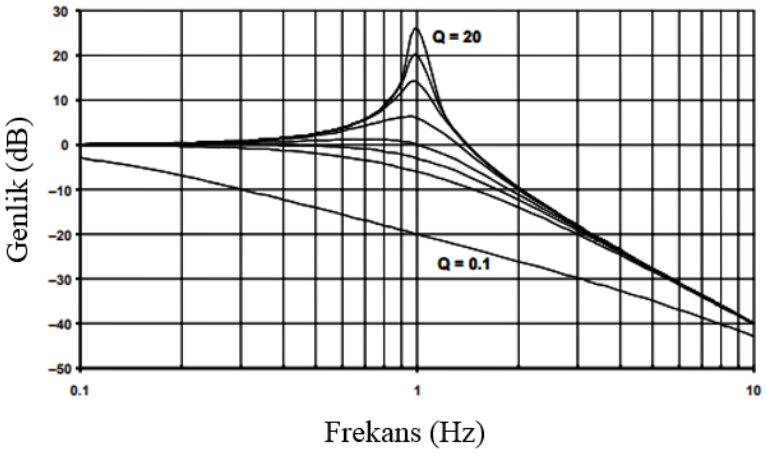
Bu genellikle sönüm oranı olarak bilinir. Sönüm oranı Denklem 2.2 ile verilmektedir.

$$\xi = 2\alpha \tag{2.2}$$

2.1.1. Alçak Geçiren Filtrelerde Kalite Faktörü ve Kesim Frekansı

Zayıflama eğrisinin şekli filtrenin zaman domeninde yanıtını tanımlayan faz ve gecikme eğrilerinin yanı sıra, yalnızca gerçek frekansın kendisi yerine gerçek frekansın kesim frekansına oranı incelenirse aynı olmuştur. Filtreyi 1 rad/s'ye normalleştirerek filtreleri tasarlamak ve karşılaştırmak için basit bir sistem geliştirilebilmiştir. Ardından filtre, gerçek bir filtrenin bileşen değerlerini belirlemek için kesim frekansına göre ölçeklenmiştir.

Eğer $Q > 0{,}707$ ise filtre yanıtının tepe yaptığı bir nokta oluşmuştur. Eğer $Q < 0{,}707$ ise kesim frekansındaki düşüş daha büyük olmuştur. Aynı zamanda daha yumuşak bir düşüş eğimine sahip olmuş ve kesim frekansı daha erken başlamıştır. Şekil 2.1'de ikinci dereceden bir alçak geçiren filtrenin '*Q*' değerine karşılık değişim grafiği verilmektedir.



Şekil 22.1. Değişken '*Q*' değerlerine karşılık alçak geçiren filtre cevabı

Şekil 2.1'de kalite faktörü artarken frekans yanıtındaki dalgalanma miktarında artış gösterilmiştir. Alçak geçiren filtrelerde transfer fonksiyonunun, açısal frekans ve kalite faktörü cinsinden ifadesi;

$$H(s) = \frac{H_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \tag{2.3}$$

olarak bulunmuştur. 'H_0' geçiş bandı kazancı ve açısal frekans 'ω_0' denklem 2.4'de verilmektedir.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \tag{2.4}$$

2.1.2. Yüksek Geçiren Filtrelerde Kalite Faktörü ve Kesim Frekansı

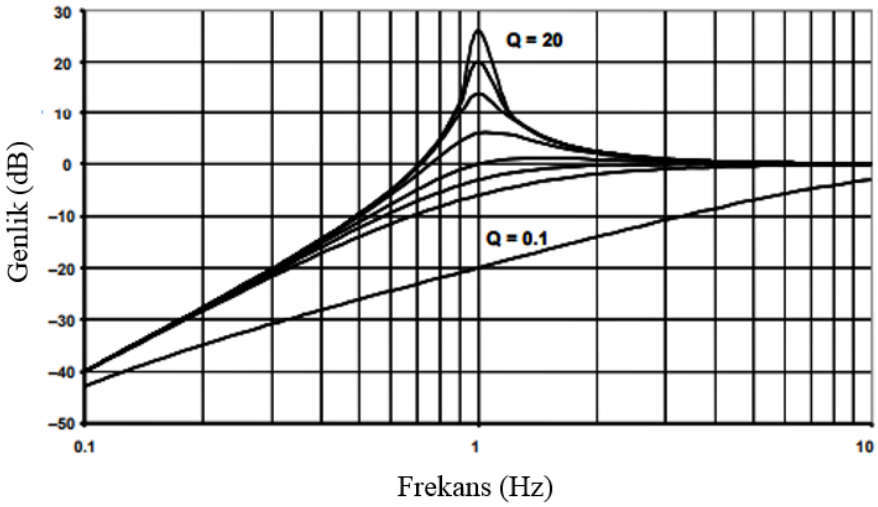
Alçak geçiren filtre transfer fonksiyonu eşitliğinde 'H_0' yerine 'H_0s^2' yazıldığında alçak geçiren filtre, yüksek geçiren bir filtreye dönüşmüştür. Yüksek geçiren bir filtrenin frekans yanıtı şekil olarak alçak geçiren filtrenin 'y' ekseninde ters çevrilmiş hali eşittir.

Yüksek geçiren filtrenin açısal frekans ve kalite faktörü açısından ifadesi;

$$H(s) = \frac{H_0 s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \tag{2.5}$$

olarak ifade edilmiştir.

İkinci dereceden bir yüksek geçiren filtrenin kalite faktörü değişiminin frekans yanıtı üzerindeki etkisi Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Şekil 2.2'de yüksek geçiren filtrenin kalite faktöründeki artış filtrenin genlik yanıtındaki dalgalanma miktarında artışa sebep olduğu görülmüştür.



Şekil 23.2. Değişken '*Q*' değerlerine karşılık yüksek geçiren filtre cevabı

2.1.3. Bant Geçiren Filtrelerde Kalite Faktörü ve Kesim Frekansı

Alçak geçiren filtrenin transfer fonksiyonunun payından bulunan 'H_0' değeri yerine '$H_0\omega_0^2$' koyulursa transfer fonksiyonu bant geçiren filtre transfer fonksiyonuna dönüşür.

O halde bant geçiren filtre transfer fonksiyonu;

$$H(s) = \frac{H_0\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \tag{2.6}$$

Şeklinde ifade edilmiştir. Burada 'ω_0'değeri filtre kazancının zirve yaptığı frekanstır. 'H_0' değeri devre kazancını ifade eder ve Denklem 2.7'de olduğu gibi tanımlanmıştır.

$$H_0 = {}^{H}/_{Q} \tag{2.7}$$

Kalite faktörü olan '*Q*' bant geçiren filtreler için özel bir anlam ifade etmiştir. Bant geçiren filtreler için filtrenin seçiciliğini ifade etmiştir. Bu parametre;

$$Q = \frac{f_c}{f_h - f_l} \tag{2.8}$$

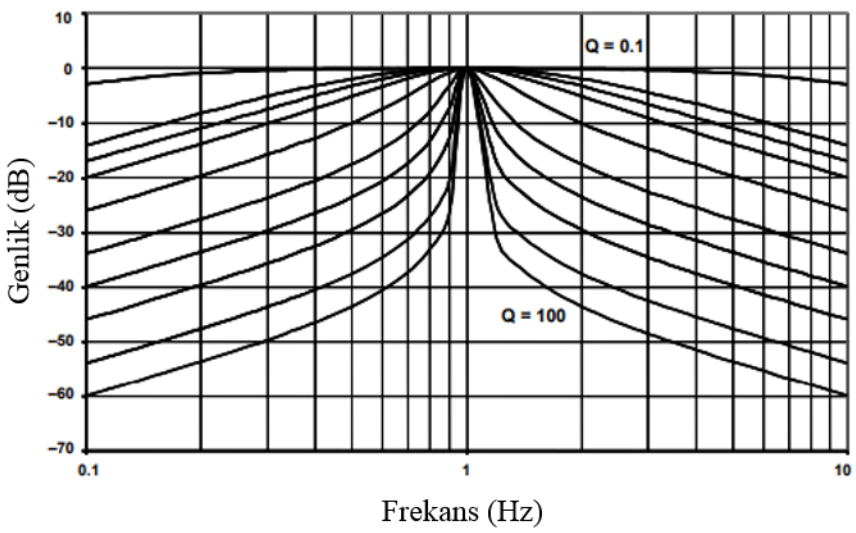
olarak bulunmuştur. Yüksek kesim frekansı ve alçak kesim frekansının değeri, bant geçiş bölgesinin maksimum 3 dB düştüğü veya arttığı değer olmuştur. Aynı zamanda yüksek kesim ve alçak kesim frekansları kullanılarak filtrenin bant genişliği bulunmuştur. Rezonans frekansı yüksek kesim frekansı ve alçak kesim frekansının geometrik ortalaması olmuştur.

$$BW = f_h - f_l \tag{2.9}$$

Bu kesim frekansının logaritmik bir ölçekte alçak kesim frekansı ile yüksek kesim frekansı arasında yarı yolda görüneceği anlamına gelmiştir. Bant geçiren filtrelerde kesim frekansı;

$$f_c = \sqrt{f_h f_l} \tag{2.10}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Ayrıca logaritmik ölçekte bant geçiren filtrede bant geçiş bölgesinde frekans yanıtı her zaman alçak kesim frekansı ile yüksek kesim frekansı birbirine simetrik olmuştur. Bu simetriklik aynı zamanda Şekil 2.3'de gösterilen kalite faktörüne bağlı değişim grafiğinde de görülmüştür.



Şekil 24.3. Değişken *Q* değerlerine karşılık bant geçiren filtre cevabı

Bant geçiren filtreler iki farklı yol ile tanımlanmıştır. Bunlardan birincisi dar bant durumu olmuştur. Bu durum incelediğimiz bant geçiren filtrede anlatılmıştır. Bu durumda filtre tek bir yapı olarak incelenmiştir.

Anlatılan ikinci durum ise yüksek kesim ve alçak kesim frekansları arasında geniş bir açıklık bulunuyorsa, bant geçiren filtre ayrı ayrı olarak alçak geçiren ve yüksek geçiren olarak iki kısma ayrılarak incelenmiştir. Bu bağlamda devre olarak en az iki parçaya ayrılmış demektir ve frekans olarak ise en az dörde ayrıldığı anlamına gelmiştir. Bu duruma geniş bant durumu denilmiştir.

2.1.4. Bant Durduran Filtrelerde Kalite Faktörü ve Kesim Frekansı

Bant durduran filtrenin transfer fonksiyonu diğer filtrelerde olduğu gibi alçak geçiren filtrenin transfer fonksiyonunda pay kısmındaki 'H_0' yerine '$s^2+\omega_z^2$' yazılarak bant geçiren filtre elde edilmiştir. Bant geçiren filtrelerdeki geniş bant durumda olduğu gibi,

bant durduran filtrelerde de iki kesim frekansı arasındaki mesafe fazla ise bant geçiren filtrede olduğu gibi filtre ayrı ayrı incelenmiştir. Bu durumda bant geçiren filtrede olduğu gibi burada da dar bant-bant durduran filtre ve geniş bant-bant durduran filtre olarak ikiye ayrılmıştır. Sonraki bölümlerde tasarlanan ve yapılan çalışmada çentik filtre olarak bilinen dar bant-bant durduran filtre incelenmiştir.

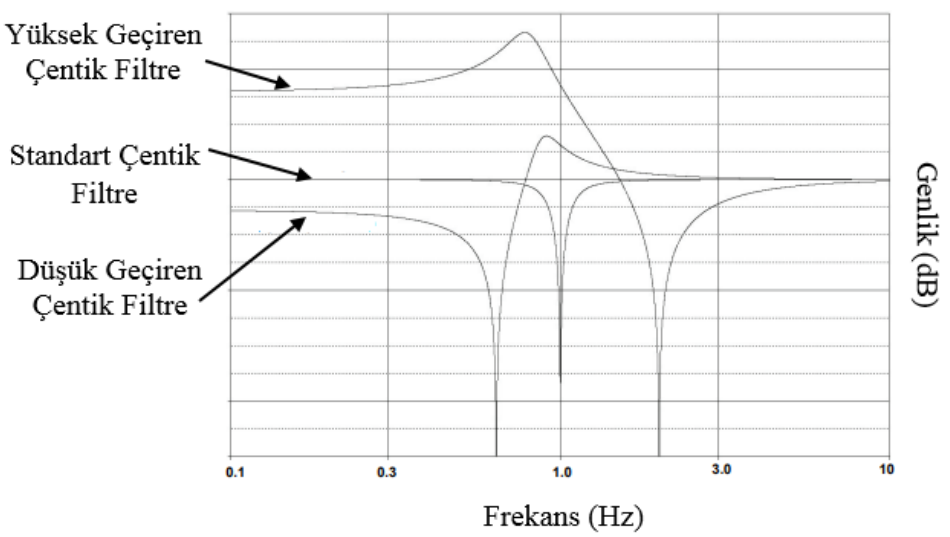
Bir çentik filtrenin transfer fonksiyonu;

$$H(s) = \frac{H_0(s^2 + \omega_z^2)}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \tag{2.11}$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Çentik filtre karakteristiğini oluşturan üç farklı durum bulunmaktadır. Şekil 2.4'de bu üç durum ifade edilmiştir. Şekil 2.4'deki durumların oluşmasında kutup frekansı (ω_0) ve sıfır frekansının (ω_z) etkisi vardır. Bu sayede çentik filtreler bu etki sebebiyle üçe ayrılmıştır; standart çentik filtre, düşük geçiren çentik filtre, yüksek geçiren çentik filtre.

Sıfır frekansı kutup frekansına eşit olduğu durumlarda standart bir çentik filtre elde edilmiştir. Şekil 2.4'de verilen örnekte sıfır frekansı, kutup frekansını tanımlayan eğrinin bulunduğu açısal düzlemde yer almış ve kutup frekansının bulunduğu düzlemi kesmiştir.



Şekil 25.4. Standart, düşük geçiren ve alçak geçiren çentik filtre frekans cevabı

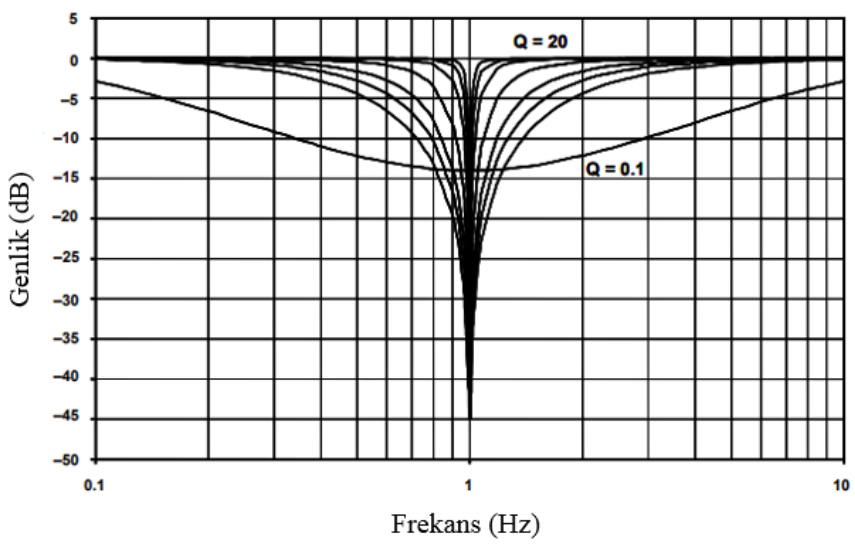
Bir düşük geçiren çentik filtrenin oluşması için koşul, sıfır frekansının kutup frekansından büyük olmuştur. Bu durumda sıfır frekansları sıfır frekanslarının eğrisinin dışında yer almıştır. Bunun pratikteki anlamı, filtrenin sıfır frekansının altındaki yanıtının sıfır

frekansının üstündeki yanıtından daha büyük olacağı anlamına gelmiştir. Bu şekilde çalışan bir filtrenin sonucu eliptik bir alçak geçiren çentik filtre ile sonuçlanmıştır.

Yüksek geçiren çentik filtrenin oluşma şartları, alçak geçiren çentik filtrenin oluşma şartlarının tam tersi olmuştur. Bu da sıfır frekansının kutup frekansından küçük olduğu durumlarda yüksek geçiren çentik filtre oluşmuştur. Bu durumda sıfır frekansı kutup frekansları eğrisinin içinde yer almıştır. Pratik olarak bunun anlamı, sıfır frekansının altındaki filtre yanıtının sıfır frekansı üstündeki filtre yanıtından daha düşük olmuştur. Bu anlamda tüm şartlar gerçekleştiğinde eliptik bir yüksek geçiren çentik filtre oluşmuştur. Çentik filtrenin '*Q*' parametresine bağlı değişimi Şekil 2.5'de gösterilmiştir.

2.2. Filtre Tipleri ve Analiz Yöntemleri

Belirli bir filtrenin zayıflamaya ve faz gereksinimlerine cevap verebilecek birçok transfer fonksiyonu bulunmuştur. Bu sadece filtrenin entegre edildiği sisteme ve analiz yöntemlerine göre değişmiştir. Bir filtrenin frekans cevabı grafiği oluşturulduğunda zaman alanına karşı frekans alanı cevabının önemi tespit edilmiştir. Eğer böyle bir durum oluşmadıysa yani filtre tasarlanırken frekans cevabının zaman karşısında konumu belirlenmediyse bu durum filtre devresinde karmaşıklığa ve dolayısıyla maliyet olarak artışa neden olmuştur.



Şekil 26.5. Çentik filtre genliği ve çeşitli '*Q*' değerlerine karşılık frekans değerleri

Bu konu altında filtre analiz tekniklerinden üçü olan Butterworth, Chebyshev, Bessel filtrelerin incelenmesi tercih edilmiştir.

2.2.1. Butterworth Filtreler

Butterworth filtreler zayıflama ve faz cevabı arasındaki en iyi uyuşmayı sağlayan filtre yapılarıdır. Butterworth filtre yapılarında bant geçirme bölgesinde veya bant durdurma bölgelerinde dalgalanma yaşanmaz ve bu nedenle bu tür yapılar maksimal düz filtreler olarak da adlandırılmıştır. Ancak Butterworth filtrelerde dalgalanma yaşanmamasının olumlu olmasının yanında olumsuz bir yanı var olmuştur. Butterworth filtreler bu dalgalanmamayı, bant durdurma bölgesi ve bant geçiş bölgesi arasında nispeten geniş geçiş bölgesine sahip olmasıyla elde edilmiştir. Bu da daha geniş bir bant genişliği kullanılmasına neden olmuş ve bu maliyet olarak sisteme yansımıştır.

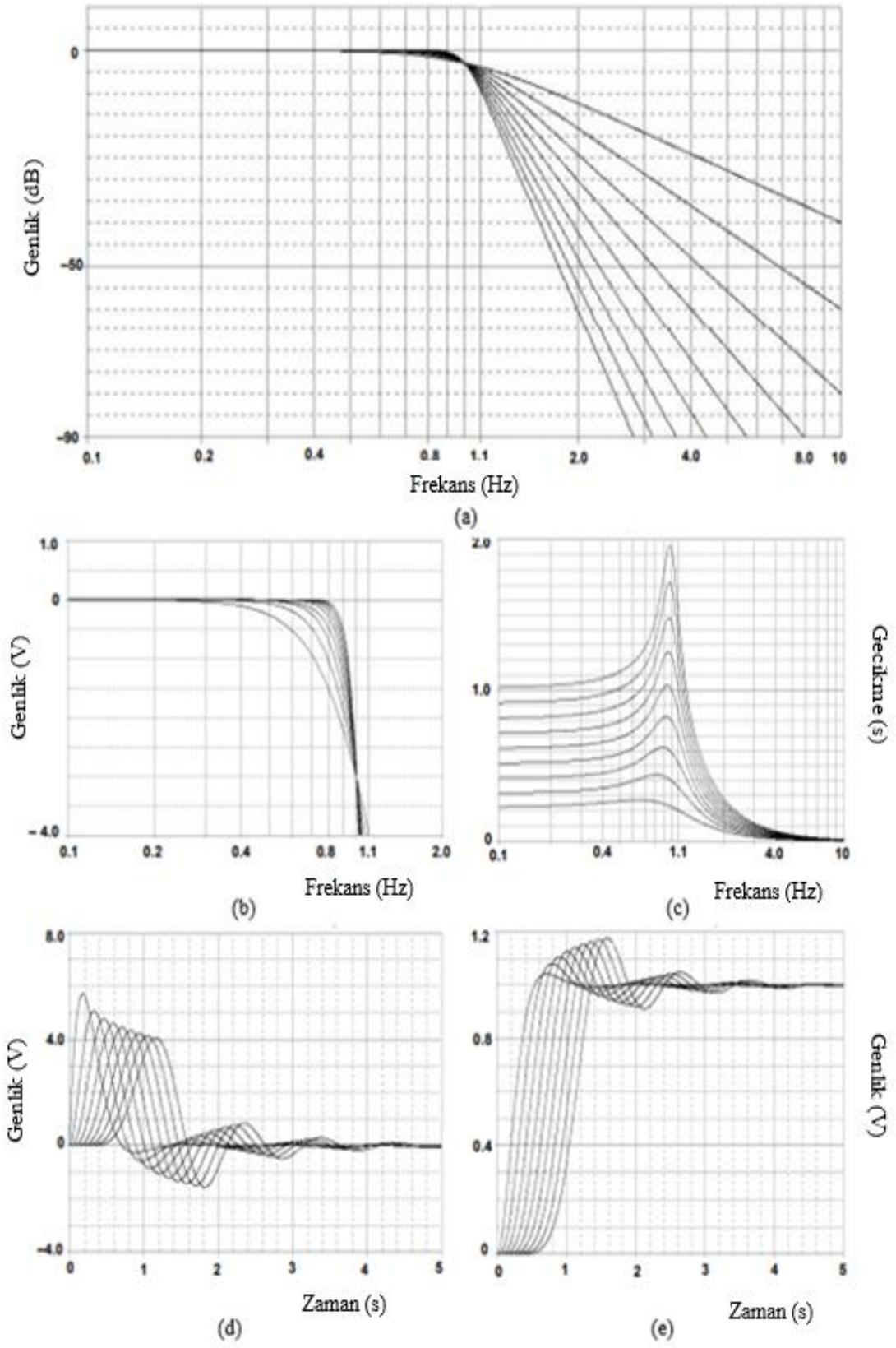
Butterworth filtresinin normalize edilmiş kutupları birim çembere '*s*' düzleminden düşer ve kutup pozisyonları;

$$-\sin\frac{(2\mathrm{K}-1)\pi}{2\mathrm{n}}+\ \mathrm{j}\cos\frac{(2\mathrm{K}-1)\pi}{2\mathrm{n}} \qquad \mathrm{K}=1,2,\ldots..\mathrm{n} \qquad (2.12)$$

olarak ifade edilmiştir. Denklem 2.12'de ifade edilen '*n*' kutup sayısı, '*K*' ise kutup çifti sayısını ifade etmiştir.

Bu filtrelerin gerçek bileşen değerlerinin bulunabilmesi için denormalize edilmiştir. Bu eşit aralıklarda çeşitli filtrelerin frekans alanı cevabının ve zaman alanı cevabının karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Butterworth filtrelerinde kutup frekansı değeri bir iken -3 dB değerine normalize edilmiştir.

Butterworth filtrelerin element değerleri, birçok yapıda oluşturulan diğer filtrelerden daha pratik ve devre için daha az kritik önemde olmuştur. Şekil 2.6'da frekans yanıtı, grup gecikmesi, dürtü yanıtı ve basamak yanıtı gösterilmiştir.



Şekil 27.6. Butterworth filtrelerin: (a) genel frekans yanıtı, (b) detaylı frekans yanıtı, (c) grup gecikmesi, (d) dürtü yanıtı, (e) basamak yanıtı analizlerini gösterir [13]

2.2.2. Chebyshev Filtreler

Chebyshev filtreleri, aynı derecedeki Butterworth filtrelerinden daha küçük bir geçiş bölgesine sahiptir fakat Butterworth filtrelere göre geçiş bandında dalgalanmalar daha çok olur. Bu tür bir filtre Chebyshev kriteri adı verilen filtrelerin maksimum dalgalanmasını en aza indirmeye çalışmasını temel alan bir kriterden ismini alır.

Chebyshev filtreleri göreceli olarak DC gerilim altında 0 dB zayıflamaya sahiptir. Tek dereceli bir filtrenin 0 dB'den dalgalanma değerine kadar uzanan bir zayıflama bandı vardır. Ayrıca bu tür filtrelerin geçiş bandı dalgalanmasına eşit bir kazanca sahiptir. Bant geçirme bölgesindeki dalgalanmaların sayısı filtrenin derecesi ile alakalı ve ona eşittir.

Chebyshev filtrelerin kutupları, Butterworth filtrelerin kutuplarının eliptik bir düzende yer değiştirilmesiyle tespit edilmiştir. Bu kutupların birbirleriyle çarpılması sonucu kutbun gerçek kısmı olan 'K_r', sanal olan kısmı 'K_i' elde edilir. Bu değerler;

$$\mathrm{K_r} = \sinh \mathrm{A} \tag{2.13}$$

$$\mathrm{K_i} = \sinh \mathrm{A} \tag{2.14}$$

olarak elde edilmiştir. Buradan;

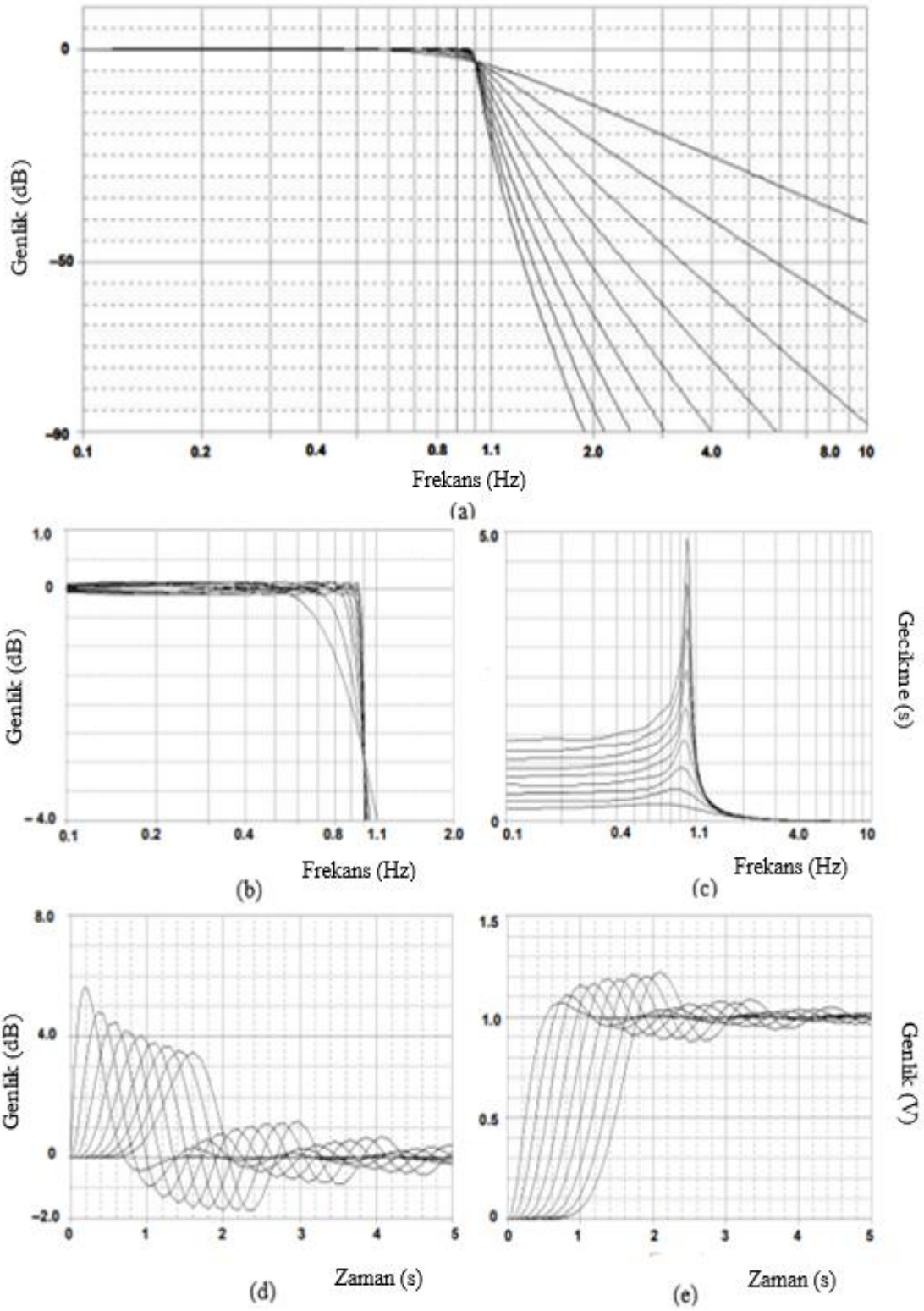
$$\mathrm{A} = \frac{1}{\mathrm{n}} \sinh^{-1} \frac{1}{\varepsilon} \tag{2.15}$$

olarak bulunmuştur. Denklem 2.15'deki 'n' değeri filtrenin derecesini ifade ederken;

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\mathrm{R}} - 1} \tag{2.16}$$

$$\mathrm{R} = \frac{\mathrm{R_{dB}}}{10} \tag{2.17}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Denklem 2.17'de ifade edilen 'R_{dB}' değeri geçiş bandı dalgalanmasının dB cinsinden ifadesidir.



Şekil 28.7. Chebyshev filtrelerin: (a) genel frekans yanıtı, (b) detaylı frekans yanıtı, (c) grup gecikmesi, (d) dürtü yanıtı, (e) basamak yanıtı analizlerini gösterir [13]

Chebyshev filtreleri tipik olarak dalgalanma bandının kenarında frekans değeri 1 Hz'e sabitlenmiş ve 3 dB'de bant genişliği;

$$A_{3dB} = \frac{1}{n}\cosh^{-1}\frac{1}{\varepsilon} \tag{2.18}$$

olarak bulunmuştur. Şekil 2.7'de Chebyshev filtre ve bu filtrenin frekans yanıtı, grup gecikmesi, dürtü yanıtı ve basamak yanıtı gösterilmiştir.

2.2.3. Bessel Filtreler

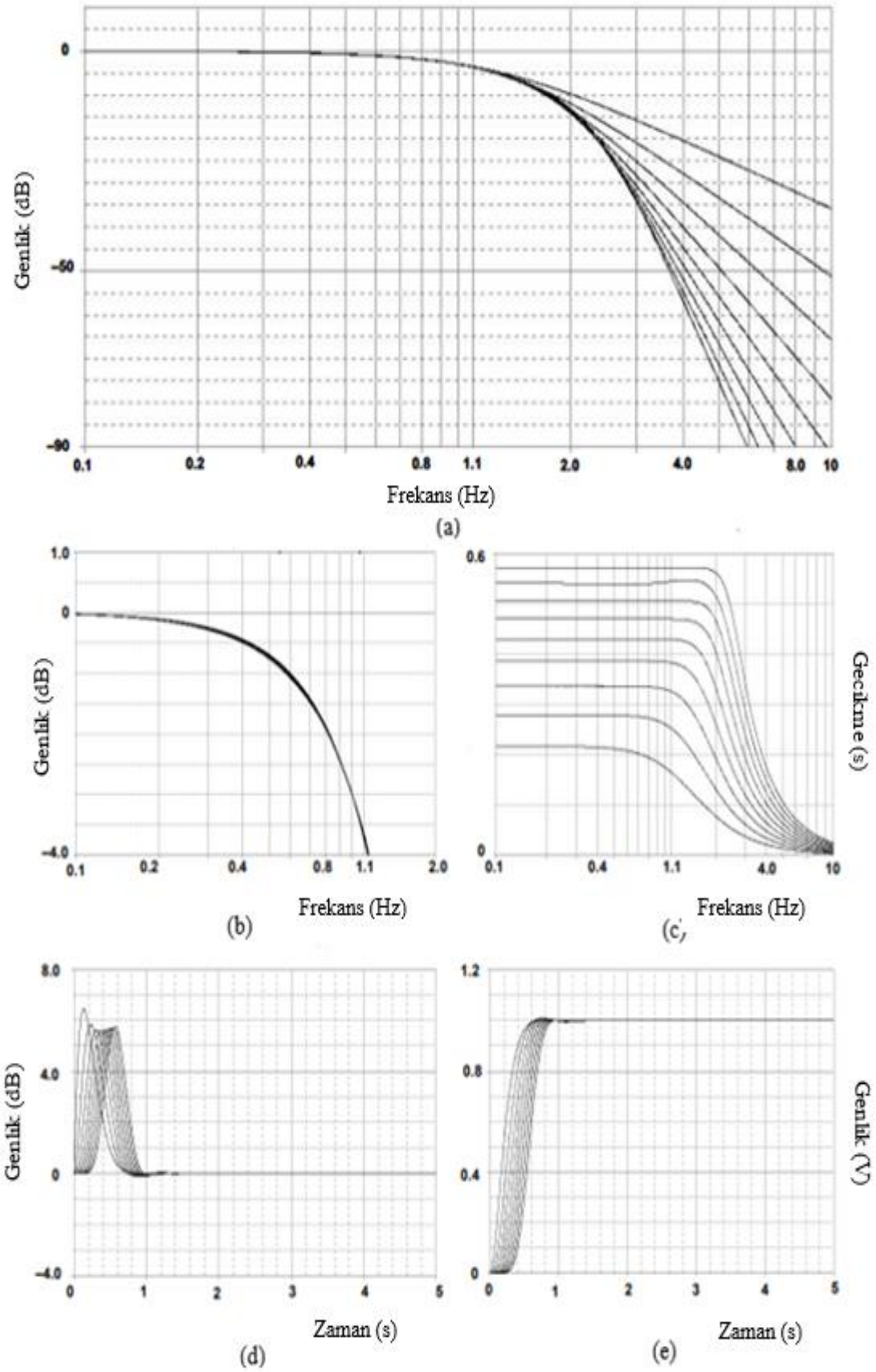
Önceki bölümlerde, Butterworth filtrelerin oldukça iyi genlik ve geçiş davranışına sahip oldukları görülmüştür. Chebyshev filtrelerin, Butterworth filtrelere göre daha kısa geçiş bölgesine sahip olduğunu fakat maliyet anlamında daha masraflı olduğunu görülmüştür. Bu durumda filtrenin geçiş davranışının genlik tepkisine etkisinin iyi olduğunu göstermiştir. Bessel filtreleri, doğrusal bir faza sahip olduklarından dolayı daha iyi bir geçiş bölgesine sahip olacak şekilde optimize edilmiştir. Bunun da diğer filtrelerde olduğu gibi olumsuz bir yanı vardır. Bu olumsuzluk, diğer filtrelere göre daha zayıf bir frekans cevabı olmuştur.

Bessel filtresinin kutupları, mevcut kutupları bir birim daire üzerine yerleştirilerek bulunur ve sanal kısım;

$$IP = \frac{2}{n} \tag{2.19}$$

denklemi ile elde edilmiştir. Burada '*n*' filtrenin kutup sayısını ifade eder. Üst ve alt kutupların konumları çemberin *jω* eksenini kestiği noktalarda veya diğer kutuplar arasındaki mesafenin yarıya düştüğü yerlerde bulunmuştur.

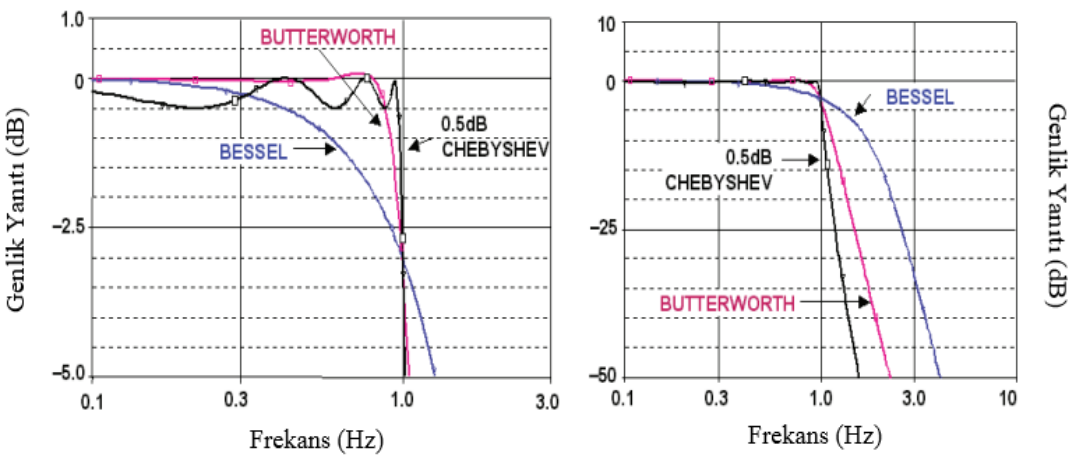
Şekil 2.8'de Chebyshev filtre ve bu filtrenin frekans yanıtı, grup gecikmesi, dürtü yanıtı ve basamak yanıtı gösterilmiştir.



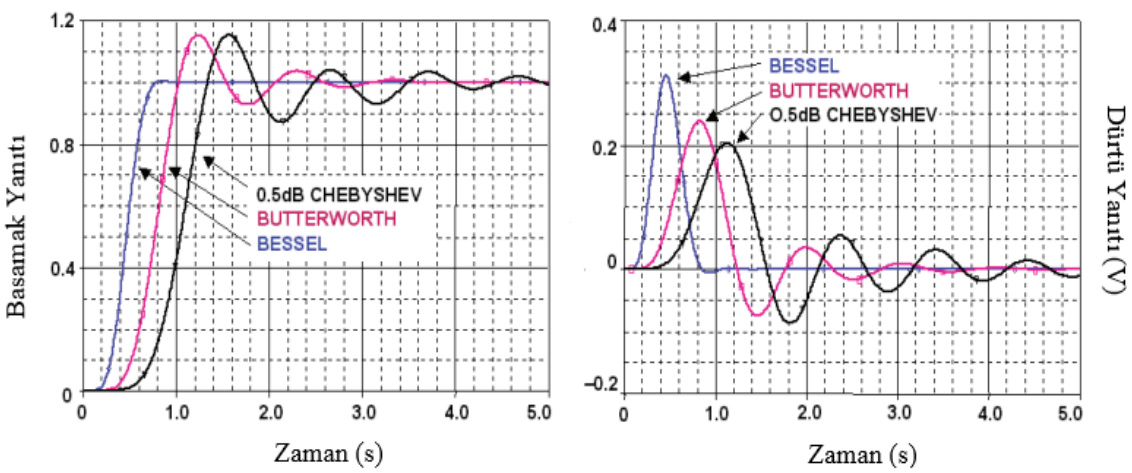
Şekil 29.8. Bessel filtrelerin: (a) genel frekans yanıtı, (b) detaylı frekans yanıtı, (c) grup gecikmesi, (d) dürtü yanıtı, (e) basamak yanıtı analizlerini gösterir [13]

2.3. Butterworth, Chebyshev, Bessel Filtrelerin Karşılaştırılması ve Analizi

Butterworth, Chebyshev ve Bessel filtrelerinin kendi aralarında avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu tür filtrelerin çok kutuplu olanlarının 0,5 dB dalgalanma frekansı durumunda gösterdikleri genli cevabı, basamak yanıtı, dürtü yanıtları incelenmiştir. Bu karşılaştırmanın yapılabilmesi için sekiz kutuplu bir filtre kullanılmıştır. Kullanılan filtrenin kesim frekansı 1 Hz için standartlaştırılmıştır. Şekil 2.9'da bu üç tip filtrenin genlik cevapları, Şekil 2.10'da bu üç filtrenin basamak yanıtları ve dürtü yanıtları karşılaştırılmıştır. Bessel tipi filtrenin analizinden Butterworth tipi filtrenin analizine, oradan da Chebyshev tipi filtrenin analiz eğrilerine geçildiğinde, filtrelerin geçici davranışları giderek zayıfladıkça genlik ayrımının daha net şekilde yapıldığı görülmüştür.



Şekil 30.9. Bessel, Butterworth ve Chebyshev filtrelerin genlik yanıtı analizleri karşılaştırması [13]



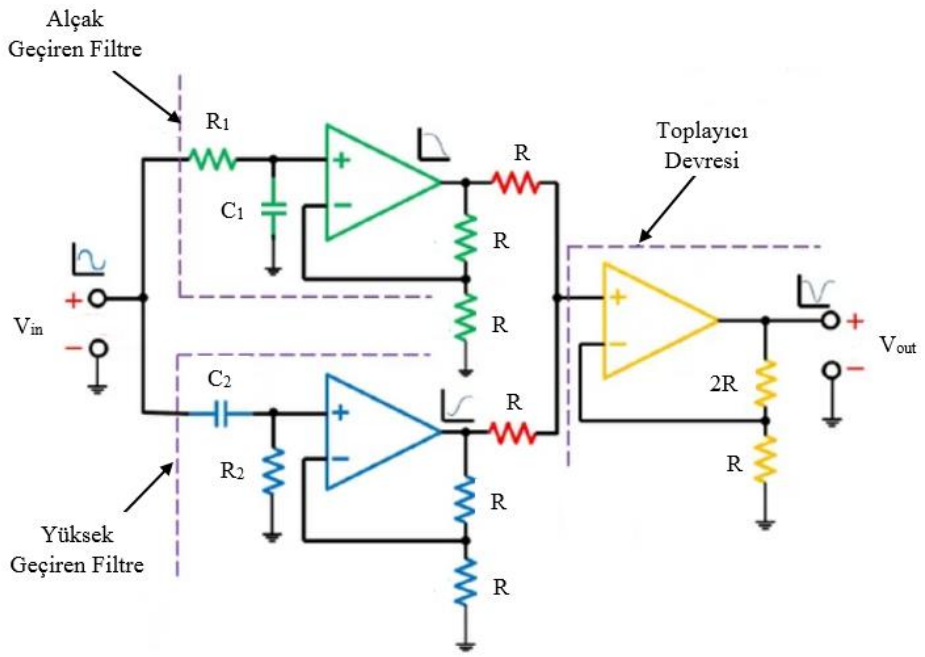
Şekil 2.10. Bessel, Butterworth ve Chebyshev filtrelerin basamak yanıtı ve dürtü yanıtının karşılaştırılması [13]

2.4. Çentik Filtre Tipleri

Çentik filtrelerin tasarlanmış birçok türü bulunmaktadır. Bu bölümde başlıca çentik filtre türleri ve nasıl tasarlanacağı anlatılmıştır.

2.4.1. Aktif Çentik Filtreler

Aktif çentik filtreler diğer filtre türlerinde olduğu gibi yükseltici bileşen kullanmak durumunda olmuştur. Bu yükseltici bileşen bu örnekte op-amp olarak seçilmiştir. En basit haliyle bir alçak geçiren filtre devresi ve yüksek geçiren filtre devrelerinin paralel bağlanmasıyla bu filtre devrelerinin toplanıp kuvvetlendirilmesiyle aktif bir çentik filtre elde edilmiştir. Şekil 2.11'de aktif çentik filtre örneği gösterilmiştir.



Şekil 31.11. Temel aktif çentik filtre örneği

Şekil 2.11'de ifade edilen örnek devre üç bölüme ayrılmıştır. İlk bölüm, üst kısımda yer alan alçak geçiren filtre bölümü, ikinci bölüm bu alçak geçiren filtreye paralel yüksek geçiren filtre bölümüdür. Üçüncü bölüm ise sinyalin ilk iki bölümden geçerken harcadığı enerjinin bir yükseltici yardımıyla telafi edildiği op-amp'lı devredir. Son bölüm olan op-amp'lı kuvvetlendirici devresi, bir toplama kuvvetlendiricisi görevi gören op-amp'lı toplayıcıdır. Örnek devrede alçak geçiren filtre ve yüksek geçiren filtrenin kesim frekansı;

$$f_l = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \text{ Hz} \tag{2.20}$$

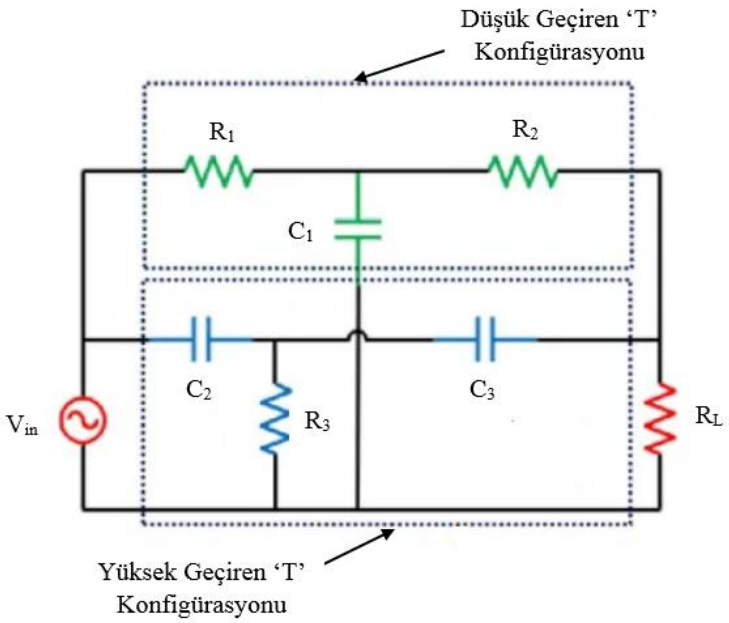
$$f_h = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \text{ Hz} \tag{2.21}$$

$$f_c = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 R_1 R_2 C_1 C_2}}\ \text{Hz} \qquad (2.22)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Denklem 2.22'de ortak kesim frekansı gösterilmiştir.

2.4.2. Pasif Çentik Filtreler

Pasif filtreler daha önceki filtrelerde olduğu gibi sadece direnç, indüktör ve kapasitörler gibi pasif devre elemanlarından oluşmuş devrelerdir. Kuvvetlendirme için op-amp gibi reaktif devre elemanları kullanılmamıştır. Bu nedenden dolayı pasif filtrelerde kuvvetlendirme yapılmamıştır. Pasif çentik filtre yapıları, aktif çentik filtre yapılarında olduğu gibi en basit tanımıyla pasif bir alçak geçiren filtre devresi ve pasif bir yüksek geçiren filtrenin birleştirilmesi sonucu elde edilmiştir. Bu filtre yapısı basit bir devre olarak Twin-T (İkiz-T) olarak adlandırılan filtre yapısında ifade edilmiştir. Şekil 2.12'de ifade edilen devre yapısı gösterilmiştir.

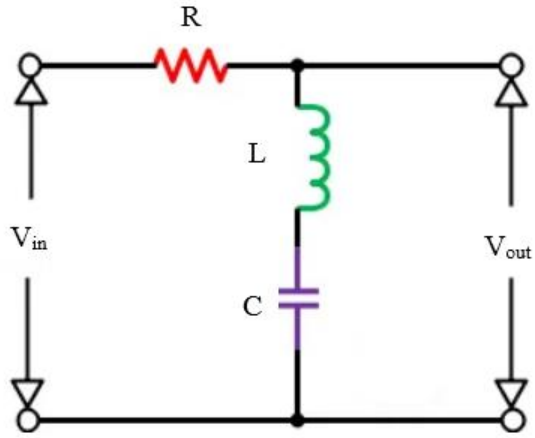


Şekil 32.12. Pasif çentik filtre İkiz-T modeli örneği

Şekil 2.12'de gösterilen devre yapısında üst kısım alçak geçiren filtre yapısı, alt kısım ise yüksek geçiren filtre yapısı birleştirilmiş ve İkiz-T yapısında gösterilmiştir.

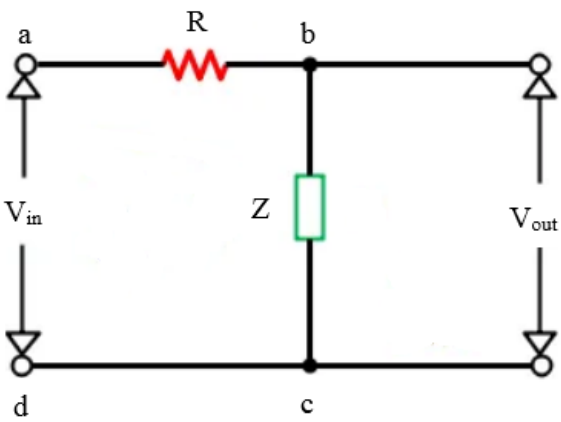
2.4.2.1. RLC Çentik Filtreler

RLC çentik filtreler adından da anlaşılacağı üzere pasif elemanlar olan direnç, indüktör ve kapasitör içeren çentik filtre yapısıdır. Bu nedenle pasif çentik filtrenin bir türü olarak bilinmiştir. Örnek bir RLC çentik filtresi Şekil 2.13'de gösterilmektedir.



Şekil 33.13. RLC çentik filtre örneği

Bir RLC çentik filtresinin şönt elemanı, indüktör ve kapasitörün seri kombinasyonundan oluşmuştur. Çıkış frekans cevabı, bu seri indüktör ve kapasitör kombinasyonu üzerinden alınmıştır. RLC çentik filtresinin eşdeğer devresi Şekil 2.14'de gösterilmektedir.



Şekil 34. RLC çentik filtre eşdeğer devresi

Şekil 2.14'de belirtilen kapasitör ve indüktörün eşdeğeri;

$$Z = j(X_L - X_C)\Omega \tag{2.23}$$

$$|Z| = \sqrt{(X_L - X_C)^2}\Omega \tag{2.24}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Eşdeğer empedansa direnç ilave edilirse;

$$|Z| = \sqrt{R^2+(X_L - X_C)^2}\Omega \tag{2.25}$$

olarak bulunmuştur. Filtrenin seri rezonans koşullarında, rezonans frekansı;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\text{Hz} \tag{2.26}$$

olarak bulunmuştur. Filtrenin daha önceki bölümlerde bahsedilen bir kalite faktörü bulunmaktadır. Bu kalite faktörü;

$$Q = \frac{\omega_r L}{R} \tag{2.27}$$

olarak ifade edilmiştir. Buradan filtrenin bant genişliği rezonans frekansının, filtrenin kalite faktörüne bölünmesi sonucu elde edilmiştir. RLC çentik filtrede, alçak geçiren filtrenin en düşük kesim frekansı Denklem 2.28'de, yüksek geçiren filtrenin en yüksek kesim frekansı Denklem 2.29'da gösterilmektedir.

$$f_l = (f_r - \frac{BW}{2})Hz \tag{2.28}$$

$$f_h = (f_r + \frac{BW}{2})Hz \tag{2.29}$$

2.4.3. Optik Çentik Filtreler

Optik çentik filtreler mantık olarak çentik filtrenin temel prensiplerinin optik haberleşme sistemlerine aktarılmış şeklinden meydana gelmiştir. Optik çentik filtreler bir başka ifadeyle spektrumun bir kısmını seçici olarak reddeden veya durduran diğer tüm dalga boylarını ileten filtre yapısından oluşmuştur. Optik yoğunluk derecesine göre çeşitli seviyelerde durdurma işlemi de bu filtrelerin yapabildiği işlevlerdendir.

Bir optik sistemde, ışığın belirli dalga boyları bir kırınım ızgarası veya dağıtıcı bir prizma tarafından seçici olarak yeniden yönlendirilmiştir. İletim ızgaraları ve prizmalar olması durumunda nesneden geçen polikromatik ışık, dalga boyuna yönlendirilecek ve daha sonra optik çentik filtre tarafından istenilen dalga boyları elde edilmiştir.

Bu yapılan işlem gerçek malzemeler kullanıldığında, ortam içerisinden geçen optik ışık çeşitli dalga boylarında zayıflamış ve ışığın içinden geçtiği ortamla etkileşime geçmiş ve bu şekilde filtrelenmiştir. Sonuç olarak optik çentik filtreden çıkan ışık değişmemiş veya minimum düzeyde zayıflatılmış dalga boylarını geçirmiştir.

Optik çentik filtrelerin kullanım alanları; Raman spektroskopisinde, lazer tabanlı floresanlarda, biyomedikal ve yaşam bilimi uygulamalarında kullanılmıştır.

2.4.4. RF Çentik Filtreler

Dar bant çentik filtre aynı zamanda güç yükselteçlerinin doğrusal olmayan ölçümleri sırasında taşıyıcı frekansı reddetmek veya durdurmak için kullanılan bir RF çentik

filtrelerdendir. Radyo frekansı bölgesindeki bir sinyalin belirli bir parazit frekansı reddetmek için bobin ve kondansatörlü çentik filtreler kullanılmıştır. Bu tür çentik filtreler vericiye belirli bir yakınlıkta bulunan ve diğer tüm sinyalleri yok eden radyo alıcıları ile kullanılmıştır. Dalga kapanı denilen sistem sayesinde vericiden gelen sinyaller engellenebilmiştir.

FM sinyalleri çok güçlüdür ve bir SDR'nin zayıf sinyalleri işlemesini önleyebilmiştir. FM çentik filtreleri bu durumlar için kullanılmış ve SDR uygulamaları için çok kullanışlı olmuştur. Çalışma şekli, FM sinyalleri güçlü sinyaller olduğundan dolayı ilk önce RF çentik filtresine gönderilmiş ve sonrasında filtrelenmiş sinyal SDR sistemine aktarılmıştır. Akış şeması Şekil 2.15'de gösterilmiştir.



Şekil 35.15. RF çentik filtre çalışma prensibi akış şeması

2.4.5. Butterworth Çentik Filtreler

Butterworth çentik filtreler özel amalar için tasarlanmıştır. Dar bir bant aralığını durdurmak istendiğinde ve düz bir frekans yanıtı istendiğinde bu tür bir filtre kullanılmıştır. Dar bir bant aralığında kullanılan birçok çentik filtre olmasına rağmen Butterworth filtresinin tercih edilme sebebi, diğer filtreler frekans cevabı grafiğinde stabil bir çıkış elde edebilmesi için daha yüksek bir bant genişliğine ihtiyaç duymuş fakat Butterworth filtreler bu stabiliteyi düşük bant genişliğinde daha düz bir frekans yanıtı elde edildiği için kullanılmıştır.

İdeal bir çentik filtre, bazı frekans aralıklarını bozulma olmadan durdurmuş ve diğer tüm frekansları geçirmiştir. Ancak bazı uygulamalarda düşük sinyal-gürültü oranından dolayı kullanılacak basit bir çentik filtre doğru ve güvenilir değildir. Bu gibi durumlarda da doğruluğu ve güvenilirliği yüksek olan Butterworth çentik filtresi kullanılmıştır.

Butterworth çentik filtrelerinin kullanıldığı yerler; elektrokardiyogram sistemlerinde sinyal bozucu gürültülerde, güç hattı parazitlerinde, enstrümantasyon gürültülerinde, manyetik alan parazitlerinde, rastgele vücut hareketlerinden kaynaklanan gürültü ve solunum hareketlerinin filtrelenmesi için kullanılmıştır. Aynı zamanda bu gürültüler kullanılacak olan filtre sayesinde frekans içeriğine göre karakterize edilmiştir.

Filtreleme tekniklerinin sonucunda filtrelenen sinyalde sinyal-gürültü oranının mümkün oldukça yüksek olması istenmiş fakat gürültünün bant genişliği, istenen sinyallerin bant genişliği ile örtüştüğü durumlarda sıradan filtreleme yöntemleri sinyal gürültü oranı yeterince yükseltmeyi başaramamıştır. Bu nedenle EKG gibi sistemlerde doğruluğu ve güvenilirliği yükseltmek için bu tür sistemlerdeki gürültüyü azaltmak gerekmiştir. EKG sinyallerine karışan 50 Hz frekansında güç hattı gürültülerini azaltmak için 3 dB bant durduran dördüncü derece Butterworth çentik filtreler tercih edilmiştir.

2.5. Çentik Filtrelerin Transfer Fonksiyonu

Klasik bir çentik filtrenin transfer fonksiyonu;

$$H(s) = \frac{(s^2 + \omega_z^2)}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q}s + \omega_p^2} \tag{2.30}$$

olarak bulunmuştur. Denklem 2.30'daki transfer fonksiyonu filtrenin sıfır frekansı, kalite faktörü ve kutup frekansına bağlı olmuştur.

Filtrenin kalite faktörü, filtrenin seçiciliğini ifade eder ve çentik filtrelerde kalite faktörü;

$$Q = \frac{f_r}{f_h - f_l} \tag{2.31}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Filtrenin kalite faktörü yüksek kesim frekansının alçak kesim frekansına olan farkına bağlı olmuştur. Bu sebeple bu fark aynı zamanda bant genişliğini ifade ettiğinden dolayı bu değerlerin yerine bant genişliği yazılmıştır.

Çentik filtre için üç durum mevcut olmuştur. Bunlar standart çentik filtre, alçak geçiren çentik filtre, yüksek geçiren çentik filtredir. Filtrenin sıfır frekansı değeri ve kutup frekansı değeri arasındaki ilişkiye bağlı olarak filtrenin durumu belirlenmiştir. Bu durumlar şu şekilde listelenmiştir;

- Filtrenin kutup frekansı sıfır frekansına eşitse, yani $\omega_o=\omega_z$ olduğu durumlarda filtre standart bir çentik filtre olmuştur.
- Filtrenin kutup frekansı sıfır frekansından küçük ise, yani $\omega_o<\omega_z$ olduğu durumlarda filtre alçak geçiren bir çentik filtre olmuştur.
- Filtrenin kutup frekansı sıfır frekansından büyük ise, yani $\omega_o>\omega_z$ olduğu durumlarda filtre yüksek geçiren bir çentik filtre olmuştur.

2.6. Çentik Filtreler ile Yapılabilecek Uygulamalar

Tez çalışmasında tasarımı yapılan çentik filtre 50-60 Hz aralığındaki ses frekansında çalışmak üzere tasarlanmış bir filtredir. Temel olarak bu frekans aralıklarında biyomedikal sinyaller içerisindeki gürültü sinyallerinin bastırılması için tasarlanmıştır. Bunun dışında 50-60 Hz aralığında filtreleme yapılan sistemlerde kullanımı mümkün olmuştur.

Tasarlanan çentik filtre çok amaçlı bir filtre olup birçok alanda kullanılabilmektedir. Bu kullanım alanlarından bazıları aşağıda ifade edilmiştir:

- Tasarlanan çentik filtrenin kullanılabileceği alanlardan biri İletişim sistemleri, enstrümantasyon ve kontrol sistemlerinde ve biyomedikal alanda kurulabilecek sistemlerde kullanılabilir.
- Tasarlanan tipteki bant durduran bir çentik filtre elektronik ve iletişim devrelerinde belirlenen frekans aralıklarındaki istenmeyen bir bant aralığını sinyal içerisinde bastırmak için kullanılabilir. Bunu yaparken aynı zamanda bu frekanslarda minimum kayıpla iletmesi söz konudur.
- AC ve DC motor sürücülerinin, dönüştürücülerinin ve eviricilerinin anahtarlama tipi hat frekansının belirli harmoniklerinde sinüzoidal bozulmalara neden olur. Tasarlanan çentik filtrenin frekanslarına uygun şekilde kullanılması durumda bu bahsedilen bozuklukları ortadan kaldırmaya ve doğru ölçümler yapılmasına olanak sağlar.
- Tasarlanan frekans aralıklarındaki istenmeyen gürültüleri ortadan kaldırmak için görüntü ve sinyal işlemede kullanılabilir.
- Ses sinyali içerisindeki gürültü ve uğultu gibi tasarlanan frekanslar arasında istenmeyen bir sinyali ortadan kaldırmak için ses mühendisliği gibi mesleklerde gerek özel durumlarda gerekse akademik alanda kullanılabilir.
- Ayrıca tasarlanan çentik filtre tasarım frekansının amacına uygun olarak telekomünikasyon sektöründe, telefon sistemlerindeki parazitleri azaltmak için kullanılabilir. Ayrıca DSL hizmetlerinde ve diğer internet hizmetlerinde hat gürültüsü azaltıcı olarak kullanılır.
- Tasarlanan filtrenin tasarım frekanslarına uygun olarak müzik sistemlerinde kullanılabilir. Enstrümanlar bağlandıktan sonra oluşabilecek belirli bir uğultu sesini azaltmak için gitar amplifikatörlerindeki enstrüman amplifikatörlerinde, akustik gitar, mandolin, bas enstrüman amplifikatörlerinde ve PA (Genel

Seslendirme) sistemlerinin mikrofonlar, amplifikatörler, hoparlörler ve diğer müzik ekipmanlarından oluşan bölümlerinde kullanılabilir.

- Bu tasarlanan türde filtrelerin en önemli kullanım alanlarından biri olan tıbbi cihazlarda kullanılabilir. Örnek olarak belirlenen frekanslarda EKG (Elektrokardiyogram) ölçümlerinde DC bileşeni ortadan kaldırmak için kullanılabilir.

3. BÖLÜM

ÇENTİK FİLTRE TASARIMI

3.1. Araştırmanın Genel Yapısı

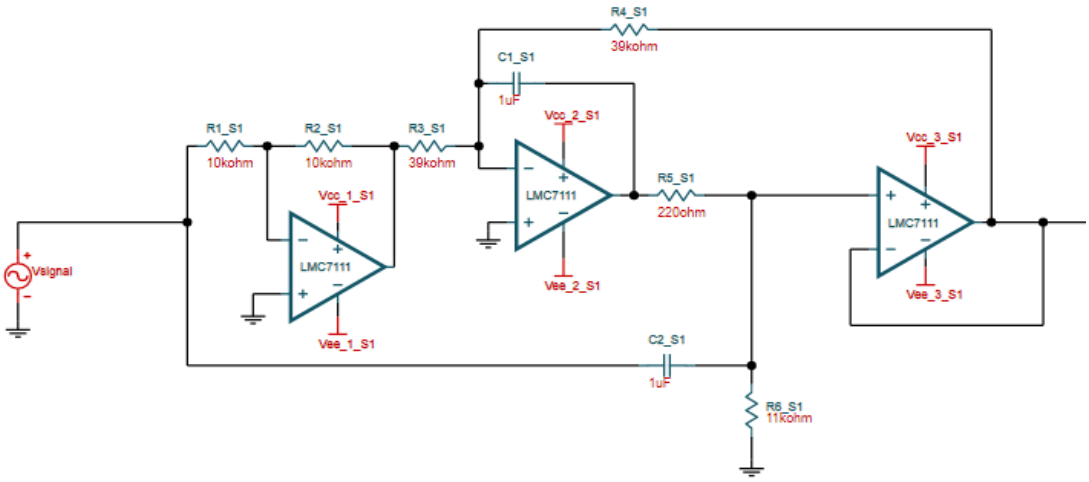
Bu yüksek lisans tez çalışmasında çentik filtrenin tasarımında üç tip tasarım yöntemi kullanılması tercih edilmiş ve bu yöntemlerle tasarlanan filtrelerinin birbirleriyle kıyaslaması yapılarak, avantaj ve dezavantajları ortaya koyulmuştur. Aktif yapıda tasarlanan filtreler için diğer op-amp türlerine karşı daha ucuz maliyetli olması hem de aşırı iklim koşullarına karşı çalışma karakteristiğindeki kararlılık sebebiyle LMC7111 ve eşdeğer model op-amp kullanımı tercih edilmiştir. LMC7111 ve eşdeğer model op-amp kullanılmıştır. Tasarımı yapılan çentik filtrelerin merkez frekansları 50, 55 ve 60 Hz olarak belirlenmiştir. Çalışmada yedi farklı filtre derecesi, iki farklı bant genişliği ve üç farklı merkez frekans için kalite faktörü ve sapma faktörü değişimi incelenmiştir.

Filtreleri dereceleri bakımından tasarıma en uygun olacak şekilde kıyaslayarak belirlemek için TINA-TI analiz programı kullanılmıştır. Böylece otomatik olarak tayin edilen filtre derecelerini belirlemek mümkün olmuştur.

3.2. Bessel Çentik Filtre Tasarımı

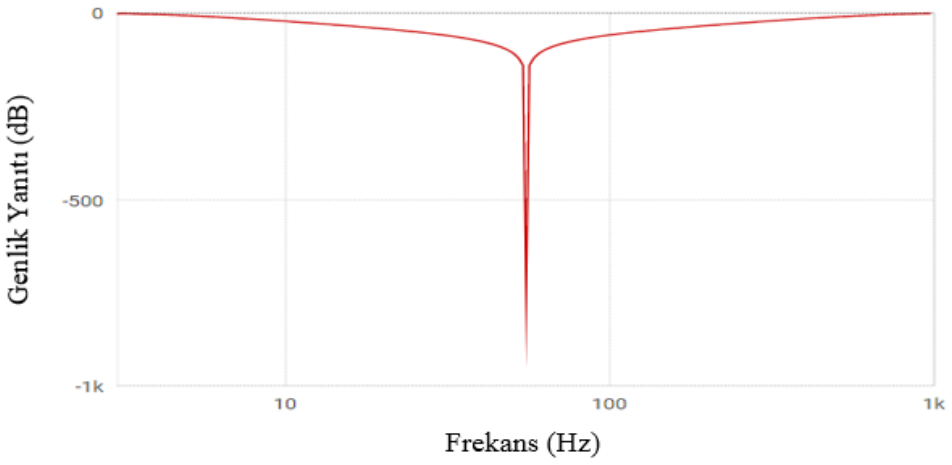
Filtreleme için daha düzenli ve kusursuz bir çıkış elde edilmesi için tasarlanan filtre yapısı üç katlı olarak kullanılmıştır. Bu üç kat birbiri ile aynıdır ve her bir bölümde kullanılan reaktif eleman sayısı ikidir. Tasarlanan yapının birinci katmanı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Şekil 3.1'de gösterilen filtrenin birinci katmanında iki adet reaktif eleman bulunmaktadır. Bu reaktif elemanlar diğer katlarda da bulunmaktadır. Sadece bir bölümde iki adet reaktif eleman bulunduğundan dolayı her hat ikinci derece bir filtre devresini temsil etmiştir.



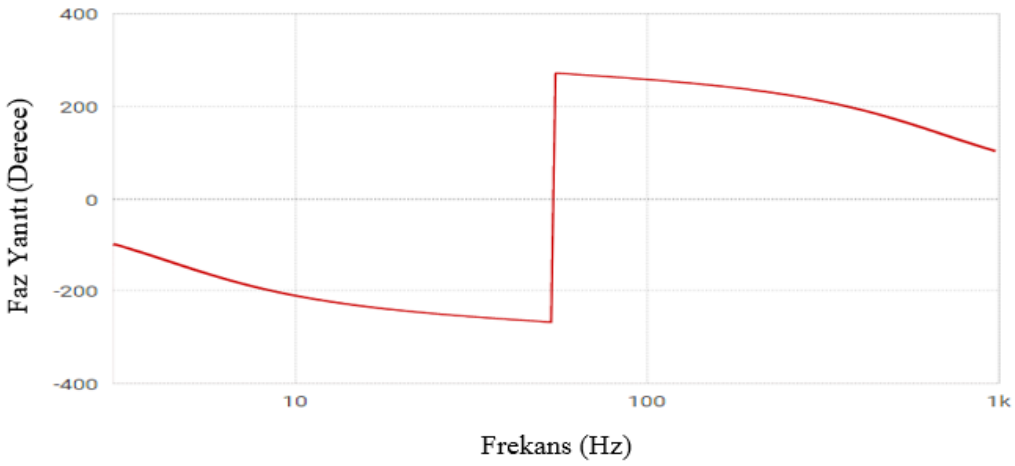
Şekil 3.1. 55 Hz merkez frekanslı Bessel çentik filtrenin birinci katmanı

Tasarlanan filtre aktif bir filtre yapısı olduğu için yapısında op-amp kullanılmış ve kullanılan op-amp devre içerisinde herhangi bir kayıp veya kazanç oluşturmayacak şekilde konumlandırılmıştır. Böylelikle bant geçiren kısım devre kazancı 0 dB olacak şekilde devre elemanları kullanılmıştır. Merkez frekansı 55 Hz olduğu için çentik filtrenin 55 Hz sönümleme noktasına ulaşıncaya kadar -40 dB zayıflama değerine sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. Bessel çentik filtrelerin dalgalanma değeri düşük olduğu için dalgalanma değerinin minimum düzeyde olması beklenmiştir, Şekil 3.2'de gösterilen frekans-kazanç grafiğinde dalgalanma değerinin minimum düzeyde olduğu görülmüştür.



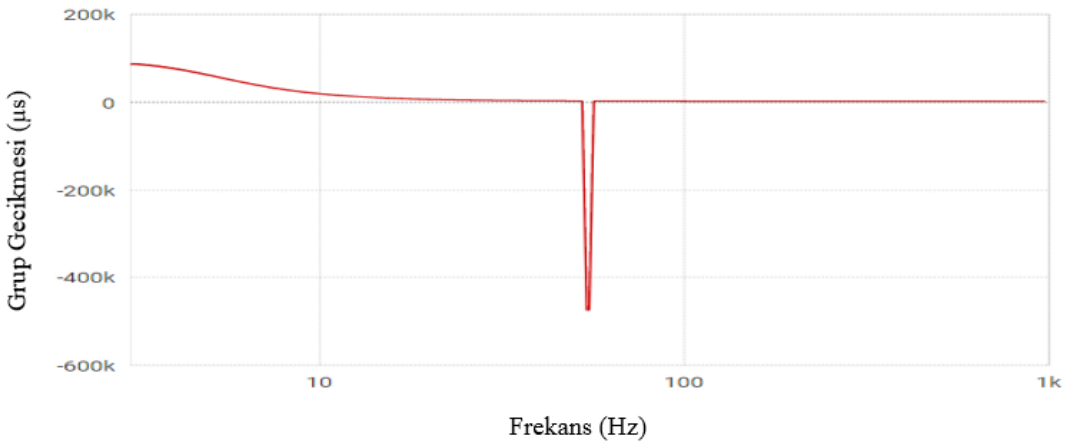
Şekil 3.2. 55 Hz Bessel çentik filtre frekans-genlik yanıtı eğrisi

Şekil 3.2'de görüldüğü üzere bant geçiren bölgenin bant genişliği 1 KHz olarak seçilmiş ve bu durumda filtrenin dalgalanma değeri 1 dB olarak elde edilmiştir. Bu değer Bessel çentik filtrelerin dalgalanma değerinin ne kadar düşük olduğunu göstermiştir. Durdurma bandı bant genişliği ise 100 Hz olarak seçilmiştir.



Şekil 3.3. 55 Hz Bessel çentik filtre frekans-faz cevabı grafiği

Şekil 3.3'de ifade edilen 55 Hz Bessel çentik filtrenin frekans-faz cevabı grafiğinde geçiş bantları arasında filtrenin elemanlarının toleransına bağlı olarak değişen bir aralık bulunmuştur. Bu aralık tolerans değeri küçültülerek mümkün olduğu kadar daraltılmış fakat bu durumda filtrenin maliyeti gibi bazı sorunlar açığa çıkarmıştır. Bu nedenle 55 Hz Bessel çentik filtre ve diğer tasarımı yapılacak çentik filtrelerde direnç E96 tip ve toleransları %2, kapasite E48 tip ve toleransları %2 olarak seçilmiştir. Çentik filtrenin merkez frekansı 55 Hz olduğundan dolayı Şekil 3.3'de görüldüğü üzere bu noktada tam bir faz değişimi olduğu görülmüştür. Filtrelerinin hassas analizi yapılırken Monte Carlo analiz yöntemi kullanılmıştır.

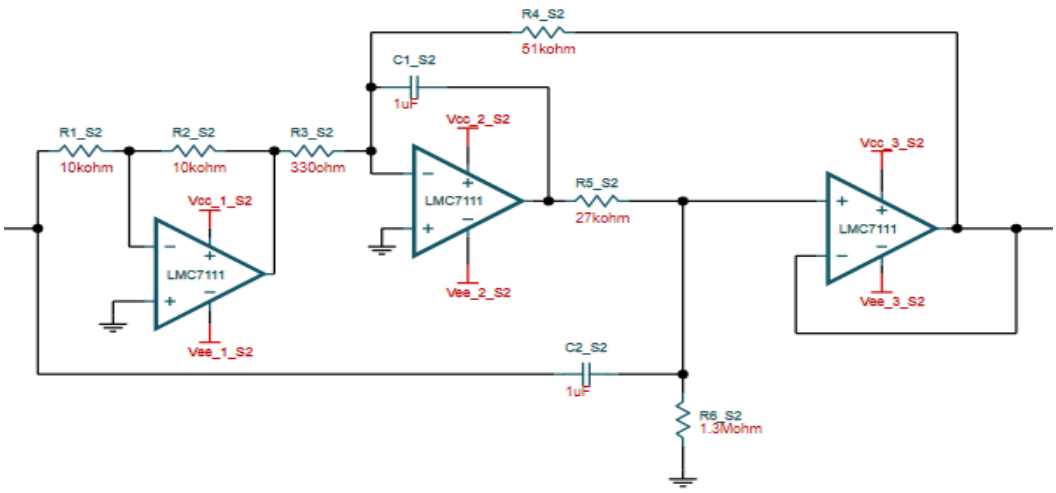


Şekil 3.4. 55 Hz Bessel çentik filtre frekans-grup gecikmesi grafiği

Şekil 3.4'de ifade edilen frekans-grup gecikmesi grafiğinde alçak geçiren bölümün kesim frekansının grup gecikmesinin grafiğin pozitif zaman diliminde yer aldığı ve daha önce bahsedilen kullanılan elemanların toleransına bağlı olarak değişim gösterdiği görülmüştür. Filtrenin yüksek geçiren bölümünde herhangi bir grup gecikmesinin

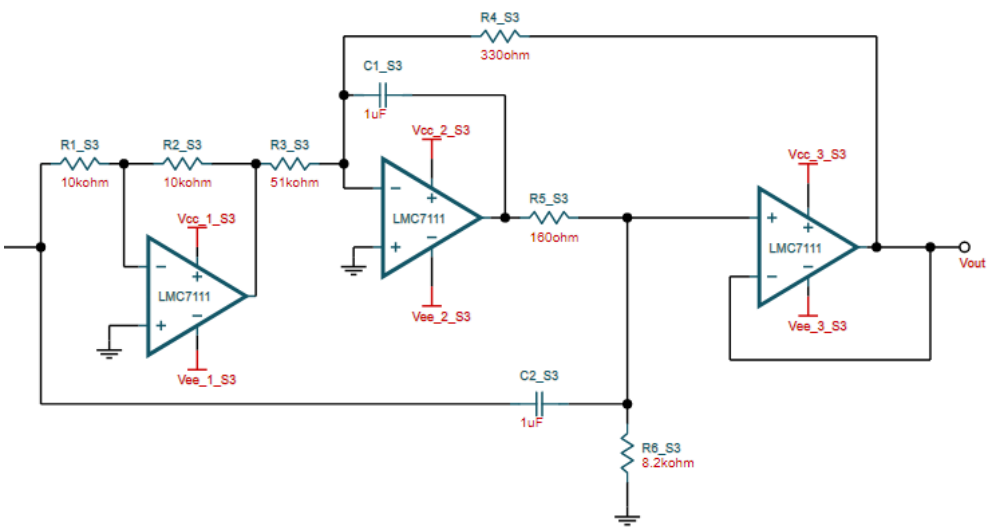
bulunmadığı ve bant durduran bölümünde ise anlık olarak negatif zaman diliminde bir grup gecikmesi görülmüştür.

Filtrenin üç bölümden oluştuğu ifade edilmiştir. 55 Hz çentik filtrenin tam performansının ifadesinde ikinci ve üçüncü bölümlerinin de gösterimi Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Devrelerdeki elemanların çalışması için sağlanan enerji 5V AC kaynaktan sağlanan güçtür.



Şekil 3.5. 55 Hz Bessel çentik filtrenin ikinci katmanı

Şekil 3.5'de gösterilen filtrenin ikinci bölümü diğer bölümlerle aynıdır fakat direnç değerleri değiştirilerek sonuçta istenilen nihai merkez frekans ve kalite faktörü elde edilmeye çalışılmıştır. Birinci bölümde hedeflenen kalite faktörü 0.073 ve elde edilen kalite faktörü 0.074'tür. Bu sonuç birinci bölüm için oldukça iyi bir sonuç ve mümkün olan en düşük sapma ile elde edilmiştir.



Şekil 3.6. 55 Hz Bessel çentik filtrenin üçüncü katmanı

Şekil 3.6'da ifade edilen ikinci bölümde elde edilmesi istenilen kalite faktörü 0.695 olmasına rağmen elde edilen gerçek kalite faktörü 0.713'tür. Bu gösterir ki filtrenin katman sayısı arttıkça kalite faktöründe istenmeyen bir artış olmuş ve katman sayısı arttıkça bunun artacağı fakat filtrenin filtreleme kalitesinin artmasına sebep olmuştur.

Şekil 3.6'da ifade edilen filtrenin üçüncü bölümde yine bağlantı direnç değerleri değiştirilerek önceki bölümde uzaklaşılan hedeflerin tolere edilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Böylelikle son katmanda istenilen 0.694 kalite faktörüne daha fazla yaklaşılarak 0.683 elde edilmiştir. Filtre tipleri arasında sonuca ulaşmak ve sapmayı azaltmak mümkün olduğu gösterilmiştir. Bunu sağlarken belli bazı şeylerden taviz vermemiz gerekebilir. Bunlardan biri maliyettir. Bu yüzden incelenecek olan çentik filtre türlerinde aynı zaman maliyet analizi yapılması gerekli olmuştur. Bu yüzden Tablo 3.1'de 55 Hz Bessel çentik filtrenin maliyet analizi yapılmıştır.

Tablo 3.1. 55 Hz Bessel çentik filtre toplam maliyeti

Eleman	Adet	Fiyat ($)	Toplam
LM7111 Op-amp	9	0,67	6,03
1 µF Kapasite	6	0,05	0,3
330 Ω - 1.3 MΩ Direnç	18	0,04	0,72
			6,78

3.2.1. Farklı Derecelerden Bessel Çentik Filtrelerin Karşılaştırılması

Tasarımları yapılan Bessel çentik filtreler farklı derecelerden olup yedi farklı derece kullanılmıştır. Bessel filtrelerde ve diğer filtre türlerinde filtrenin derecesi arttıkça filtre kalitesinin arttığı görülmüştür. Tablo 3.2'de filtre dereceleri karşılaştırılmış ve istenen değerle ortaya çıkan gerçek değer karşılaştırılarak sapma yüzdesi ifade edilmiştir.

Filtre derecelerinin değiştiği durumlarda filtre merkez frekansı 50 Hz, Bant geçiren bölgenin bant genişliği 500 Hz ve 1 kHz olarak ikiye ayrılarak ifade edilmiş ve farkı ortaya koyulmuştur. Bant durduran bölge bant genişliği sabit ve 100 Hz olarak ele alınmıştır. Filtrenin bant zayıflaması 40 dB olarak ayarlanmıştır. Filtrenin dalgalanma sabiti 1 dB olarak ifade edilmiştir. Bessel filtreler daha önceden ifade edildiği gibi bant

genişliği olarak geçiş bandında uzun salınmalara sahiptir. Ayrıca bu geçiş bandındaki salınma hareketi farklı derecelere göre değişimi de incelenmiştir.

Tablo 3.2. 50 Hz farklı derecelerden tasarlanan Bessel çentik filtrenin kalite faktörü değişimi

Merkez Frekans (Hz)	Bant Genişliği (Hz)	Filtre Derecesi	Kalite Faktörü (Gerçek)	Kalite Faktörü (Ölçülen)	Sapma Miktarı (%)
50	0-500	2	0.100	0.100	0
		4	0.585	0.582	0.512
		6	0.715	0.705	1.398
		8	0.831	0.815	1.925
		10	0.957	0.980	2.346
		14	1.202	1.190	0.998
		18	1.442	1.431	0.762
	0-1000	2	0.050	0.050	0
		4	0.579	0.568	1.899
		6	0.694	0.683	1.585
		8	0.810	0.800	1.234
		10	0.923	0.920	0.325
		14	1.145	1.114	2.707
		18	1.352	1.346	0.443

Tablo 3.2'de 50 Hz merkez frekanslı Bessel çentik filtrenin derece ve bant genişliği değişimi karşısında kalite faktörü ve sapma miktarındaki değişimler gösterilmiştir. 500 Hz bant genişliği kullanılan Bessel çentik filtre örneklemelerinde 1 kHz frekanstaki örneklemelerden daha yüksek kalite faktörü görülmektedir. Bundan dolayı bant genişliği frekansı düştükçe kalite faktörü artar denebilir. Tablo 3.2'de gösterilen gerçek kalite faktörü değişimleri temel alınarak 500 Hz ve 1 kHz'de sapma yönleri hedeflenen değerin altında veya üstünde olabildiği görülmektedir. 50 Hz merkez frekanslı 500 Hz bant genişliğinde tasarımı yapılacak en uygun filtre kalite faktörü değişimi, sapma miktarı ve tasarım kolaylığı dikkate alınarak seçildiğinde Tablo 3.2'de dördüncü derece olduğu görülmektedir. Eğer tasarım kolaylığı yerine filtreden alınabilecek maksimum performans ve filtre tutarlılığı en planda tutulmuş olsaydı, seçilecek olan filtre on sekizinci derece filtre olacaktı. Tablo 3.2'de tüm parametreler 1 kHz için dikkate alındığında onuncu derece filtre bu bant genişliği için uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 3.3. 55 Hz farklı derecelerden tasarlanan Bessel çentik filtrenin kalite faktörü değişimi

Merkez Frekans (Hz)	Bant Genişliği (Hz)	Filtre Derecesi	Kalite Faktörü (Gerçek)	Kalite Faktörü (Ölçülen)	Sapma Miktarı (%)
55	0-500	2	0.110	0.110	0
		4	0.583	0.581	0.343
		6	0.709	0.707	0.282
		8	0.837	0.834	0.358
		10	0.966	0.962	0.414
		14	1.218	1.210	0.657
		18	1.467	1.458	0.613
	0-1000	2	0.055	0.055	0
		4	0.579	0.576	0.518
		6	0.695	0.692	0.431
		8	0.813	0.807	0.738
		10	0.929	0.922	0.753
		14	1.159	1.143	1.380
		18	1.371	1.353	1.313

Tablo 3.3'de 500 Hz bant genişliğindeki filtrelerin kalite faktörü, 1000 Hz değerinde tasarlanan filtrelerin kalite faktöründen daima yüksek olmuştur. Bu da bir filtrenin bant genişliği ile kalite faktörü arasında zıt bir ilişki olduğunu göstermiştir. Tablo 3.3'den bir filtrenin bant genişliği düştükçe kalite faktörü yükselmektedir.

Bessel çentik filtrelere göz önüne alındığında filtre derecesi düştükçe tahmin edilen kalite faktörü ile ortaya çıkan gerçek kalite faktörü arasındaki sapma miktarı minimum olmuştur. Bunun sebebi bir filtre devresi ne kadar karmaşık olursa filtrenin alçak geçiren filtre kısmı ile yüksek geçiren filtre kısmı arasında uyum sorunu ortaya çıkmıştır. Bu uyum sorunu çıkışta elde edilecek olan kalite faktörünü tahmin etmeyi zorlaştırmıştır. Yani bir filtre ne kadar basit yapıda olursa kalite faktörü o miktarda düşük olurken, filtre karmaşık bir yapıda olduğunda veya filtre derecesi arttığında kalite faktörü ve filtre maliyeti yükselirken tahmin edilen kalite faktörü belirsizleşmeye başlamıştır.

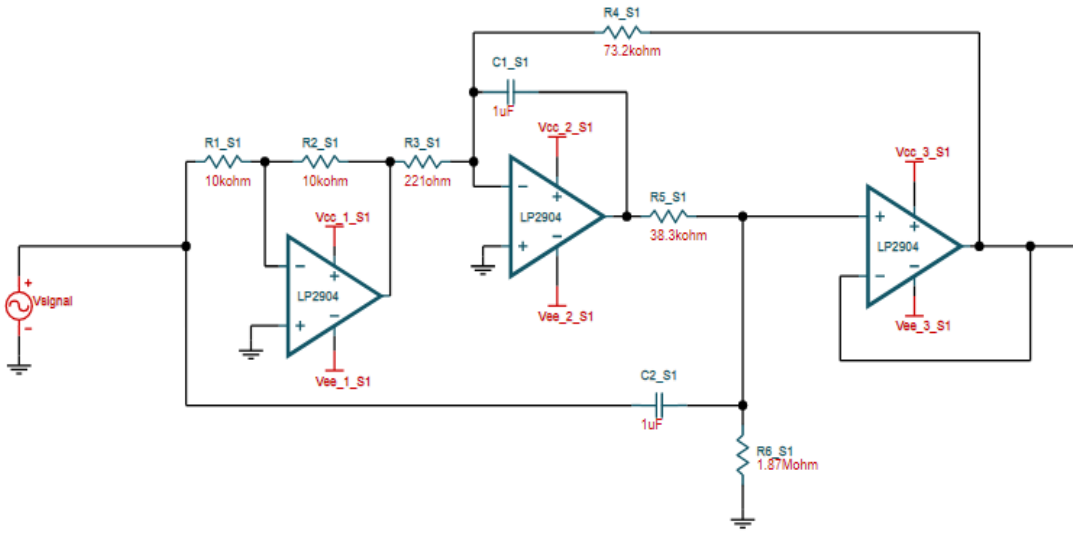
Tablo 3.4. 60 Hz farklı derecelerden tasarlanan Bessel çentik filtrenin kalite faktörü değişimi

Merkez Frekans (Hz)	Bant Genişliği (Hz)	Filtre Derecesi	Kalite Faktörü (Gerçek)	Kalite Faktörü (Ölçülen)	Sapma Miktarı (%)
60	0-500	2	0.120	0.120	0
		4	0.585	0.582	0.512
		6	0.712	0.715	0.419
		8	0.843	0.860	1.976
		10	0.975	0.980	0.510
		14	1.235	1.242	0.563
		18	1.498	1.493	0.334
	0-1000	2	0.060	0.060	0
		4	0.579	0.568	1.899
		6	0.696	0.683	1.867
		8	0.815	0.838	2.745
		10	0.931	0.929	0.215
		14	1.176	1.154	1.870
		18	1.402	1.391	0.784

Tablo 3.4'de 60 Hz merkez frekansında farklı bant genişliği filtre derecelerinde örneklenen filtrelerin bu değişimlere karşı kalite faktörü ve sapma miktarındaki değişimleri gösterilmiştir. Bessel çentik filtreler dalgalanma düzeyi az olduğu için tutarlı filtreler olarak bilinmektedir. Bundan dolayı Tablo 3.4'de görüldüğü üzere filtre derecesi iki olduğu durumda sapma miktarı olmadığı görülmektedir. 500 Hz'de ve 1 kHz'de filtre derecesi artışına paralel olarak kalite faktöründeki değişim artan yöndedir. 500 Hz'de ölçülen kalite faktörü diğer merkez frekanslarda olduğu gibi 1 kHz bant genişliğine göre daha yüksektir. 500 Hz bant genişliği ve 60 Hz merkez frekansta filtre kalite faktörü ve sapma miktarı dikkate alınarak tasarlanan en uygun filtrenin derecesi altıncı derece filtre olarak görülmektedir. 1 kHz bant genişliği ve 60 Hz merkez frekans için belirtilen parametreler dikkate alındığında tasarlanan en uygun filtre onuncu derece olarak görülmektedir. İki farklı bant genişliği dikkate alındığında 60 Hz merkez frekansı için tasarlanacak olan filtrenin en uygun bant genişliği filtre kalite faktörünün yüksek olması, filtre tutarlılığı ve tasarım kolaylığı açısında 500 Hz olduğu görülmektedir.

3.3. Butterworth Çentik Filtre Tasarımı

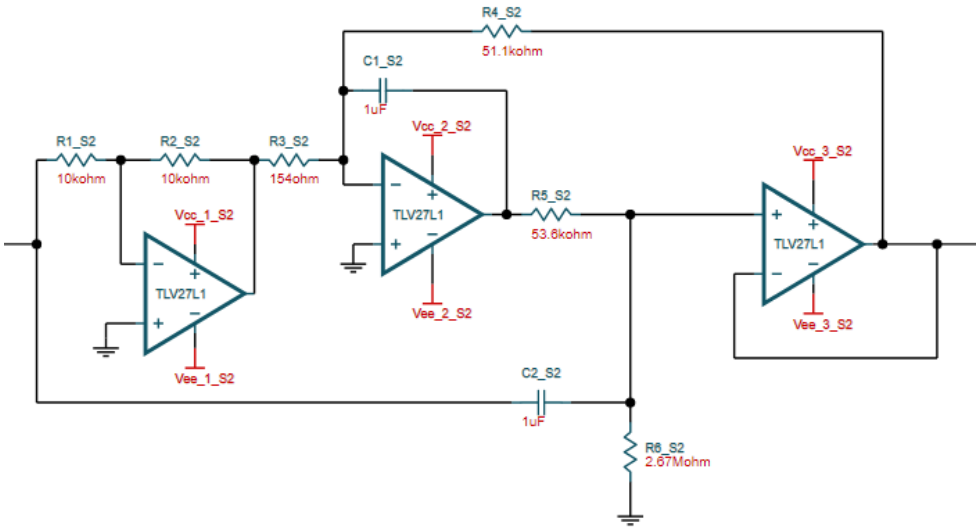
Butterworth çentik filtreler, Bessel çentik filtrelere göre daha az maliyetli olmasına rağmen dalgalanma değeri daha fazla ve sabit bir değere ulaşması uzun sürmüştür. Bu yüzden hassas filtreleme istenilen sistemlerde bu tip filtreler tercih edilmemiş fakat düşük maliyeti sebebiyle tercih edilmiştir. İstenilen filtrelemeyi önceki bölümde Bessel çentik filtreler üç katlı bir sistemde başarmıştır. Butterworth çentik filtre tasarımı yapılırken Bessel filtrelerdeki gibi üç katlı yapı kullanılmıştır ve 55 Hz merkez frekanslı bir filtre oluşturmak için üç kat kullanılmıştır. İki tip filtrenin kolay karşılaştırılabilmesi için aynı devre şeması kullanılarak tasarlanmış ve bu sayede hem maliyet hem de performans açısından karşılaştırmak kolaylaştırılmıştır. 55 Hz Butterworth çentik filtrenin birinci bölümü Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. 55 Hz Butterworth çentik filtrenin birinci katmanı

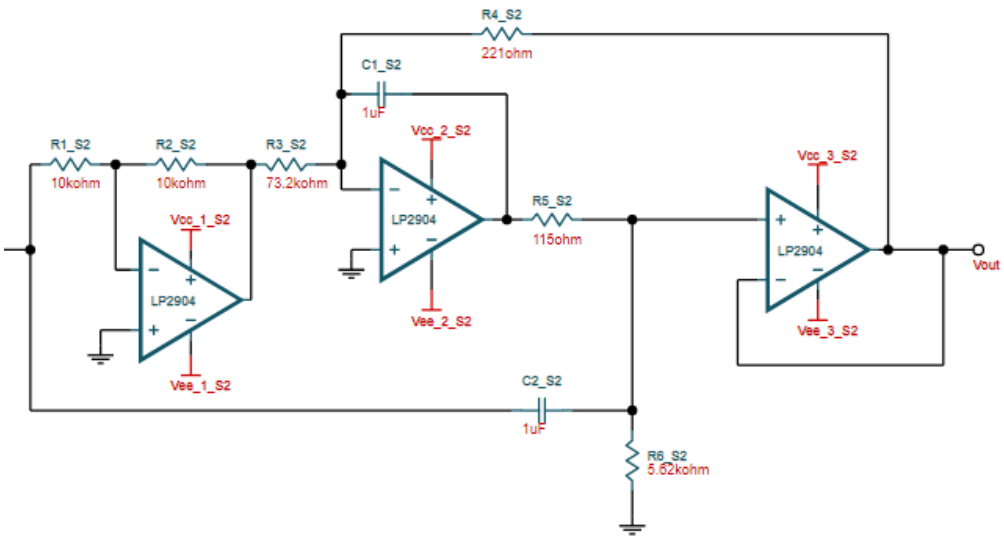
Şekil 3.7'de gösterilen Butterworth çentik filtre yapısı, Bessel çentik filtrenin yapısından farklı olarak kullanılan op-amp değiştirilmiştir. Bessel çentik filtrenin her katmanında iki reaktif eleman ve toplamda üç katman için altı reaktif eleman kullanılmış, benzer şekilde Butterworth filtrelerde de yine altı reaktif eleman kullanarak istenilen sonuca ulaşılmış ve birbiri ile kıyaslanması kolay hale getirilmiştir.

Butterworth çentik filtrede kullanılan LP2904 tipi op-amp sayesinde minimum düzeyde maliyet ve performans olarak bir miktar düşüş olsa da bu düşüş önemsenmeyecek derecede küçüktür. Filtre devresinin ikinci katmanı Şekil 3.8'de ifade edilmiştir.



Şekil 3.8. 55 Hz Butterworth çentik filtrenin ikinci katmanı

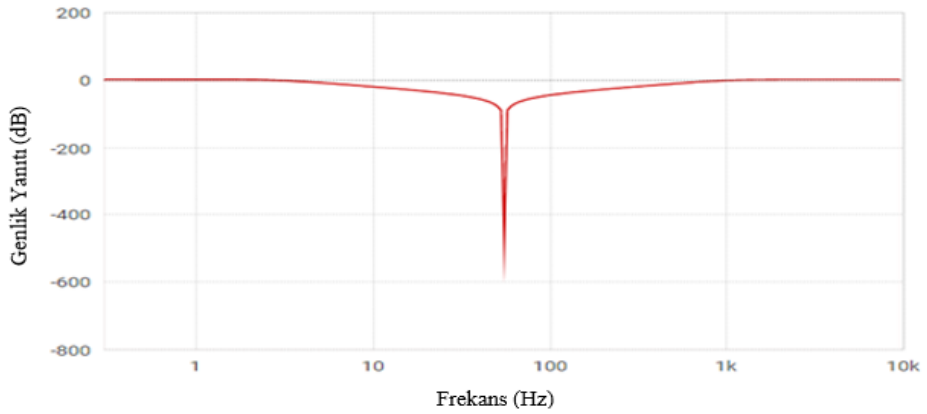
Butterworth çentik filtrenin son katmanı Şekil 3.9'da gösterilmiş olup, bu filtrenin çıkış katmanı olması dolayısıyla istenilen kalite faktörüne en çok yaklaşılan ve sapma miktarı en az olan katmandır. Diğer katmanlarda olduğu gibi bu katmanda iki op-amp ve üç reaktif eleman kullanılarak tasarlanmış, çıkış direnci diğerlerinden farklı olarak kullanılmıştır. Filtre genelinde katmanlar arası kazanç istenmediğinden dolayı son katmanda da gerilim kazancı sıfırdır.



Şekil 3.9. 55 Hz Butterworth çentik filtrenin üçüncü katmanı

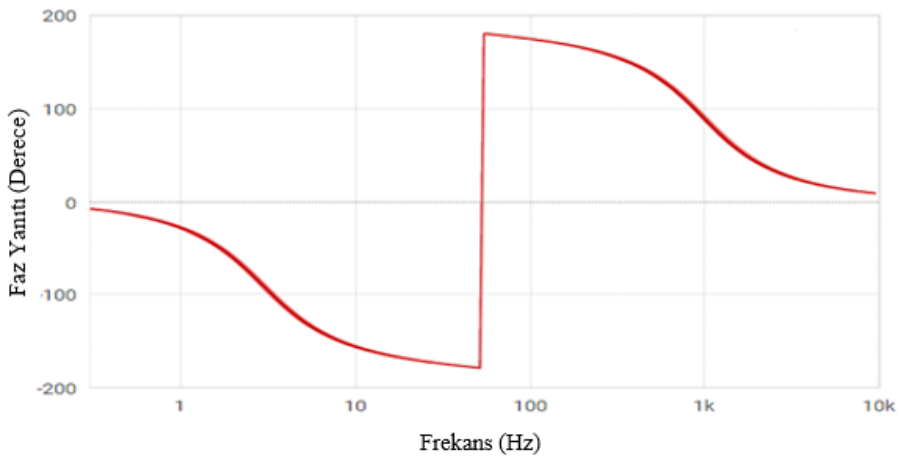
Bessel çentik filtrelerde olduğu gibi Butterworth çentik filtrenin katmanları birebir aynı olup tek fark op-amplar arası geçişi sağlayan ve topraklamayı sağlayan direnç değerlerinin değişimi olmuştur. Birinci katmanın kalite faktöründe hedeflenen değer 0.709 iken elde edilen gerçek değer 0.709'dur. Bu istenilen değeri tamamen karşıladığı ve tam performans ile çalışan bir katman elde edildiği görülmüştür. İkinci katman için

istenilen değer 0.709 olmasına rağmen elde edilen gerçek değer 0.707 olarak görülmüştür. 55 Hz Butterworth çentik filtrede hedeflenen değere çok yaklaşıldığı görülmüştür.



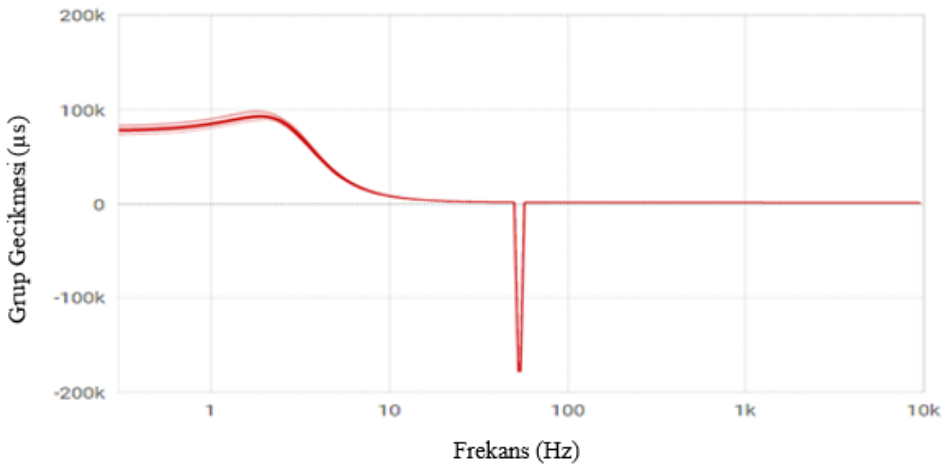
Şekil 3.10. 55 Hz Butterworth çentik filtre frekans-kazanç eğrisi

Şekil 3.10'da 55 Hz Butterworth çentik filtrenin frekans- kazanç eğrisi verilmiştir. Eğriden görüldüğü üzere Butterworth çentik filtrelerin bant geçiren bölgedeki bant genişliği daha geniş olmasına rağmen durdurma bandında çok keskin bir şekilde düşüş yaşanmıştır. Oysa ki Bessel çentik filtrede 55 Hz merkez frekansı durdurulmak istendiğinde 50-60 Hz aralığında bir durdurma gerçekleşmiş ancak Butterworth çentik filtreler daha karalı bir yapıda olarak 53-57 Hz arasında bir filtreleme gerçekleştirmiştir. Şekil 3.11'de 55 Hz Butterworth çentik filtre faz cevabı grafiği verilmiştir.



Şekil 3.11. 55 Hz Butterworth çentik filtre frekans-faz cevabı grafiği

Şekil 3.11'de görüldüğü üzere Butterworth çentik filtrelerin frekans-faz cevabı grafiği daha önceki bölümden bahsedildiği gibi tolerans değerlerine bağlı olarak değişmiş ve kesim frekansları öncesi ve sonrasında meydana gelmiştir. Filtrelemenin olduğu bölge oldukça stabil durumda olmuştur.



Şekil 3.12. 55 Hz Butterworth çentik filtre frekans-grup gecikmesi grafiği

Şekil 3.12'de 55 Hz Butterworth çentik filtre frekans-grup gecikmesi grafiği verilmiştir. Şekil 3.12'de gösterildiği üzere grup gecikmesi-frekans eğrisinde düşük frekanslarda durdurma bandı geçiş bölgesinde dalgalanma değerinin yüksek olduğu görülmüştür. Bu filtrenin temel özelliklerinden dolayı meydana gelen bir dalgalanmadır. Filtrenin kalite faktörünün bu dalgalanma üzerinden bir miktar etkisi bulunmuştur. Grup gecikmesi durdurma bandında çok dar bir aralıkta gerçekleşmiştir. Düşük frekanslarda yine elemanların toleransı ve op-amp'ın temel yapısından meydana gelen bir değişim meydana gelmiştir. Yüksek frekanslarda diğer filtre türlerinde olduğu gibi herhangi bir değişim yoktur ve sabit olmuştur. Butterworth çentik filtrede kullanılan elemanların listesi ve filtrenin maliyet tablosu Tablo 3.5'de ifade edilmiştir.

Tablo 3.5. 55 Hz Butterworth çentik filtre toplam maliyeti

Eleman	Adet	Fiyat ($)	Toplam
LP2904 Op-amp	9	0,42	3,78
1 µF Kapasite	6	0,05	0,3
220 Ω - 1.8 MΩ Direnç	18	0,04	0,72
			4,8

3.3.1. Farklı Derecelerden Butterworth Çentik Filtrelerin Karşılaştırılması

Butterworth filtrelerde daha önce gösterilmiş olan Bessel filtrelerle benzer özellikler göstermesine rağmen Butterworth çentik filtreler bant geniş bölgesinde düz bir frekans tepkisine sahip olduğundan dolayı, Bessel çentik filtrelere göre durdurma bandında daha

sert bir düşüş olduğundan dolayı ve dalgalanma miktarı minimum seviyede olduğu için Butterworth çentik filtreler Tablo 3.6'den görüleceği üzere kalite faktörü Bessel filtrelere göre daha yüksek olmuştur.

Tablo 3.6'da 50 Hz merkez frekansı için farklı bant genişliği ve farklı filtre derecelerinde Butterworth çentik filtre tasarımının kalite faktörü ve sapma miktarındaki değişimler incelenmiştir. Bessel çentik filtrelerde olduğu gibi dikkate değer bir dalgalanma Butterworth çentik filtrelerde görülmediği için ikinci derecede sapma miktarı olmadığı görülmektedir. Diğer filtre türlerinde olduğu gibi 500 Hz bant genişliğinde elde edilen kalite faktörü 1 kHz bant genişliğinde elde edilenden yüksek olduğu görülmektedir. Tablo 3.6'dan 500 Hz bant genişliği 50 Hz merkez frekansta tasarlanacak en uygun Butterworth çentik filtre kalite faktörü ve sapma miktarı dikkate alındığında sekizinci derece olarak görülmektedir. 1 kHz bant genişliği için aynı koşullar dikkate alındığında altıncı derece uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 3.6. 50 Hz farklı derecelerden tasarlanan Butterworth çentik filtrenin kalite faktörü değişimi

Merkez Frekans (Hz)	Bant Genişliği (Hz)	Filtre Derecesi	Kalite Faktörü (Gerçek)	Kalite Faktörü (Ölçülen)	Sapma Miktarı (%)
50	0-500	2	0.100	0.100	0
		4	0.714	0.718	0.557
		6	1.015	1.028	1.265
		8	1.329	1.313	1.204
		10	1.647	1.675	1.671
		14	2.290	2.353	2.677
		18	2.934	2.822	3.817
	0-1000	2	0.050	0.050	0
		4	0.646	0.653	1.071
		6	1.004	1.005	0.099
		8	1.312	1.325	0.981
		10	1.625	1.610	0.923
		14	2.258	2.240	0.797
		18	2.892	2.836	1.936

Tablo 3.7'den görüldüğü üzere Bessel çentik filtrelerde olduğu gibi bu tür filtrelerde de bant genişliği filtrenin kalite faktörü üzerinde etkili olmuştur ve bant genişliği düştükçe filtrenin kalite faktörü artmıştır. Tablo 3.7'de farklı filtre dereceleri için bu durum karşılaştırılmış ve istenen değerle ortaya çıkan gerçek değer karşılaştırılarak sapma yüzdesi ifade edilmiştir. Gerçek kalite faktörü pozitif veya negatif yönde ölçülmüştür. Bu değerler filtrenin derecesine bağlı olmayıp filtre içerisindeki kullanılan elemanların toleransına bağlı olarak ve filtre sisteminin katman sayısına bağlı olarak değişmektedir.

Butterworth çentik filtre tasarımı yapılırken filtrenin derecesinin önemi büyük olmuştur. Altıncı dereceden tasarlanan Butterworth çentik filtrenin Şekil 3.10'da gösterilen frekans-genlik yanıtı grafiğinden görüldüğü üzere derece miktarı ne kadar artarsa durdurma bandı düşüş derecesi o kadar yükselmektedir. Tablo 3.7'de gösterilen Butterworth çentik filtre farklı derece ve bant genişliğinde tasarlanmış, bu tasarımlarda kalite faktörü ve sapma miktarına göre değerlendirilerek kullanıma en uygun olan filtre derecesi seçilmiştir. Bu filtre derecesi Tablo 3.7'den 1 kHz bant genişliği için altıncı dereceden filtre seçilmiş ve tasarımda kullanılmıştır.

Tablo 3.7. 55 Hz farklı derecelerden tasarlanan Butterworth çentik filtrenin kalite faktörü değişimi

Merkez Frekans (Hz)	Bant Genişliği (Hz)	Filtre Derecesi	Kalite Faktörü (Gerçek)	Kalite Faktörü (Ölçülen)	Sapma Miktarı (%)
55	0-500	2	0.110	0.110	0
		4	0.716	0.718	0.279
		6	1.018	1.029	1.069
		8	1.333	1.337	0.299
		10	1.653	1.659	0.361
		14	2.298	2.305	0.304
		18	2.945	2.952	0.237
	0-1000	2	0.055	0.055	0
		4	0.709	0.707	0.282
		6	1.005	1.006	0.099
		8	1.313	1.323	0.756
		10	1.627	1.622	0.307
		14	2.269	2.260	0.397
		18	2.895	2.885	0.345

Tablo 3.7'de gösterilen farklı derecelerde karşılaştırılan Butterworth çentik filtreler 55 Hz merkez frekansı baz alınarak tasarlanmış aynı zamanda bant genişliği 500 Hz ve 1 kHz olan farklı frekanslarda farklılıkları ortaya konmuştur. Bunun sonucu olarak tasarlanan farklı dereceden filtrelerin hesaplanan kalite faktörü ile simülasyon sonucu elde edilen kalite faktörleri kıyaslanmış ve bunlar arası sapma miktarı ifade edilmiştir. Böylelikle tasarım kolaylığı, kalite faktörü ve sapma miktarı açısından en uygun olarak belirlenen altında derece filtre olup, bu filtrenin tasarımı yapılmıştır.

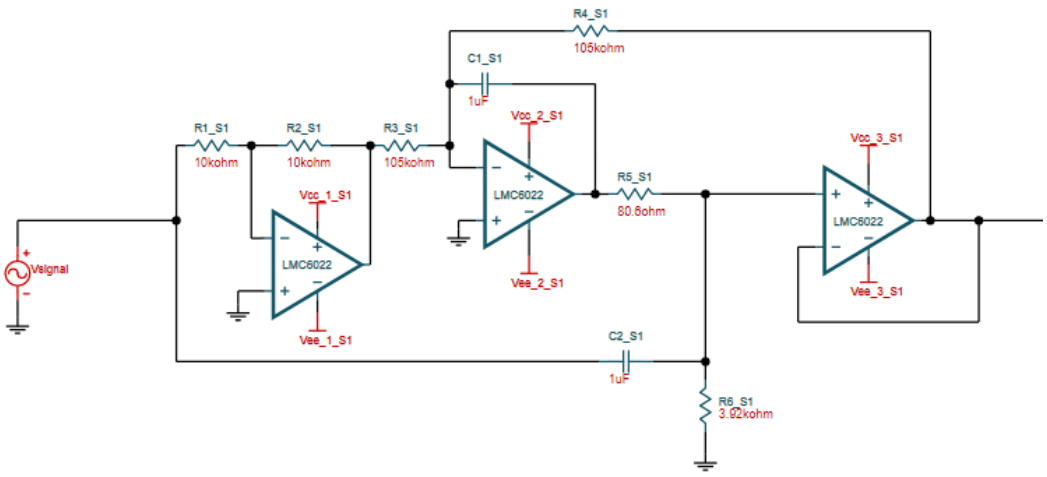
Tablo 3.8'de 60 Hz merkez frekanslı Butterworth çentik filtrenin bant genişliği ve derece değişimi durumunda kalite faktörü ve sapma miktarındaki değişim gösterilmiştir. 500 Hz ve 1 kHz bant genişliklerinde filtrelerin derecesi artarken kalite faktöründe artış görülmekte fakat sapma miktarındaki değişim kararsız bir yapıdadır. 500 Hz bant genişliği için tasarlanacak bir Butterworth filtrenin kalite faktörü ve sapma miktarı açısından en uygun derecesi altıncı derecedir. Böylelikle altıncı derece Butterworth filtre hem tasarım kolaylığı sağlar hem de düşük sapma miktarı ve yüksek kalite faktörü ile ideal bir filtre oluşmasını sağlamaktadır. 1 kHz için en uygun derece altıncı derecedir.

Tablo 3.8. 60 Hz farklı derecelerden tasarlanan Butterworth çentik filtrenin kalite faktörü değişimi

Merkez Frekans (Hz)	Bant Genişliği (Hz)	Filtre Derecesi	Kalite Faktörü (Gerçek)	Kalite Faktörü (Ölçülen)	Sapma Miktarı (%)
60	0-500	2	0.120	0.120	0
		4	0.718	0.731	1.778
		6	1.022	1.028	0.584
		8	1.339	1.313	1.942
		10	1.660	1.674	0.836
		14	2.308	2.353	1.912
		18	2.958	2.965	0.236
	0-1000	2	0.060	0.060	0
		4	0.710	0.723	1.798
		6	1.007	1.013	0.592
		8	1.315	1.325	0.754
		10	1.629	1.610	1.116
		14	2.272	2.266	0.264
		18	2.899	2.841	2.001

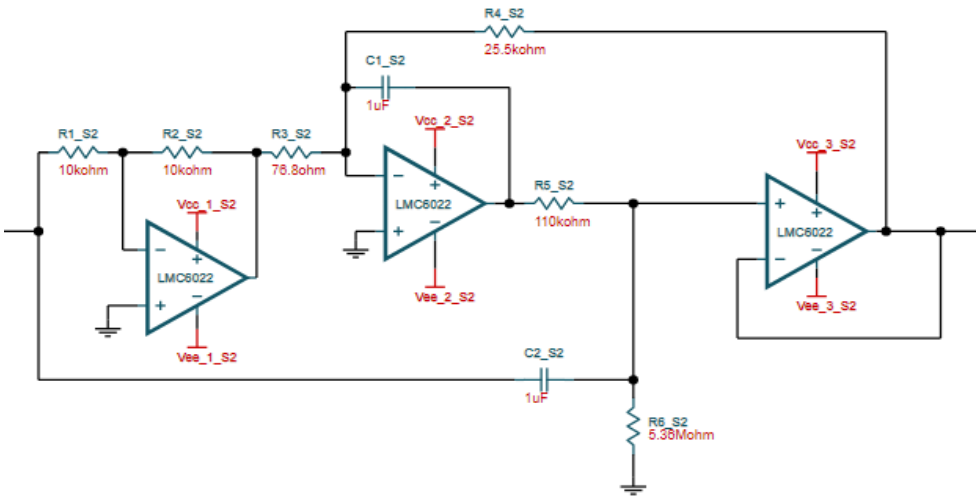
3.4. Chebyshev Çentik Filtre Tasarımı

Tasarlanmış olan Chebyshev çentik filtre önceki bölümlerde tasarlanan Bessel çentik filtre gibi kaskat yapıda ve üç katmandan oluşmuştur. Filtreleme için daha düzenli ve kusursuz bir çıkış elde edilmesi için üç kat kullanılmıştır. Bu üç kat devre topolojisi olarak birebir aynıdır fakat devreler arası bağlantı dirençlerinin değerleri farklıdır.



Şekil 3.13. 55 Hz Chebyshev çentik filtre birinci katmanı

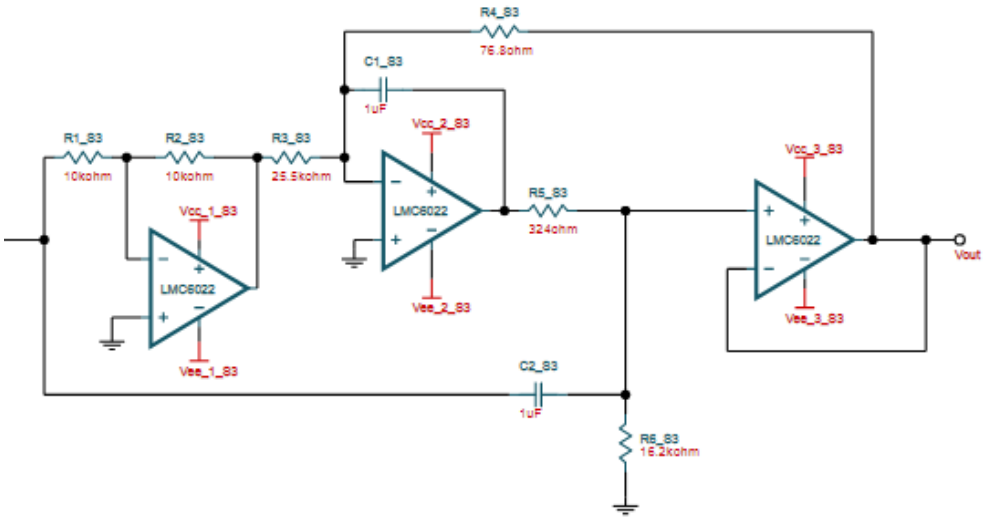
Tasarlanan yapının birinci bölümü Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Şekil 3.13'de gösterildiği üzere LMC6022 model op-amp kullanılmıştır.



Şekil 3.14. 55 Hz Chebyshev çentik filtrenin ikinci katmanı

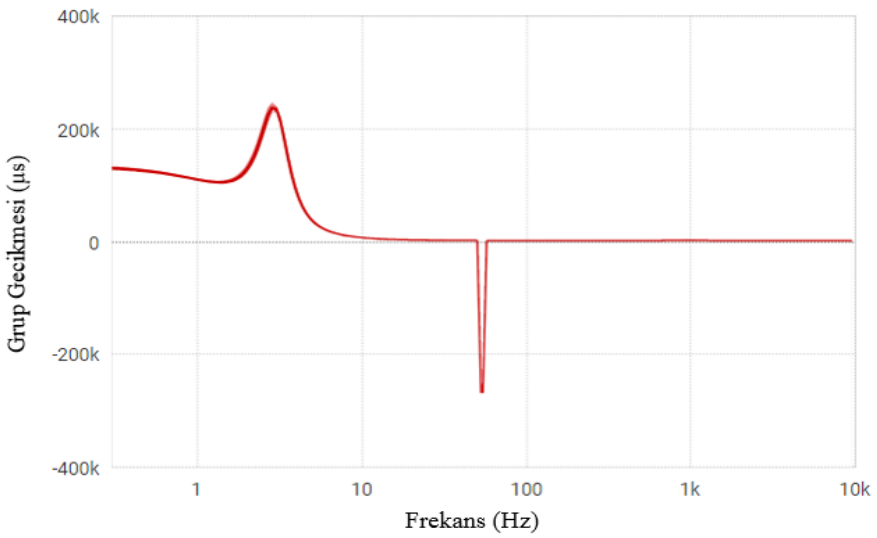
Tek bir katmanda görüldüğü üzere iki adet reaktif eleman kullanılmıştır. Bu nedenle filtrenin tek bir katmanı ikinci dereceden bir filtredir bunun gibi üç kat bağlanınca filtre altıncı dereceden bir filtre elde edilecektir. Şekil 3.14'de tasarlanan Chebyshev filtrenin ikinci katmanı gösterilmiştir. Tasarlanan filtrenin giriş besleme gerilimi 5V'dur. Filtrenin

bant durduran bölgesinin bant genişliği 100 Hz ve bant geçiren bölgesindeki bant genişliği 1 kHz olarak seçilmiştir. Aynı zamanda Chebyshev filtrelerin geçiş bandı dalgalanma miktarı filtrenin filtrelenmesinde önem arz ettiğinden dolayı bu miktar mümkün olduğu kadar düşük olması istenir. Bu çalışmada 1 dB olarak seçilmiştir. Filtrenin son katmanı olan üçüncü katman Şekil 3.15'de ifade edilmiştir.



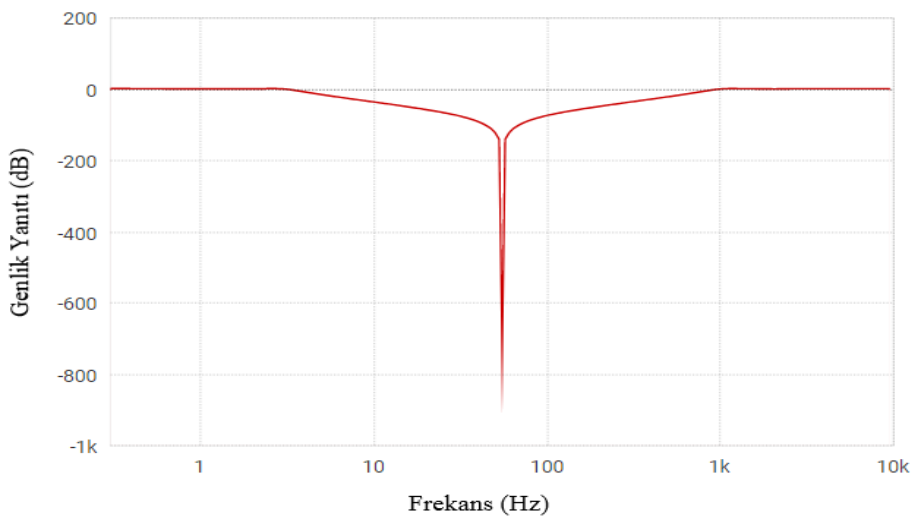
Şekil 3.15. 55 Hz Chebyshev çentik filtrenin üçüncü katmanı

Chebyshev filtreler diğer yandan yüksek kalite faktörü filtreleri olarak tanınmıştır. Bu nedenle tasarlanan Chebyshev çentik filtre söndürme bandında mümkün olduğu kadar dik bir sönümleme gerçekleştirmiş ve iniş açışı 66 dB/Decade değerinde bulunmuştur. Söndürme bandı performansı iyi olmasına karşın geçiş bandında 1 dB değerinde dalgalanma meydana gelmiştir. Şekil 3.16'da bu durum gösterilmiştir.



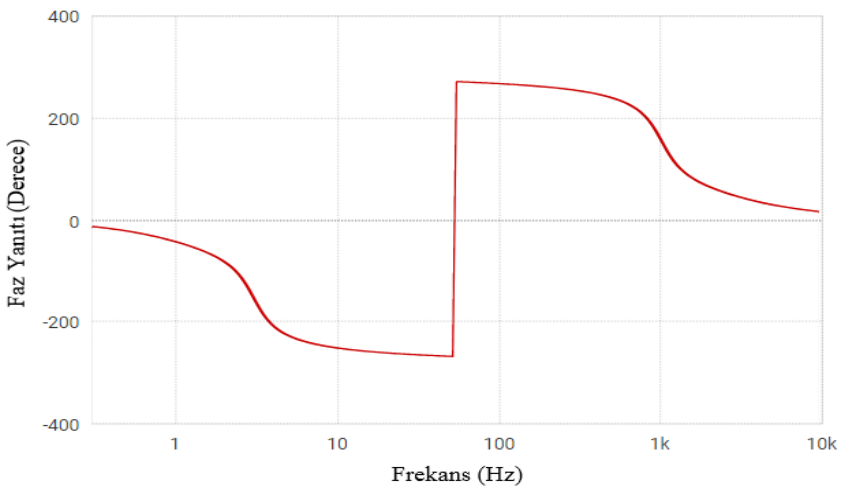
Şekil 3.16. 55 Hz Chebyshev filtrenin frekans-grup gecikmesi grafiği

Şekil 3.16'dan görüldüğü üzere dalgalanma değeri olan 1 dB grup gecikmesi-frekans eğrisinde de görünmektedir. Pozitif eksende yer alan kısım bant geçiren bölgenin kesim frekansına yaklaştığı bölgede dalgalanma yaptığı görülmüştür. Filtrenin karakteristiğinden dolayı durdurma bandı tasarlanan filtreler içerisinde en dar olan filtre Chebyshev çentik filtresi olarak tespit edilmiştir. Filtrenin genlik yanıtı-frekans eğrisi Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. 55 Hz Chebyshev filtrenin frekans-genlik yanıtı grafiği

Şekil 3.17'de frekans-genlik yanıtı grafiğinden görüleceği üzere filtrenin kazancı sıfır olacak şekilde seçilmiştir. Durdurma bandındaki 66 dB değerindeki düşüş çentik filtrenin çok dar bir bant aralığında keskin bir sönümleme yapmasını sağlamıştır. Bu sönümleme 53,5-56,5 Hz bant aralığında gerçekleşmiş olup tasarlanan filtreler içerisinde en dar bant durdurma aralığına sahip filtre olmuştur. Filtrenin faz yanıtı-frekans grafiği Şekil 3.18'de ifade edilmiştir.



Şekil 3.18. 55 Hz Chebyshev filtrenin frekans-faz yanıtı grafiği

Şekil 3.18'de ifade edilen frekans-faz yanıtı grafiğinde geçiş bandı öncesinde ve sonrasında bir miktar sapma meydana gelmiştir. Bunun sebebi filtre tasarlanırken dirençlerin %2 oranında toleranslı olarak kullanılması ve kapasitelerin %2 oranında toleranslı kapasiteler kullanılmasından kaynaklanmıştır. Aynı zamanda kullanılan op-amp'ın karakteristiği ve filtrenin kalite faktörünün de bu sapmada etkisi bulunmuştur. Bant durdurma bölgesinde herhangi bir sapma bulunmamakta ve filtre stabil duruma geçmiştir.

Tablo 3.9. 55 Hz Chebyshev çentik filtre toplam maliyeti

Eleman	Adet	Fiyat ($)	Toplam
LMC6022 Op-amp	9	1,55	13,95
1 µF Kapasite	6	0,05	0,3
77 Ω - 5,36 MΩ Direnç	18	0,04	0,72
			14,97

Yüksek sönümleme oranı filtrede kullanılması gereken elemanların değişmesine ve maliyet olarak da artmasına sebep olmuştur. Tablo 3.9'da kullanılan elemanların maliyet tablosu gösterilmiştir.

3.4.1. Farklı Derecelerden Chebyshev Çentik Filtrelerin Karşılaştırılması

Tasarımları yapılan Chebyshev çentik filtreler farklı derecelerden olup yedi farklı derece kullanılmıştır. Chebyshev filtreler diğer filtre türlerine göre çok yüksek kalite faktörüne sahiptir. Tablo 3.10'da görüldüğü üzere diğer filtreler ile aynı şartlar altında çok yüksek kalite faktörüne sahiptir. Bu yüzden yüksek kalite filtreleri olarak da adlandırılmıştır. Şekil 3.17'deki grafikten anlaşılacağı üzere durdurma bandında dik bir iniş sağlarken geçiş bandında bir stabiliteye sahip değildir. Geçiş bandında dalgalanmaya izin verildiğinden dolayı çıkış kararlı bir yapıya sahip olmuştur. Bunun etkisi Tablo 3.10'da gösterilen kalite faktörünün yüksek olmasının sebeplerinden birisi olmuştur.

Tablo 3.10. 50 Hz farklı derecelerden tasarlanan Chebyshev çentik filtrenin kalite faktörü değişimi

Merkez Frekans (Hz)	Bant Genişliği (Hz)	Filtre Derecesi	Kalite Faktörü (Gerçek)	Kalite Faktörü (Ölçülen)	Sapma Miktarı (%)
50	0-500	2	0.197	0.193	2.031
		4	0.972	0.980	0.816
		6	2.055	2.086	1.486
		8	3.632	3.601	0.853
		10	5.665	5.559	1.871
		14	11.110	11.320	1.855
		18	18.380	18.310	0.380
	0-1000	2	0.098	0.098	0
		4	0.960	0.925	3.645
		6	2.027	2.055	1.362
		8	3.576	3.535	1.146
		10	5.584	5.685	1.776
		14	10.950	10.740	1.918
		18	18.110	18.750	3.413

Tablo 3.10'da 50 Hz merkez frekansında bir Chebyshev filtrenin iki farklı bant genişliğinde ve yedi farklı filtre derecesinde hedeflenen kalite faktörü, gerçek kalite faktörü ve sapma miktarındaki değişim gösterilmiştir. Bessel ve Butterworth çentik filtrelerde ikinci dereceden tasarlanan bir filtrenin sapma miktarının sıfır olduğu görülmüştür fakat Chebyshev tipi bir çentik filtrenin dalgalanma özelliği bu filtrenin ikinci derecede olsa dahi bir miktar hesaplanan değerden sapma olduğu 500 Hz bant genişliğinde görülmüş fakat bu 1 kHz için geçerli olmadığı Tablo 3.10'da gösterilmiştir. Kalite faktöründeki değişim diğer filtre tiplerinden belirgin şekilde yüksek miktarda artış göstermiş bu da özellikle 1 kHz bant genişliğinin sapma miktarında kendini göstermiştir. Chebyshev filtrelerde derece yükseldikçe kalite faktörü parabolik bir artış gösterdiğinden dolayı 50 Hz merkez frekansında 500 Hz bant genişliği için kalite faktörü, sapma miktarı ve tasarım kolaylığı açısından on dördüncü derece uygun olarak görülmektedir. 1 kHz için bu değer aynı şekilde on dördüncü derece olarak görülmektedir.

Tablo 3.11'den görüldüğü üzere Bessel çentik filtreler ve Butterworth çentik filtrelerde olduğu gibi bu tür filtrelerde de bant genişliği filtrenin kalite faktörü üzerinde yine etkili

olmuştur ve bant genişliği düştükçe filtrenin kalite faktörü artmıştır. Tablo 3.11'den görüldüğü gibi ikinci dereceden Chebyshev filtreler diğer filtrelerde görüldüğü üzere basit yapıda olduklarından dolayı bulunan sapma değeri sıfır olmuştur.

Tablo 3.11. 55 Hz farklı derecelerden tasarlanan Chebyshev çentik filtrenin kalite faktörü değişimi

Merkez Frekans (Hz)	Bant Genişliği (Hz)	Filtre Derecesi	Kalite Faktörü (Gerçek)	Kalite Faktörü (Ölçülen)	Sapma Miktarı (%)
55	0-500	2	0.216	0.216	0
		4	0.975	0.980	0.510
		6	2.063	2.065	0.096
		8	3.641	3.617	0.659
		10	5.667	5.622	0.794
		14	11.160	11.190	0.268
		18	18.450	18.530	0.432
	0-1000	2	0.108	0.108	0
		4	0.961	0.968	0.723
		6	2.029	2.014	0.739
		8	3.580	3.559	0.586
		10	5.590	5.644	0.956
		14	10.960	11.050	0.814
		18	18.050	18.130	0.441

Farklı dereceler temel alınarak yapılan karşılaştırmada 55 Hz olan merkez frekansı sabit tutulmuş, bant genişliği iki aralık olan 500 Hz ve 1 kHz temel alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu hedeflenen kalite faktörü ve ulaşılan kalite faktörü elde edilmiş. Bu kalite faktörleri negatif veya pozitif yönde oluşan sapma değerleri yüzde olarak ifade edilmiştir.

Tablo 3.12'de 60 Hz merkez frekansı için Chebyshev çentik filtrenin farklı bant genişliklerinde ve filtre derecesinde meydana gelen değişiklikler karşısında sapma miktarı, hesaplanan ve ölçülen kalite faktörü değişimleri gösterilmiştir. Tablo 3.12'de 500 Hz merkez frekansındaki kalite faktörünün 1 kHz'e göre yüksek olduğu görülmektedir. 500 Hz bant genişliğinde tasarlanacak bir Chebyshev filtre için en uygun derece kalite faktörü, sapma miktarı ve tasarım kolaylığı açısından on dördüncü derecedir. 1 kHz bant

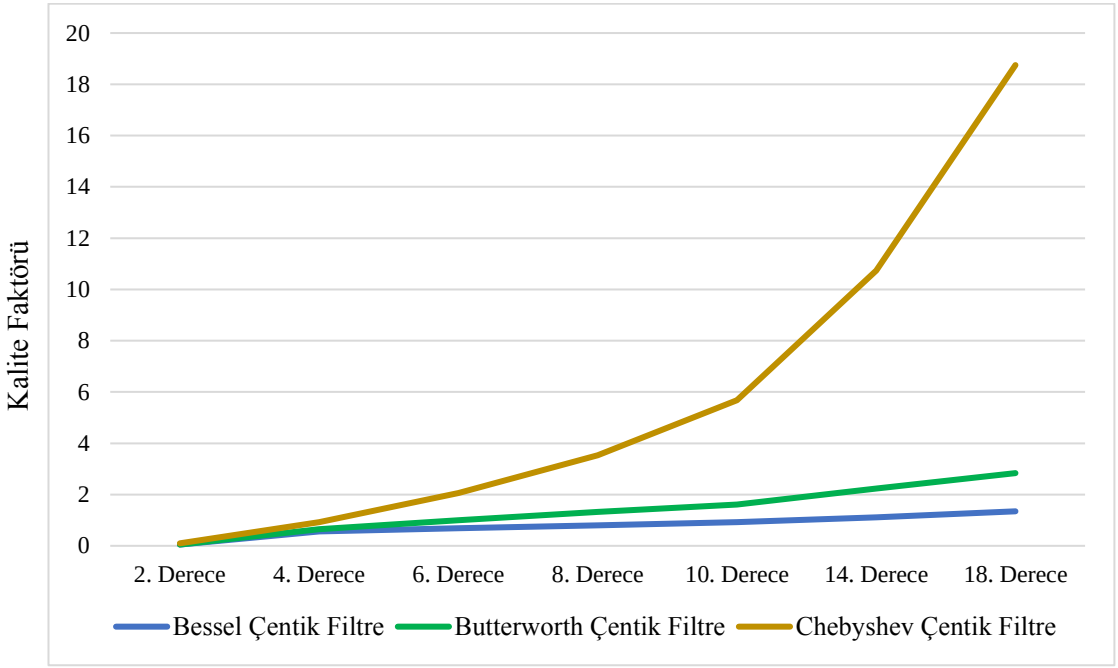
genişliği için kalite faktörü, sapma miktarı ve tasarım kolaylığı açısından en uygun filtre derecesi on sekizinci derece olduğu görülmektedir.

Tablo 3.12. 60 Hz farklı derecelerden tasarlanan Chebyshev çentik filtrenin kalite faktörü değişimi

Merkez Frekans (Hz)	Bant Genişliği (Hz)	Filtre Derecesi	Kalite Faktörü (Gerçek)	Kalite Faktörü (Ölçülen)	Sapma Miktarı (%)
60	0-500	2	0.236	0.235	0.424
		4	0.979	0.982	0.305
		6	2.071	2.086	0.719
		8	3.657	3.745	2.350
		10	5.712	5.559	2.679
		14	11.210	11.320	0.971
		18	18.530	19.290	3.939
	0-1000	2	0.118	0.120	1.667
		4	0.962	0.925	3.846
		6	2.031	2.055	1.168
		8	3.584	3.535	1.367
		10	5.596	5.685	1.565
		14	10.980	10.740	2.186
		18	14.340	14.460	0.830

3.5. Bessel, Butterworth, Chebyshev Çentik Filtrelerin Kalite Faktörü Kıyaslaması

Tasarlanan üç tip filtre olan Bessel, Butterworth, Chebyshev çentik filtrelerin kalite faktörleri belirli parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermiş ve bunlar doğrudan kalite faktörünün etkisiyle filtrenin performansını etkilemiştir. Kalite faktörünün filtrenin alt geçiren filtre ve üst geçiren filtre arasındaki uyum ve filtrenin derecesine bağlı olarak arttığını ve kalite faktörü ne kadar yüksekse filtrenin performansını o derecede artıracağını gösterilmiştir. Filtrelerin kalite faktörlerinin birbirleri ile rahatça kıyaslanması için Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de kalite faktörü-filtre dereceleri grafiği gösterilmiştir.

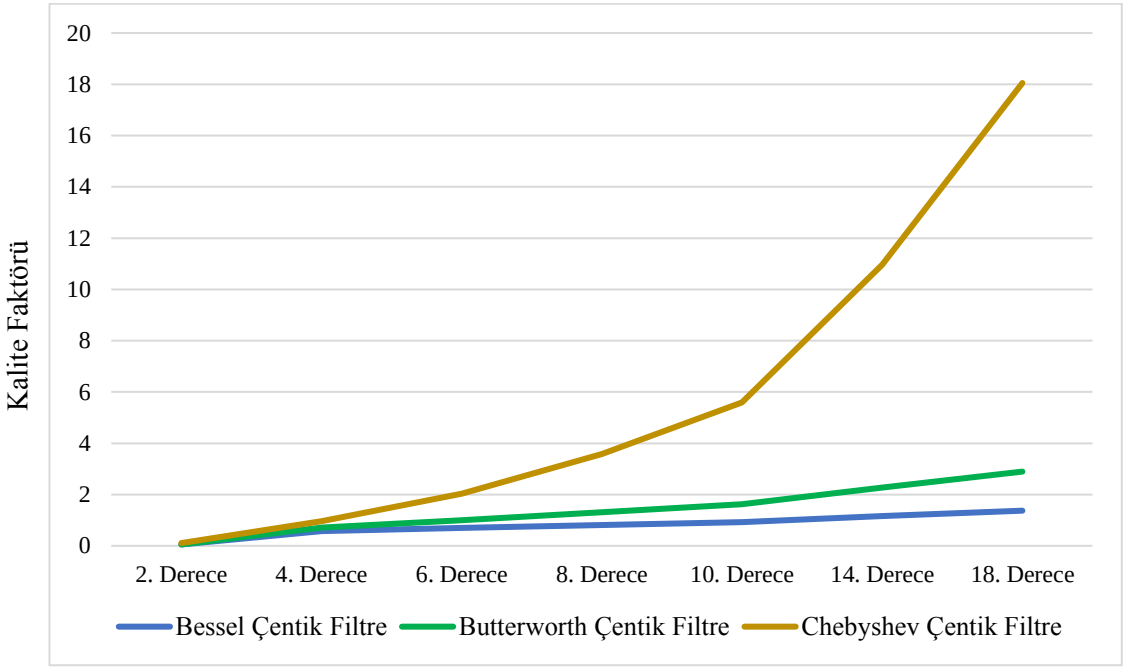


Şekil 3.19. 50 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-kalite faktörü grafiği

Şekil 3.19'da 50 Hz merkez frekansında Bessel, Butterworth ve Chebyshev çentik filtrelerin derece değişimine karşı kalite faktöründeki değişim gösterilmiştir. 50, 55 ve 60 Hz merkez frekansların grafikleri birbiri ile benzese de aralarındaki fark kalite faktöründeki ulaştıkları maksimum nokta olarak göze çarpmaktadır. 50 Hz merkez frekansta diğer merkez frekanslara göre Chebyshev çentik filtre on dördüncü dereceden sonra daha keskin bir artış miktarı ile kalite faktörü açısından tepe noktaya ulaşmıştır. Butterworth ve Chebyshev çentik filtreler ise diğer merkez frekanslarda olduğu gibi sabit bir artış göstermiş ve yüksek kalite faktörü aranan tasarımlara uygun olmadığını Şekil 3.19'da göstermiştir.

Şekil 3.20'de görüldüğü üzere 55 Hz merkez frekanslı filtrelerin derece artışı durumunda Bessel çentik filtre ve Butterworth çentik filtrelerin kalite faktörü birbirine çok yakın seyretmiş ve artış miktarları da belirli bir oranda ilerlemiştir fakat Chebyshev filtrelerin karakteristik yapısından dolayı filtrenin derecesi arttıkça filtrenin kalite faktörü katlanarak artmış ve diğer filtreler ile olan kalite faktörü açısından farkı ortaya çıkarmıştır.

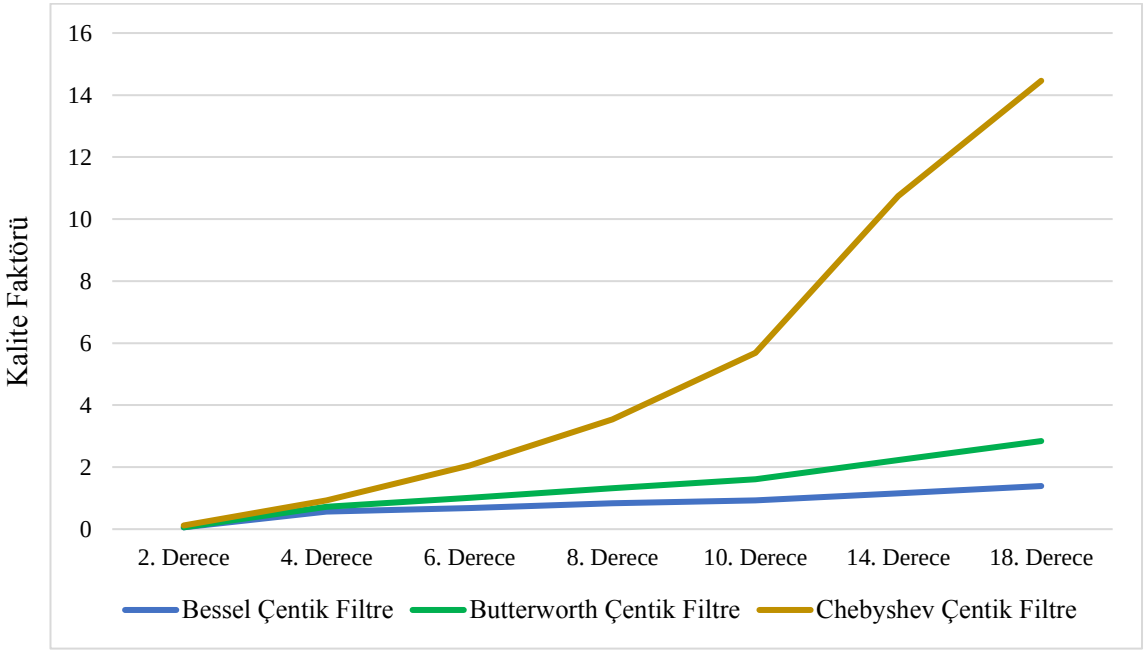
Kalite faktörünün artması Chebyshev filtrelerin katmanları arasındaki uyum ve karakteristiğini yansıtmıştır. Her üç filtre dördüncü dereceden itibaren kalite faktöründe artan bir şekilde değişim göstermiş fakat Bessel ve Butterworth çentik filtreler kalite faktöründe sabit artış göstermiştir.



Şekil 3.20. 55 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-kalite faktörü grafiği

Şekil 3.21'de 60 Hz merkez frekansında Bessel, Butterworth ve Chebyshev çentik filtrelerin derece değişimine karşı kalite faktöründeki değişim gösterilmiştir. Diğer merkez frekanslara göre 60 Hz merkez frekansta Chebyshev çentik filtrenin son derecede düşük miktarda kalite faktörü elde edildiği ve artan parabolik yapının zayıfladığı görülmektedir.

Üç tip çentik filtrenin merkez frekansları kıyaslandığında Chebyshev çentik filtre on dördüncü derecede kalite faktöründeki parabolik artışın zayıfladığı görülmektedir. Bundan dolayı on dördüncü dereceye kadar diğer frekanslarda olduğu şekilde kullanılmasına rağmen bu tür filtrede amaç yüksek kalite faktörü yakalanmak istediği için on dördüncü dereceden sonra 60 Hz'de Chebyshev çentik filtrenin kullanımı uygun değildir. Butterworth ve Bessel çentik filtreler onuncu dereceye kadar düşük bir artış miktarı göstermesine karşın onuncu derece ve sonrasında pozitif yönde ivmelenme görülmektedir.

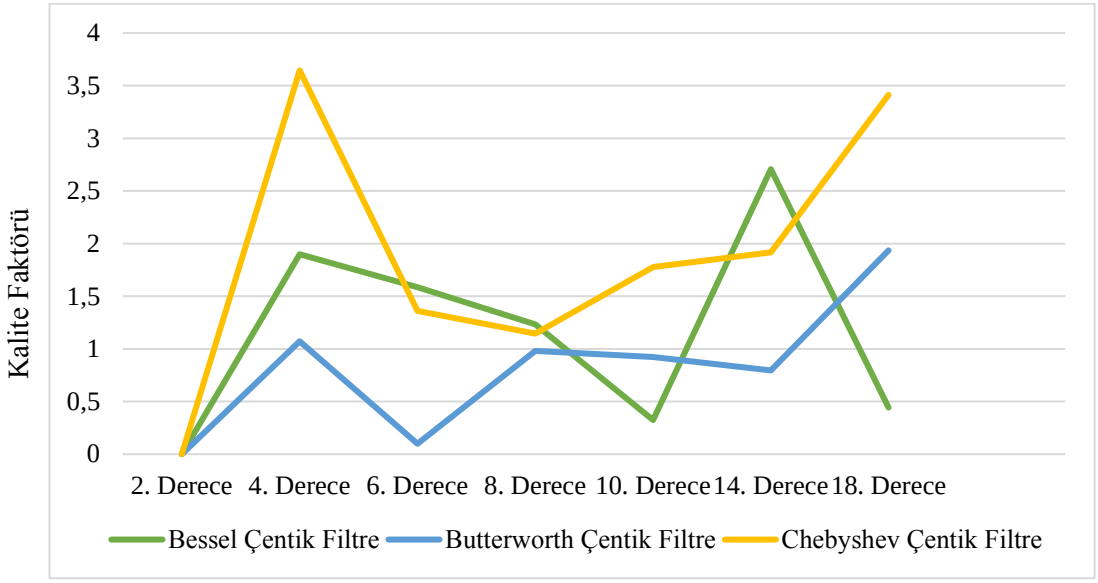


Şekil 3.21. 60 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-kalite faktörü grafiği

3.6. Bessel, Butterworth, Chebyshev Çentik Filtrelerin Sapma Miktarı Kıyaslaması

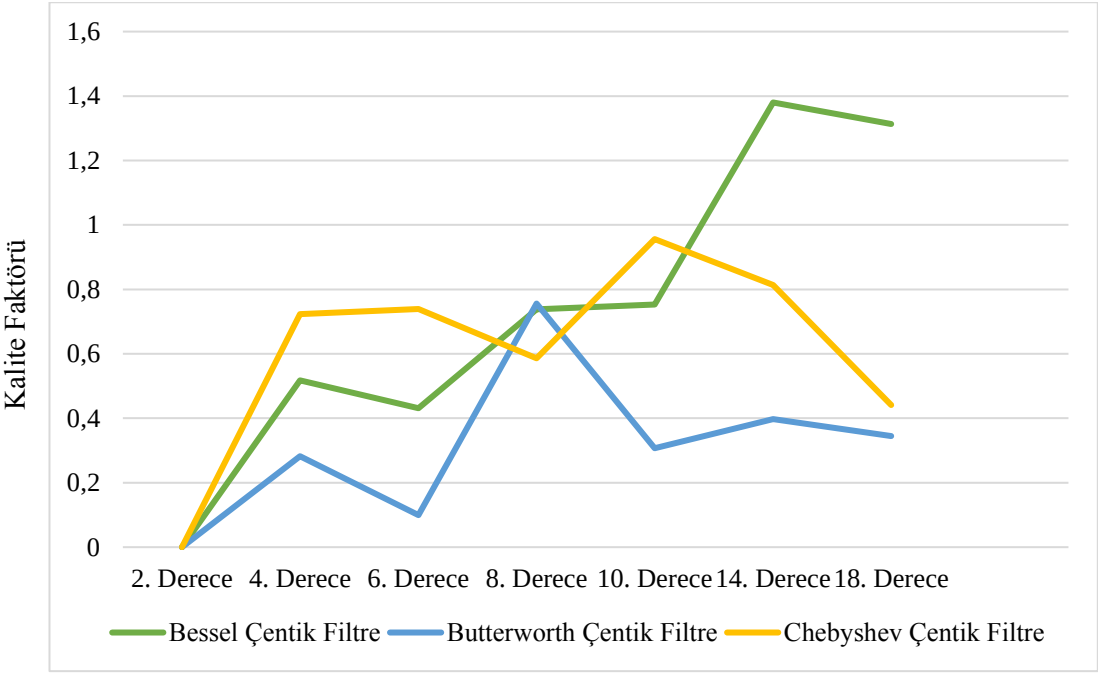
Önceki bölümlerde Bessel, Butterworth ve Chebyshev çentik filtrelerinin kalite faktörü yönünden kıyaslanması yapılmasının yanında ölçülen kalite faktörlerinin hesaplanan kalite faktörlerinden ne kadar saptığını gösteren filtre derecesi-sapma miktarı grafikleri bu bölümde gösterilmiş ve değerlendirilmiştir.

Şekil 3.22'de 50 Hz merkez frekansta Bessel, Butterworth ve Chebyshev çentik filtrelerinin filtre derecesi-sapma miktarı grafiği gösterilmiştir. Filtrelerin sapma miktarları birbirlerinden farklı olup devre içerisindeki elemanların toleranslarıyla doğrudan bağlantılıdır. 50 Hz merkez frekansında tasarlanan filtreler için %5 toleranslı dirençler ve %2 toleranslı kapasiteler kullanılmıştır. Bessel çentik filtre incelendiğinde dördüncü dereceye kadar sapma miktarında artış göstermiş, onuncu dereceye kadar düzenli bir azalma göstererek onuncu derecede başlangıç dikkate alınmazsa sapma miktarı açısından en düşük seviyeye ulaşmıştır. Bu yüzden 50 Hz merkez frekansta sapma miktarı faktörü dikkate alınarak tasarımda onuncu derece önerilmiştir. Onuncu dereceden sonra düzensiz artışlar ve düşüşler yaşanmıştır. Butterworth çentik filtreler 50 Hz merkez frekansının sapma miktarı açısından en tutarlı filtre türü olmuştur. En düşük sapma miktarını başlangıç dikkate alınmazsa altıncı derecede göstermiş ve tasarımda da bu derecenin tasarımı yapılması önerilmiştir. Chebyshev çentik filtre dördüncü derecede çok yüksek sapma miktarı göstererek bu derecede tasarımı yapılması uygun görülmemiştir.



Şekil 3.22. 50 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-sapma miktarı grafiği

Bu tip filtreler kalite faktörü yüksek olduğu için tercih edildiğinden dolayı derecesi mümkün oldukça yüksek değerde olması dikkate alınarak tasarlanacak olan filtre tercih edilmiştir. Bundan dolayı hem kalite faktörü hem sapma miktarı dikkate alınarak on dördüncü derece Chebyshev çentik filtrenin tasarımının yapılması önerilmiştir.

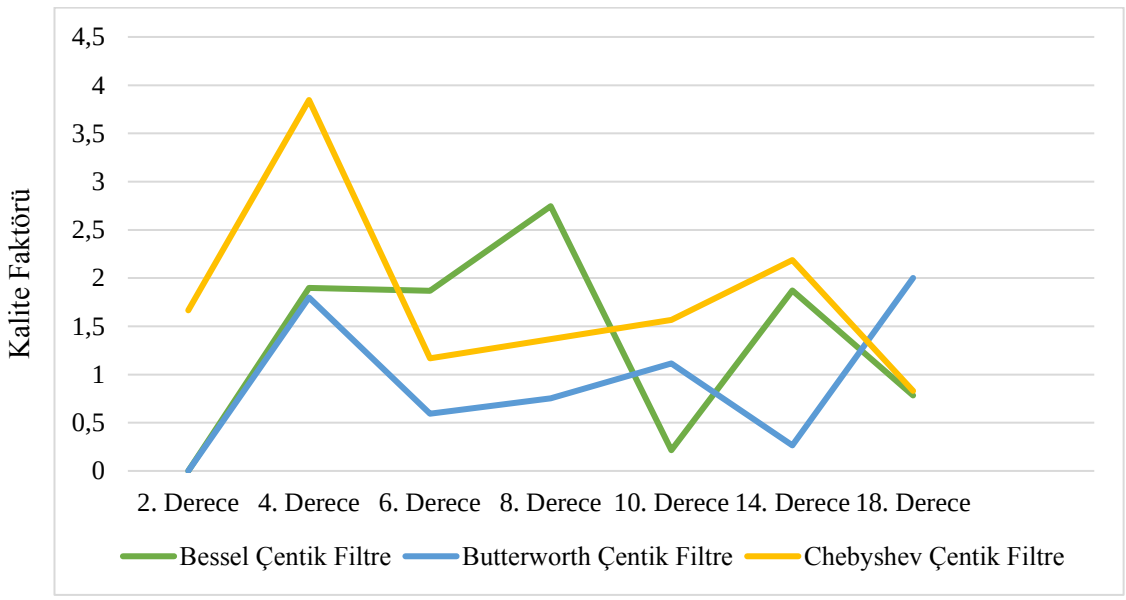


Şekil 3.23. 55 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-sapma miktarı grafiği

Şekil 3.23'de 55 Hz filtrelerin derece değişimine karşın çıkıştan elde edilen sapma miktarı gösterilmiştir. Bu grafikte Bessel çentik filtrelerin filtre derecesi arttıkça sapma miktarı artmaktadır. Bu artış sürekli olarak devam ettiği için Bessel çentik filtrelerin derecesi

arttıkça kalite faktöründeki sapma miktarı artışından dolayı çıkış kalite faktörünü hesaplamak zorlaşır. Butterworth çentik filtreler sekizinci derece filtreye kadar sapma miktarında artış görülmüş, bu seviyeden sonra düşüş eğilimine uğramıştır. Butterworth çentik filtreler Chebyshev çentik filtreler ile sapma miktarı açısından zıt bir davranış göstermiştir. Kalite faktörü açısından benzerlik gösteren Bessel çentik filtreler ile Butterworth çentik filtreler sapma miktarında farklı bir davranış göstermiştir. Chebyshev çentik filtreler tasarlanan üç tip filtre arasında durumu en sabit filtre olarak öne çıkmış ve mümkün olduğu kadar stabil seyretmiştir. Böylelikle kalite faktörü en tahmin edilebilir filtre olmuştur.

Şekil 3.24'de 60 Hz merkez frekansta Bessel, Butterworth ve Chebyshev çentik filtrelerinin filtre derecesi-sapma miktarı grafiği gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere her üç tip filtrede başlangıçtan itibaren sapma miktarında genel bir düşüş göstermiş. Bunun sebebi kalite faktörünün düşük tutulması olarak görülmüştür. 60 Hz Bessel çentik filtre için onuncu derecede en düşük sapma değeri gösterdiği ve kalite faktörü olarak uygun bir aralık olduğundan dolayı tasarımı yapılacak olan filtrenin onuncu derece olması gerektiği önerilmiştir.



Şekil 3.24. 60 Hz Bessel, Butterworth, Chebyshev filtrelerin derece-sapma miktarı grafiği

Butterworth çentik filtre için sapma faktörü ve tasarım kolaylığı ön plana çıkarıldığında altıncı derece bir filtre tasarımı yapılması önerilmiştir. Chebyshev çentik filtre için kalite faktörünün yüksek olması önemli olduğu için tasarımda öncelikli olarak kalite faktörü yüksek olması göz önünde bulundurulmuştur. Bu tip filtre için 60 Hz'de sekizinci derece bir filtrenin tasarımı yapılması uygun görülmüştür.

Tablo 3.13. Bessel, Butterworth ve Chebyshev filtrelerin iki bant genişliğinde ve farklı merkez frekanslarda ideal filtre dereceleri

Filtre Türü	Bant Genişliği	50 Hz	55 Hz	60 Hz
Bessel	0-500 Hz	4	6	6
	0-1000 Hz	10	6	10
Butterworth	0-500 Hz	8	8	6
	0-1000 Hz	6	6	6
Chebyshev	0-500 Hz	14	14	14
	0-1000 Hz	14	14	18

Tablo 3.13'de Bessel, Butterworth ve Chebyshev çentik filtrenin 500 Hz ve 1 kHz bant genişliğinde farklı merkez frekanslarda tercih edilen ideal filtre dereceleri gösterilmiştir. Bessel çentik filtre 500 Hz bant genişliğinde 50 Hz merkez frekansta dördüncü derece filtre diğer filtre derecelerine göre daha yüksek kalite faktörü sağladığından ve sapma miktarı düşük olduğundan dolayı tercih edilmiştir. 55 ve 60 Hz merkez frekansta aynı şekilde kalite faktörü yüksekliği ve sapma miktarının yanında tasarım kolaylığı açısından altıncı derece tercih edilmiştir. Bessel çentik filtrelerde 1 kHz bant genişliğinde 50 Hz ve 60 Hz merkez frekansta onuncu derece kullanılmıştır. Bunun sebebi yüksek kalite faktörü sağlamasıdır fakat kalite faktörünün yükselmesi için derece yükseltmek gerekir, bu da filtre tasarımını zorlaştırmaktadır. 55 Hz merkez frekansta altıncı derece filtre yüksek kalite faktörü ve düşük sapma miktarı elde etmek için uygundur. Butterworth çentik filtrelerde 500 Hz bant genişliğinde 50 ve 55 Hz merkez frekansta sekizinci derece, 60 Hz merkez frekansta altıncı derece filtre yüksek kalite faktörü ve düşük sapma elde edildiğinden dolayı tercih edilmiştir. 1 kHz bant genişliğinde her üç merkez frekans için altıncı derece filtreler tercih edilmiştir. Chebyshev çentik filtreler için 500 Hz bant genişliğinde 50, 55 ve 60 Hz merkez frekansta on dördüncü derece tercih edilmiştir. Bunun sebebi Chebyshev çentik filtre tasarımı yapılırken yüksek kalite faktörü istenmesi ve filtrede tasarım kolaylığı aranmamasıdır. 1 kHz bant genişliğinde 50, 55 Hz merkez frekansta kalite faktörünün yüksek olması ve sapma miktarının düşük olması sebebiyle on dördüncü derece tercih edilmiş 60 Hz merkez frekansta ise on sekizinci derece tercih edilmiştir.

3.7. Bessel, Butterworth ve Chebyshev Filtrelerin Eşdeğerlerinin Bulunması

Tasarımı yapılan üç tip filtrenin birbirleri yerine kullanılması mümkündür. Birbiri yerine kullanılacak olan filtrelerin kalite faktörleri birbirlerine eşit veya çok yakın olması gerekmektedir. Fakat bu durumda kullanılacak filtre derecesi farklılık göstermektedir. 1 kHz bant genişliği ve 55 Hz merkez frekansı için filtre derecelerinin filtre türüne göre eşdeğerleri Tablo 3.14'de gösterilmiştir.

Tablo 3.14. Bessel, Butterworth ve Chebyshev filtrelerin diğer türlerde eşdeğerlikleri

Filtre Türü	Filtre Derecesi	Filtrelerin Eşdeğer Dereceleri		
		Bessel	Butterworth	Chebyshev
Bessel	2	2	2	2
	4	4	-	-
	6	6	4	-
	8	8	-	-
	10	10	6	4
	14	14	-	-
	18	18	8	-
Butterworth	2	2	2	2
	4	6	4	-
	6	10	6	4
	8	18	8	-
	10	-	10	-
	14	-	14	6
	18	-	18	-
Chebyshev	2	2	2	2
	4	10	6	4
	6	-	14	6
	8	-	-	8
	10	-	-	10
	14	-	-	14
	18	-	-	18

Beş farklı dereceden Bessel, Butterworth ve Chebyshev filtrelerin diğer filtre türlerinde eşdeğer dereceleri Tablo 3.14'de gösterilmiştir. Buradan her tür filtrenin diğer filtre türlerinde karşılığı olmadığı tablodan görülmüştür. Özellikle Chebyshev çentik filtrelerin yüksek kalite faktörüne sahip olması sebebiyle yüksek derecelerde diğer filtre türlerinde karşılığı olmadığı veya çok yüksek olması gerektiği görülmüştür.

Bessel, Butterworth ve Chebyshev çentik filtrelerin ikinci derecede birbirleri yerine kullanılabildiği görülmüştür. Bunun temel sebebi ikinci derece filtreler neredeyse aynı kalite faktörüne sahip olduğu ve düşük kalite faktöründen dolayı sapma miktarları ne kadar yüksek olursa olsun etkisinin minimum olmasından kaynaklanmıştır. Bessel çentik filtrelerin incelenen derecelerde dördüncü, sekizinci ve on dördüncü derecelerde diğer filtre türlerinde bir karşılığı olmadığı görülmüştür. Altıncı derece Bessel çentik filtrenin dördüncü derece bir Butterworth çentik filtre yerine kullanılabildiği görülmüştür. Onuncu derece bir Bessel çentik filtre yerine altıncı derece bir Butterworth çentik filtre veya dördüncü derece bir Chebyshev çentik filtre kullanılabileceği görülmüştür. On sekizinci derece bir Bessel çentik filtre için sekizinci derece bir Butterworth çentik filtre kullanılması uygun görülmüştür.

Butterworth çentik filtrenin Bessel çentik filtrelerde karşılığı yüksek dereceden bir filtre olup, Chebyshev çentik filtrelerdeki karşılığı ise düşük dereceden filtrelere karşılık geldiği Tablo 3.14'de görülmüştür. Onuncu ve on sekizinci derece Butterworth çentik filtrenin diğer filtre türlerinde karşılığı olmadığı görülmüştür. Dördüncü derece Butterworth çentik filtre altıncı derece Bessel çentik filtreye denk olmuştur. Altıncı derecede ise onuncu derece bir Bessel çentik filtreye denk iken dördüncü derece bir Chebyshev çentik filtreye eşit olmuştur. Sekizinci derece Butterworth çentik filtre on sekizinci derece Bessel çentik filtreye eşit olup incelenen filtre derecelerinde Chebyshev çentik filtrede herhangi bir karşılığı bulunmamıştır. On dördüncü derece Butterworth çentik filtrenin Chebyshev çentik filtrede karşılığı altıncı derece olduğu görülmüştür.

Chebyshev çentik filtreler yüksek kalite faktöründen dolayı diğer filtre türlerinde, incelenen derecelerde genel olarak karşılığı bulunmadığı Tablo 3.14'de görülmektedir. Dördüncü derece Chebyshev çentik filtrenin Bessel çentik filtrede karşılığı onuncu derece olurken, Butterworth çentik filtrede altıncı derece olduğu görülmüştür. Altıncı derece Chebyshev çentik filtrenin Bessel çentik filtrede karşılığı bulunmazken Butterworth çentik filtrede on dördüncü derece olarak görülmüştür. Diğer derecelerde bulunan Chebyshev çentik filtrelerin incelenen derecelerde karşılığı olmadığı görülmüştür.

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuç ve Öneriler

Filtreleme işlemi elektronik sistemler için daima hayati bir öneme sahip olmuştur. Özellikle hassas filtreleme yapılması gereken ve ses frekanslarındaki sinyallerin filtrelenmesi veya bastırılması için kullanılan filtreler biyomedikal cihazlar için hassas ölçüm yapan cihazlar için önemli olmuştur. Bu süreç dikkate alınırsa gerekli şartlar belirlenerek en uygun filtrenin seçimi ve tasarlanacak olan yöntemin belirlenmesi gereklidir. Birçok tasarım yöntemi bulunmasına karşın hepsinin farklı belirgin özellikleri söz konusudur.

Bu tez çalışmasında Bessel, Butterworth ve Chebyshev olmak üzere üç farklı tipte, yedi farklı derecede, üç farklı merkez frekansta ve iki farklı bant genişliğinde çentik filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu filtrelerin entegre edileceği sistemle uyumu ve sistemde gösterilecek performansı tahmin edebilmek amacıyla filtrenin kalite faktörü dikkate alınmış ve kalite faktörünün filtre derecelerine göre değişimi ortaya koyulmuştur. Tasarlanan Bessel çentik filtre dalgalanma potansiyeli en az olan filtre tipi olarak öne çıkmış, salınım oranı en düşük seviyede olan filtre olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda Bessel çentik filtreleri bant geçirme bölgesinden bant durdurma bölgesine geçişi dik bir açıya yakın olmadığından dolayı diğer filtrelere göre daha yüksek bir bant genişliğine ihtiyaç duymuştur. 55 Hz merkez frekansta hem tasarım kolaylığı açısından hem de gösterdiği kalite faktörü değerlendirmeye alınarak altıncı dereceden bir Bessel çentik filtre kullanılacak olan sistem için uygun görülmüştür. Tasarlanan ikinci filtre türü olan Butterworth çentik filtre geçiş bandında diğer tasarlanan filtrelere göre düz bir frekans tepkisine sahip olduğu görülmüş, durdurma bandı ve geçiş bandında minimum dalgalanmaya sahip olduğu görülmüştür. Butterworth çentik filtrenin derecesi arttığında durdurma bandında sert bir düşüş yaşandığı fakat buna karşı frekans-genlik eğrisinde filtrenin şeklini koruduğu görülmüştür. Butterworth filtreler, Bessel filtrelere benzer bir

şekilde geniş geçiş bölgesine sahip olduğu ve kalite faktörü açısından da benzer olduğu görülmüştür. Bessel filtrelerdeki gibi tasarım kolaylığı oluşturması ve kalite faktörü değişimi göz önüne alınarak 55 Hz'de altıncı dereceden bir Butterworth çentik filtre kullanılacak olan sistem için uygun görülmüştür. Tasarlanan son filtre olan Chebyshev çentik filtre diğer filtrelerden en belirgin özelliği filtre derecesinin artması durumunda çok yüksek kalite faktörüne sahip olacağı tespit edilmiştir. Ayrıca söndürme bandında çok yüksek düşüş açısına sahip olduğu ve diğer filtrelere oranla bu oranın çok yüksek olması bu filtreyi diğer tip filtrelerden ayırmıştır. Fakat geçiş bandı dalgalanmalarına izin vermesi sebebiyle geçiş bandında en yüksek dalgalanmaya sahip filtre olmuştur. Bu dalgalanmanın sebebi Chebyshev çentik filtre yapısının anlık tepkilere yanıt verememesinden kaynaklandığı öngörülmektedir. Chebyshev çentik filtre kullanılacak sistemde tasarım kolaylığı aranmadığından ve yüksek kalite faktörü istendiğinden dolayı tüm merkez frekanslarda filtrenin derecesi kullanılacak sistem için yüksek seçilmelidir.

Tasarımları yapılan 55 Hz Bessel, Butterworth ve Chebyshev çentik filtrelerden farklı olarak merkez frekansı değişimine karşı kalite faktörü ve sapma miktarındaki değişikliklerin incelenmesi için 50 ve 60 Hz merkez frekansları kullanılarak inceleme gerçekleştirilmiştir. Filtreler için kalite faktörleri ve sapma miktarları dikkate alındığında 50 Hz'de Bessel çentik filtre için onuncu derece, Butterworth çentik filtre için altıncı derece, Chebyshev çentik filtre için on dördüncü derece filtrelerin tasarımları yapılması önerilmiştir. 60 Hz merkez frekansta Bessel çentik filtreler için onuncu derece, Butterworth çentik filtre için altıncı derece, Chebyshev çentik filtre için sekizinci derece filtre tasarımı yapılması önerilmiştir.

Filtre tasarımı ile ilgili yapılabilecek olan bu filtre tiplerinin besleme voltajı karşısında gösterdiği tepkiler ve analiz yöntemlerinin değiştirilmesi sonucu gösterecekleri olan tepkiler ve düşük frekanslar yerine yüksek frekanslarda bu tip filtrelerin göstereceği tepkiler ileriki çalışmalarda önerilebilir. Ayrıca çentik filtrelerin yerine bu tür filtrelerin işlevlerini yerine getirebilecek farklı bir tür filtre değerlendirilip incelenebilir.

KAYNAKÇA

1. Zverev, A. I., 1966. 'The golden anniversary of electric wave filters'. **Institute of Electrical and Electronics Engineers Spectrum, 3**, pp. 129-131.

2. Zobel, J. O., 1923. 'Theory and design of electric wave filters'. **Bell System Technical Journal, 2**, pp. 1-46.

3. Orchard H. J., Temes G. C., 1968. 'Filter Design Using Transformed Variables'. **Institute of Electrical and Electronics Engineers Spectrum, 15,** pp. 385-408.

4. Rhea, R. W., 1994. HF Filter Design and Computer Simulation, Illustrated Edition. Scitech Publishing, New York, 448 pp.

5. Yıldız, A. B., 2006. Elektrik Devreleri Teori ve Çözümlü Örnekler, Kısım II. Kocaeli Üniversitesi Yayınları, Vol.234, Kocaeli.

6. Zverev, A. I., 2005. Handbook of Filter Synthesis, Revised Edition. Wiley-Interscience Publishing, New York, 592 pp.

7. Matthei, G., Young, L., Jones, E. M. T., 1980. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, Artech House Books. Massachusetts, 1096 pp.

8. Lancaster, D., 1996. Active Filter Cookbook, Second Edition. Newnes Publishing, Arizona, 240 pp.

9. Niewiadomski, S., 1989. Filter Handbook: A Practical Design Guide, First Edition. Elsevier Science Press, Oxford, 256 pp.

10. Mitra, S. K., 1971. Active Inductorless Filters, IEEE Press, New York, 224 pp.

11. Sallen, R. P., 1995. A Practical Method of Designing RC Active Filters, pp. 74-85. *In:* IRE Transactions Circuit Theory (Eds. R. P., Sallen). Vol. CT-2, IEEE Press, London.

12. Fleischer, P. E., Tow, J., 1973. Design Formulas for Biquad Active Filters Using Three Operational Amplifiers, IEEE Press, pp. 662.

13. Tobey, G. E., Graeme, J. G., Huelsman, L. P., 1971. Operational Amplifiers Design and Applications, First Edition. McGraw Hill, New York, 512 pp.

14. Zumbahlen, H., 2008. Linear Circuit Design Handbook, First Edition. Newnes Press, Jordon Hill, Oxford, 8.1-8.142 pp.

15. Huelsman L. P., Allen P. E., 1980. Introduction to the Theory and Design of Active Filters, McGraw-Hill, New York, 429 pp.

16. Brutton, L. T., 1980. RC- Active Circuit: Theory and Design, First Edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 523 pp.

17. R., Cahit, I., Cahit, 1974. 'Flexible active filter design using three-operational amplifiers'. **Proceedings of the IEEE, 62**, 851-852 pp.

18. Aydın, E., 2011. Notch Filtre Tasarımı. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 69 s.

19. Tümer, T., 2008. Dört Kutuplu Dual Mod Mikroşerit Bant Geçiren Filtre Tasarımı. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde, 45 s.

20. Chen, C., 1982. Active Filter Design, First Edition. Hayden Books, 133 pp.

21. Öztürk, B., 2019. Mikrodalga Uygulamalar için 2.45 GHz Mikroşerit Bant Durduran Filtre Tasarımları ve Optimizasyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 105 s.

22. Berlin, H. M., 1981. Design of Active Filters, First Edition. H. W. Sams, New York, 238 pp.

23. Blinchikoff, H. J., Zverev A. I., 2001. Filtering in the Time and Frequency Domains, Revised Edition. SciTech Publishing, Atlanta, 520 pp.
24. Williams, A. B., 1981. Electronic Filter Design Handbook, Fourth Edition. McGraw-Hill, London, 775 pp.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Gökhan ŞAHİN

Uyruğu: Türkiye Cumhuriyeti (T.C.)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

E-mail:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Erciyes Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2018
Lise	Yavuz Sultan Selim Anadolu Lisesi, Niğde	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2022-Devam Ediyor	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

Türkçe, İngilizce

YAYINLAR