

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

**YÜKSEK MERTEBEDEN AKTİF SÜZGEÇLERİN  
TASARLANMASI**

**TEZSİZ YÜKSEK LİSANS BİTİRME PROJESİ**

**ÖVGÜN ÖZLÜSÖZ**

**DENİZLİ, AĞUSTOS - 2017**

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



**YÜKSEK MERTEBEDEN AKTİF SÜZGEÇLERİN  
TASARLANMASI**

**TEZSİZ YÜKSEK LİSANS BİTİRME PROJESİ**

**ÖVGÜN ÖZLÜSÖZ**

**DENİZLİ, AĞUSTOS - 2017**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Övgün ÖZLÜSÖZ** tarafından hazırlanan “**YÜKSEK MERTEBDEN AKTİF SÜZGEÇLERİN TASARLANMASI**” adlı tezsiz yüksek lisans dönem projesi çalışmasının takibi ve kontrolü tarafımda sağlanmış ve kabul edilmiştir.

Danışman  
Yrd. Doç Dr. M. Serhat KESERLİOĞLU

.....

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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



Öğün ÖZLÜSÖZ

## ÖZET

**YÜKSEK MERTEBEDEN AKTİF SÜZGEÇLERİN TASARLANMASI  
TEZSİZ YÜKSEK LİSANS PROJESİ  
ÖVGÜN ÖZLÜSÖZ  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI:YRD. DOÇ. DR. M. SERHAT KESERLİOĞLU)**

**DENİZLİ, AĞUSTOS - 2017**

### **YÜKSEK MERTEBEDEN AKTİF SÜZGEÇLERİN TASARLANMASI**

Bu proje, yüksek mertebeden aktif süzgeç devrelerinin tasarlanmasında kullanılan aktif alt devrelerin incelenmesi, süzgeç tasarımında kullanılan Butterworth ve Chebyshev yöntemlerinin araştırılması ve elde edilen bilgiler kullanılarak yüksek mertebeden bir süzgeç devresinin tasarlanarak ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesini kapsamaktadır.

**ANAHTAR KELİMELER:Aktif süzgeç, Süzgeç, Butterworth, Chebyshev**

## **ABSTRACT**

**HIGH ORDER ACTIVE FILTERS DESIGN  
MSC PROJECT  
ÖVGÜN ÖZLÜSÖZ  
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:ASSISTANT PROFESSOR. M. SERHAT KESERLİOĞLU)**

**DENİZLİ, AUGUST 2017**

### **HIGH ORDER ACTIVE FILTERS DESIGN**

This Project covers the investigation of high order actives and gold circuits, the investigation of Butterworth and Chebyshev methods used in filter design and the evaluation of the measurement results by designing a high order filter curcuit.

**KEYWORDS: Filter, active filter, Butterworth, Chebyshev**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Projenin Önemi.....	1
1.2 Elektronik Süzgeç Sınıfları.....	1
1.3 Genel Süzgeç Tanımı: .....	2
1.4 Süzgeç Türleri .....	4
<b>2. BİRİNCİ DERCEDEDEN SÜZGEÇLER</b> .....	<b>6</b>
<b>3. İKİNCİ DERCEDEDEN SÜZGEÇLER</b> .....	<b>9</b>
<b>4. YÜKSEK DERCEDEDEN SÜZGEÇLER</b> .....	<b>11</b>
4.1 Yüksek Dereceden Süzgeçler .....	11
4.2 Yüksek Dereceden Alçak Geçiren Butterworth Transfer Fonksiyonlarının Gerçeklenmesi.....	11
<b>5. YAKLAŞIKLIK SORUNU</b> .....	<b>14</b>
5.1 Butterworth Yaklaşımı .....	15
5.2 Chebyshev Yaklaşımı .....	17
<b>6. FREKANS DÖNÜŞÜMLERİ</b> .....	<b>22</b>
6.1 Alçak Geçiren Süzgeç – Alçak Geçiren Süzgeç Dönüşümü: .....	22
6.2 Yüksek Geçiren Süzgeç – Alçak Geçiren Süzgeç Dönüşümü: .....	23
6.3 Bant Geçiren Süzgeç – Alçak Geçiren Süzgeç Dönüşümü: .....	23
6.4 Bant Söndüren Süzgeç – Alçak Geçiren Süzgeç Dönüşümü: .....	24
<b>7. PROJE DEVRESİ</b> .....	<b>26</b>
<b>8. Laboratuvar Ölçüm Sonuçları</b> .....	<b>39</b>
<b>9. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>45</b>
<b>10. KAYNAKLAR</b> .....	<b>46</b>
<b>11. ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>1</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1-1: Genel süzgeç devresinin gösterimi.....	3
Şekil 1-2 (a) Alçak geçiren süzgeç frekans cevabı .....	4
Şekil 2-3 : Alçak geçiren süzgeç ideal karakteristiği .....	7
Şekil 2-4: Alçak geçiren süzgeç genlik cevabı.....	7
Şekil 3-5: 1. ve 2. Derece süzgeçlerin genlik cevabı.....	9
Şekil 4-6: Yüksek dereceden süzgeçlerin oluşturulması.....	12
Şekil 5-7: Normalleştirilmiş süzgeç karakteristiği.....	14
Şekil 5-8: Normalize Butterworth yaklaşıklığı.....	16
Şekil 5-9: Chebyshev süzgece ait genlik cevabı.....	18
Şekil 6-10: Alçak geçiren süzgeç – Alçak geçiren süzgeç dönüşümü.....	22
Şekil 6-11: Yüksek geçiren süzgeç - Alçak geçiren süzgeç dönüşümü.....	23
Şekil 6-12: Bant geçiren süzgeç – Alçak geçiren süzgeç dönüşümü.....	24
Şekil 6-13: Bant söndüren süzgeç – Alçak geçiren süzgeç dönüşümü.....	25
Şekil 7-14: MFB (Multiple feedback) Süzgeç devresi.....	26
Şekil 7-15: MFB (Multiple feedback) Tasarlanan süzgeç devresi.....	38
Şekil 8-16: Proje devresi prototip .....	39
Şekil 8-17: MFB Süzgeç 10 Hz genlik cevabı.....	40
Şekil 8-18: MFB Süzgeç 1 kHz genlik cevabı.....	40
Şekil 8-19: MFB Süzgeç 3 kHz genlik cevabı.....	41
Şekil 8-20: MFB Süzgeç 5 kHz genlik cevabı.....	41
Şekil 8-21: MFB Süzgeç 10 kHz genlik cevabı.....	42
Şekil 8-22: MFB Süzgeç Gerilim Kazanç Grafiği.....	42
Şekil 8-23: MFB Süzgeç Gerilim Kazanç Grafiği .....	43
Şekil 8-24: MFB Süzgeç Karşılaştırmalı Gerilim Kazanç Grafiği .....	44



## TABLO LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Tablo 1.1 Süzgeç Sınıfları.....	2
Tablo 7.1: Chebyshev Polinomları.....	28

## SEMBOL LİSTESİ

- $H(s)$  : Transfer Fonksiyonu  
 $\omega$  : Açısal frekans  
 $\omega_0$  : Kutup frekansı

## ÖNSÖZ

### TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimime birlikte başladığımız Prof. Dr. Mustafa TEMİZ'e ve başladığım işi yarım bırakmama engel olarak sonuca ulaşmamı sağlayan, ilgi gösteren, öğreten, yönlendiren ve yardımlarını benden esirgemeyen proje danışmanım Yrd. Doç. Dr. M. Serhat KESERLİOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca proje çalışmamı hazırlamamda, tüm destek ve yardımlarını benden esirgemeyen değerli meslektaşım Ahmet ABACI'ya ve bana sabrederek yardımcı olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

# 1. GİRİŞ

Bu proje yüksek mertebeden aktif süzgeç devrelerinin tasarlanmasında kullanılan aktif alt devrelerin incelenmesi, süzgeç tasarımında kullanılan Butterworth ve Chebyshev yöntemlerinin araştırılması ve elde edilen bilgiler kullanılarak yüksek mertebeden bir süzgeç devresinin tasarlanarak sonuçların değerlendirilmesini kapsamaktadır.

## 1.1 Projenin Önemi

Süzgeç devreleri pek çok elektronik sistemde işaretin frekans spektrumunu düzenlemek ve biçimlendirmek için kullanılmaktadır. Özellikle haberleşme sistemlerinde büyük bir kullanım alanı vardır. Aktif süzgeç devreleri tasarımcıya sunmuş oldukları avantajlardan dolayı tercih edilir.

## 1.2 Elektronik Süzgeç Sınıfları

Süzgeçleri sınıflandırmada iki ana unsur önemlidir ve bu sınıflar altında alt gruplara bölünebilir. Bu sınıfları süzgeç oluşturduğumuz devre elemanları ve çalışma şekilleri olarak adlandırabiliriz.

Aşağıdaki tabloda da belirtildiği üzere süzgeçler gerçekleştirildiği devre elemanlarına göre pasif süzgeçler ve aktif süzgeçler olmak üzere iki grupta incelenebilir. Pasif süzgeçler; direnç, kondansatör ve bobin gibi temel devre elemanlarıyla oluşturulurken aktif süzgeçlerde ayrıca, güç kaynağı, op-amp veya mikroişlemci olan devreler olarak ayrıştırılır.

Sınıflandırmada belirtilen çalışma şekillerine göre olan süzgeçler; belirli bir frekansın altındaki sinyali geçirenler alçak geçiren, sinyalin belirli frekansın üzerindeki geçirenler yüksek geçiren, sinyalin belli bir frekans aralığını geçiren

bant geçiren ve belirli frekans aralığını geçirmeyenlerde bant söndüren süzgeçler olarak adlandırılır.

Bu sınıflandırmayı tablo haline getirelim

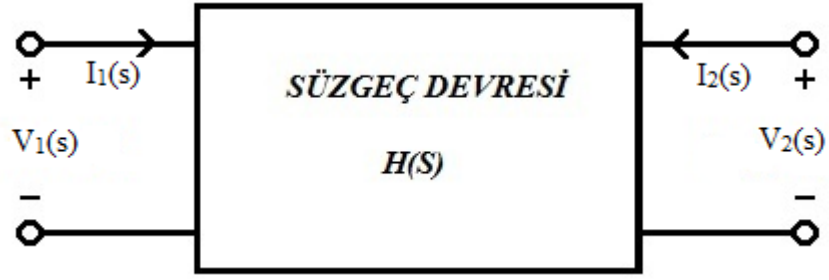
Tablo 1.1 Süzgeç Sınıfları

Süzgeç Sınıflandırması						
Oluşturulan Devre Elemanlarına Göre		Çalışma Prensiplerine Göre				
Pasif Süzgeç	Aktif Süzgeç	Alçak Geçiren Süzgeç	Yüksek Geçiren Süzgeç	Bant Geçiren Süzgeç	Bant Söndüren Süzgeç	Tüm Geçiren Süzgeç

### 1.3 Genel Süzgeç Tanımı:

Elektriksel işaretin frekans spektrumuna biçim vermekte kullanılan devreye süzgeç denir. Elektronik süzgeçler birçok cihazda, özellikle uydu ve haberleşme sistemlerinde, askeri alanlarda, sinyalin işlenmesi ile uygulanmakta ve birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Süzgeçlerin sağladığı en büyük avantajlardan biri sinyalin iletiminde ortaya çıkan; çevresel ve dışsal etkenlerin yanı sıra kullanılan devre elemanlarının da sebep olabileceği, sinyaldeki istenmeyen kısımların süzülebilmesinin sağlanmasıdır. (Dindar, 2013).

En genel anlamda iki uçlu bir sistemde örnek bir süzgeç devresinin gösterimi Şekil 1.1’de verilmiştir.



**Şekil 1-1:** Genel süzgeç devresinin gösterimi

Şekil 1.1’de gösterilen genel süzgeç yapısında  $H(s)$  süzgecin transfer fonksiyonu olarak adlandırılır ve giriş çıkış işaretleri arasındaki ilişkiyi ifade eder. Transfer fonksiyonu giriş ve çıkış işaretlerine göre isimlendirilir. Buna göre denklem (1.1.a) transfer empedans fonksiyonu, denklem (1.1.b) transfer admitans fonksiyonu, denklem (1.1.c) gerilim transfer fonksiyonu ve denklem (1.1.d) akım transfer fonksiyonu olarak tanımlanır.

$$Z_{21}(s) = \frac{V_2(s)}{I_1(s)} \quad (1.1.a)$$

$$Y_{21}(s) = \frac{I_2(s)}{V_1(s)} \quad (1.1.b)$$

$$G_{21}(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} \quad (1.1.c)$$

$$\alpha_{21}(s) = \frac{I_2(s)}{I_1(s)} \quad (1.1.d)$$

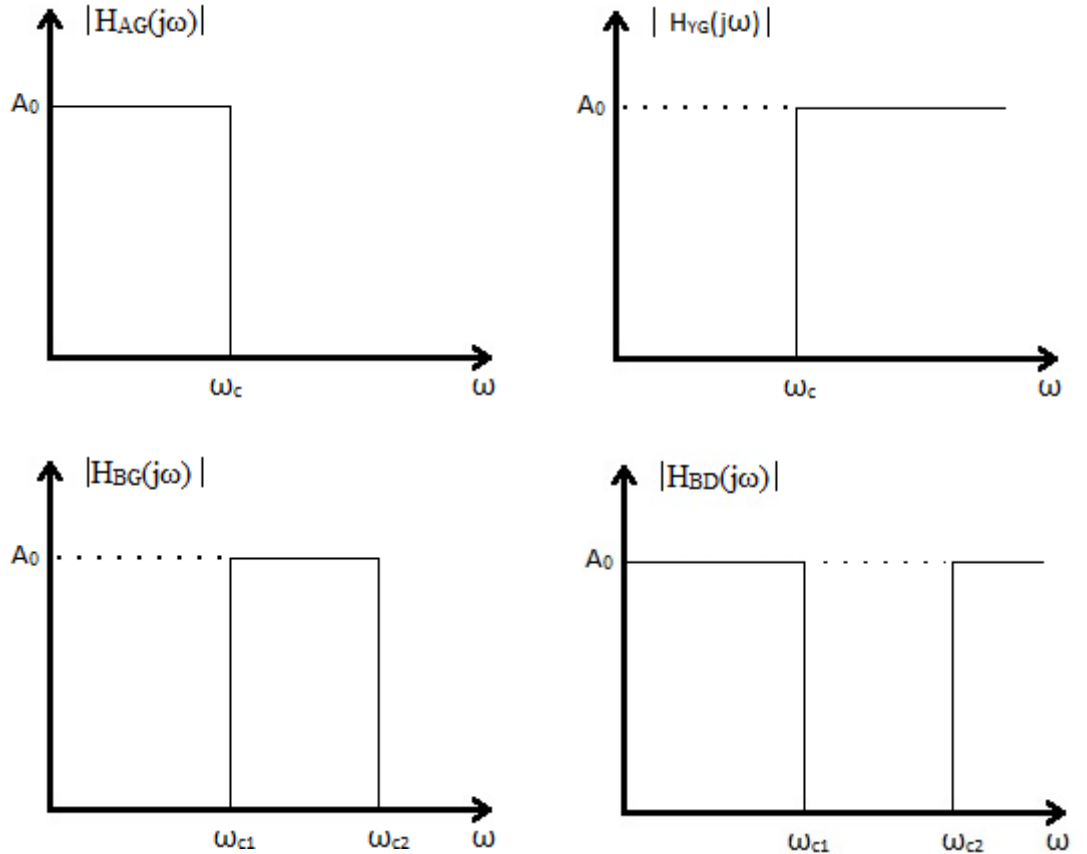
Devre fonksiyonu devre analizinde devrenin herhangi bir uyarıya ilişkin akışının bulunmasını, devre sentezinde ise davranışı bir devre fonksiyonu ile belirlenmiş devrenin elde edilmesini sağlar.

Bir devrede birden fazla giriş ve çıkış olabilir. Akım kaynağı açık, gerilim kaynağı kısa devre yapılarak diğer giriş ve çıkışlar sıfırlanabilir. Birden fazla giriş

varsa devre fonksiyonu bir giriş çıkış çifti arasında tanımlanır. Bu sırada diğer girişler sıfır alınır (Anday, 1993).

#### 1.4 Süzgeç Türleri

Süzgeç devreleri çalışma şekillerine göre farklı başlıklar altında gruplandırılır. Bu başlıklar; belirli bir frekansın altındaki sinyali geçirenler alçak geçiren süzgeçler, sinyalin belirli bir frekansın üzerindeki geçirenler yüksek geçiren süzgeçler, sinyalin belli bir frekans aralığını geçiren bant geçiren süzgeçler ve belli bir frekans aralığını geçirmeyenlerde bant söndüren süzgeçler olarak adlandırılır. Bu dört süzgeç tipinin 'ideal' genlik cevaplarına ait grafiksel gösterimler şekil 1.2'de verilmiştir. Ayrıca tüm geçiren süzgeçlerde mevcuttur. (Dindar, 2013)



Şekil 1-2 (a) Alçak geçiren süzgeç frekans cevabı

(b) Yüksek geçiren süzgeç frekans cevabı

(c) Bant geçiren süzgeç frekans cevabı

**(d) Bant durduran süzgeç frekans cevabı**

Bir süzgecin girişte uygulanan işaretin frekansını tam olarak geçirdiği bölgeye geçirme bandı, işaretin frekansını iletmeyip durduğu bölgeye ise durdurma (söndürme) bandı denir.



## 2. BİRİNCİ DERCEDEDEN SÜZGEÇLER

Elektriksel işaretin frekans spektrumuna biçim vermekte kullanılan süzgeç devreleri kendi içersinde türleri olduğunu belirtmiştik. Aktif ve pasif süzgeçler kullanım amaçlarına ve kullanım gereksinimlerine göre tasarımcının dizaynına göre belirlenir.

Frekans değeri 100 kHz altında olan elektronik devrelerde genel olarak pasif süzgeçler basit bir RC (Direnç Kondansatör) devresinden oluşmaktadır. Frekans değeri 100 kHz üstünde olan elektronik devrelerde ise genellikle direnç, kondansatör ve bobin içeren devre elemanları kullanılır. (RLC Devresi).

Pasif süzgeçlerin aktif süzgeçlere göre en büyük dezavantajı çıkış sinyalinin genliğinin, giriş sinyalinin genliğinden küçük olmasıdır. Aktif süzgeçlerin tercih edilmesinin en büyük nedenleri ise şu şekilde sıralanabilir (Alkan, 2017).

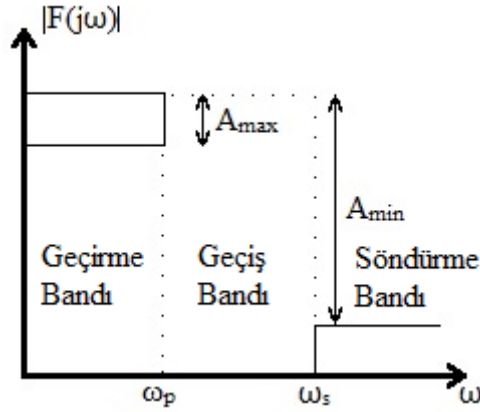
1. Bir devrenin transfer fonksiyonu indüktif bir karakteristiğe sahip ise, özel devre elemanları ile yapılabilmesi mümkün olacağı için, indüktanslar yerine devrede dirençler kullanılabilir.
2. İşlemsel kuvvetlendiricinin karakteristik yapısından kaynaklanan yüksek giriş empedansı ve düşük çıkış empedansı süzgeç devresinde mükemmel bir izolasyon sağlar. Ayrıca aktif süzgeçlerde kullanılan işlemsel yükselteçler sayesinde devreler kas kat bağlanabilir.
3. Aktif elemanları sayesinde süzgeç devresi girişine uygulanan sinyalde kazanç olur, bu sayede aktif süzgeçler kazançta sahiptirler.

Süzgeçler sisteme uygulanan frekanslardan yalnız istenilenlerin geçirilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Transfer fonksiyonu  $G(s)$  olan bir devre  $u(t) = \sin\omega t$  sinüzoidal fonksiyonu ile uyarılsa sürekli hal çıkışı  $y(t)$ , denklemin 2.1'deki gibi olur.

$$y(t) = |G(j\omega)|\sin[\omega t + \varphi(\omega)] \quad (2.1)$$

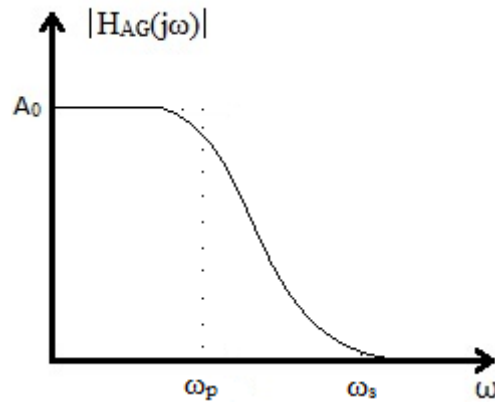
Burada  $|G(j\omega)|$  ve  $\varphi(\omega)$  sırasıyla transfer fonksiyonunu genlik ve fazını göstermektedir.

Şekil (2.1)'de alçak geçiren süzgeç ideal karakteristiği görülmektedir.



Şekil 2-3: Alçak geçiren süzgeç ideal karakteristiği

Geçirme bandındaki maksimum zayıflama  $A_{max}$  dB, söndürme bandındaki minimum zayıflama ise  $A_{min}$  dB olmak üzere  $\omega_p$ ,  $\omega_s$ ,  $A_{max}$  ve  $A_{min}$  parametreleri şekildeki karakteristiği tam olarak tanımlar. Burada  $\omega_p$  kesim frekansı,  $\omega_s$  ise söndürme köşe frekansı olarak adlandırılır. İdeal süzgeç karakteristiği tüm ideal süzgeç karakteristiklerinde olduğu gibi, bir frekans bandında ( $\omega > \omega_p$ )  $|G(j\omega)| = 0$  olması nedeniyle, fiziksel devrelerle gerçekleştirilemez.



Şekil 2-4: Alçak geçiren süzgeç genlik cevabı

Şekil 2.2’de görüldüğü üzere düşük frekanslarda gerilim değeri nerdeyse hiç azalmaz kesim frekansından sonra ise düşüş hızlı bir şekilde başlar. Söndürme köşe frekansı noktasından sonra ise geçiş olmaz.

Aşağıda alçak geçiren, yüksek geçiren ve tüm geçiren süzgeçlere ait transfer fonksiyonları denklem (2.2)’de görülmektedir.

$$F_{AG}(s) = \frac{\omega_0}{s + \omega_0} \quad (\text{Alçak geçiren süzgeç})$$

$$F_{YG}(s) = \frac{s}{s + \omega_0} \quad (\text{Yüksek geçiren süzgeç}) \quad (2.2)$$

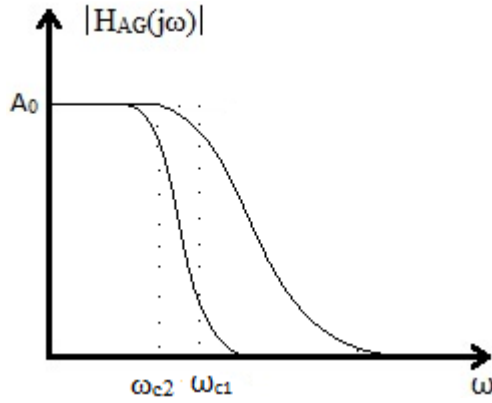
$$F_{TG}(s) = \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (\text{Tüm geçiren süzgeç})$$

Denklem (2.2)’de görüldüğü üzere payda yer alan  $s$  ‘in derecesi süzgeç devresinin derecesini belirtmektedir.

### 3. İKİNCİ DERECEDEN SÜZGEÇLER

Süzgeç devreleri tasarlanırken, elektriksel işaretin frekans spektrumuna istenilen şekli veya biçimi verebilecek şekilde tasarlanır. Bu tip durumlarda birinci dereceden süzgeçler istenilen çıkış sinyalinin oluşturulabilmesi için yeterli olmayabilir ve bu durumda derece olarak daha üst kademelerde süzgeç devreleri tasarlanır. İkinci dereceden bir süzgeç iki adet birinci dereceden süzgecin art arda bağlanmasıyla oluşturulabilir.

Şekil (3.1)'de birinci ve ikinci derece alçak geçiren filtrelerin genlik cevapları görülmektedir.



Şekil 3-5: 1. ve 2. Derece süzgeçlerin genlik cevabı

Şekil (3.1)'de görüldüğü üzere ikinci dereceden alçak geçiren devrenin kesim frekansının birinci dereceden alçak geçiren devreye göre daha küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca grafikten de anlaşılacağı üzere ikinci dereceden alçak geçiren devrelerin kesimlerinin, birinci dereceden alçak geçiren devrelere göre frekans bandında çok daha az aralıkta gerçekleştiği görülmektedir. (Alkan, 2017)

İstenilen çıkış sinyali için kullanılan devre elemanlarına göre, farklı kombinasyonlarda, farklı derecelerde farklı türlerde süzgeç devreleri tasarlanabilir.

İkinci dereceden süzgeçlere ait transfer fonksiyonları ise şu şekildedir.

$$F_{AG}(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (\text{Alçak geçiren süzgeç})$$

$$F_{YG}(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (\text{Yüksek geçiren süzgeç})$$

$$F_{BG}(s) = \frac{\frac{\omega_0}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (\text{Bant geçiren süzgeç}) \quad (3.1)$$

$$F_{BS}(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (\text{Bant söndüren süzgeç})$$

$$F_{TG}(s) = \frac{s^2 - \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (\text{Tüm geçiren süzgeç})$$

## 4. YÜKSEK DERECEDEDEN SÜZGEÇLER

### 4.1 Yüksek Dereceden Süzgeçler

Transfer fonksiyonu  $H_1(s)$  olan bir süzgeç devresi ile transfer fonksiyonu  $H_2(s)$  olan bir süzgeç devresinin art arda bağlanmaları durumunda oluşturulan yeni devrede süzgeç transfer fonksiyonu  $H(s) = H_1(s)H_2(s)$  olacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ise, yeni oluşturulacak devrenin gerçekleştirilebilmesi için yani bu çarpımın gerçekleşebilmesi için art arda bağlamanın  $H(s)$ 'i veren süzgecin transfer fonksiyonunu etkilememesi gerekir. Bu tipte etkilenmeleri engellemek amacıyla süzgeç devreleri arasına bir tampon (buffer) devrenin koyulması gerekir.

### 4.2 Yüksek Dereceden Alçak Geçiren Butterworth Transfer Fonksiyonlarının Gerçeklenmesi

Denklem (4.1)'de üçüncü dereceden bir Butterworth transfer fonksiyonu görülmektedir.

$$H(s) = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \quad (4.1)$$

Üçüncü dereceden bu denklemin paydasını çarpanlarına ayırırsak fonksiyon denklem (4.2)'de hale gelecektir.

$$H(s) = \frac{1}{(s + 1)(s^2 + 2s + 1)} \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'den iki adet transfer fonksiyonu elde edilir.

$$H_1(s) = \frac{1}{s+1} \quad (4.3)$$

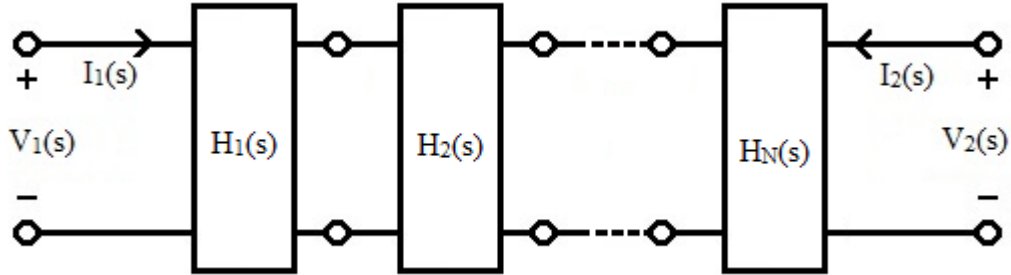
$$H_2(s) = \frac{1}{s^2+s+1} \quad (4.4)$$

Denklem (4.3) ve (4.4) denklem (4.5)'de görüldüğü gibi ifade edilebilir.

$$H(s) = H_1(s)H_2(s) \quad (4.5)$$

Denklem (4.5) ifadesi transfer fonksiyonu  $H(s)$  olan bir süzgecin 1. ve 2. dereceden iki süzgecin art arda bağlanarak gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.

Şekil (4.1)'de yüksek dereceden süzgeç devresinin birbirleriyle bağlantısı gösterilmiştir.



**Şekil 4-6:** Yüksek dereceden süzgeç oluşturulması

Şekil (4.1)'de görüldüğü üzere farklı derecelerde süzgeç devrelerinin art arda bağlanmaları sonucu yeni bir süzgeç devresi oluşturulması belirtilmiştir. Bu süzgeç devresi istenilen özelliklere göre yüksek dereceden bir süzgeç devresi olur, dikkat edilmesi gereken nokta ise oluşturulan süzgeç devresi, kendini oluşturan daha alt derecedeki süzgeç devrelerinin birbirlerini olumsuz olarak etkilemelerinin önlenmesidir.

Daha yüksek derecede oluşturulan süzgeç devrelerinin transfer fonksiyonları kendini oluşturan alt derece süzgeç devrelerinin transfer fonksiyonlarının çarpımına eşittir.

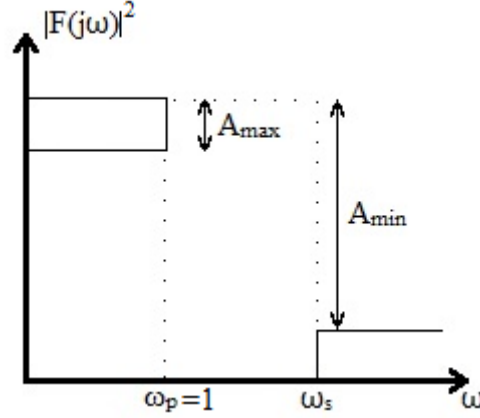
Denklem (4.6)'da N tane süzgeç devresinin bir araya getirilmesiyle elde edilen süzgeç devresinin transfer fonksiyonu verilmiştir.

$$H(s) = H_1(s)H_2(s) \dots H_N(s) \quad (4.6)$$



## 5. YAKLAŞIKLIK SORUNU

Süzgeç yaklaşımındaki amaç tasarlanacak süzgecin çıkış karakteristiğinin olabildiğince ideal duruma yakın elde edilmesidir. Geçirme ve söndürme bantlarına ilişkin tolerans sınırları içinde kalması istenen frekans karakteristiklerini sağlayan sistem fonksiyonlarının elde edilmesi ‘yaklaşıklık sorunu’ nu oluşturur. Frekans dönüşümlerinden yararlanarak yüksek geçiren, bant geçiren (ya da bant söndüren) süzgeç karakteristiklerinin elde edilebilmesi nedeniyle, yaklaşıklık sorunu yalnız alçak geçiren türden karakteristik için ele alınır. (Anday, 1997)



Şekil 5-7: Normalleştirilmiş süzgeç karakteristiği

Şekildeki normalleştirilmiş  $|F(j\omega)|^2 - \omega$  karakteristiği uyarınca, aranan fonksiyon  $0 \leq \omega < 1$  için 1'e;  $\omega > \omega_s$  için de 0'a yaklaşmalıdır. Bu koşulları sağlayacak şekilde seçilen fonksiyonların biçimlerine göre çeşitli yaklaşıklık türleri ortaya çıkar.

Şekilde görüldüğü üzere;  $\omega_p$  geçiş bandı frekansı,  $\omega_s$  durdurma frekansı,  $A_{max}$  geçiş bandında izin verilen en fazla zayıflama değeri,  $A_{min}$  durdurma bandında izin verilen en düşük zayıflama değeri olarak tanımlanmaktadır.

Bir süzgeç devresi tasarımında kullanılan yaklaşım belirlenirken her yöntemin kendine özgü kapalı form denklemleri göz önüne alınarak, istenen özelliklere uygun olarak seçim yapılır. Tüm bu yaklaşım seçimleri için belirlenen

denklemlerde  $\omega_p, \omega_s, A_{max}$  ve  $A_{min}$  kullanılarak süzgeç devresi tasarlanır.(Dindar, 2013)

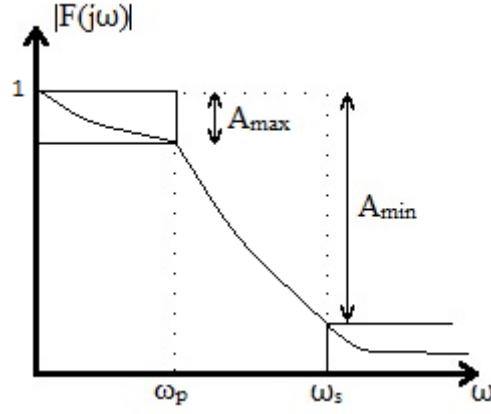
Süzgeç tasarımında en yaygın kullanılan yaklaşımlar şunlardır:

### 5.1 Butterworth Yaklaşımı

1930 yılında S. Butterworth tarafından ortaya atılan Butterworth filtre yaklaşımında  $|F(j\omega)|^2 = 1/(1 + \omega^{2n})$  fonksiyonu Butterworth fonksiyonu olarak adlandırılır. Bu yaklaşım yönteminde, tasarlanacak süzgeç genlik cevabının iletim bandında en yüksek doğrusallığa sahip olması istenmektedir. N. dereceden bir Butterworth süzgecin genlik cevabı denklem (5.1)'de gösterilmiştir. (Sedra ve Smith, 1998)

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2N}}} \quad (5.1)$$
$$\varepsilon = \sqrt{10^{A_{max}/20} - 1}$$

Bu yaklaşıklık sonucunda elde edilen payda polinomuna 'Butterworth polinomu', fonksiyona ilişkin olarak da elde edilen devreye de 'Butterworth süzgeci' denmektedir. Bu yaklaşıklık geçirme ve söndürme bantlarındaki tolerans sınırlarından yararlanarak n parametresinin bulunmasını gerektirmektedir. Bu parametre, n büyüdükçe gerek geçirme gerekse söndürme bantlarındaki yaklaşıklık iyileşmektedir.



**Şekil 5-8:** Normalize Butterworth yaklaşığı

Şekil (5.2)'de görüldüğü gibi genlik değeri 1 ve  $\omega_p = 1 \text{ rad/sn}$  köşe frekansına sahip genlik karakteristiğine normalize,  $\{|F(j\omega), \omega\}$  karakteristiği denir.

Butterworth yaklaşıklığı için genlik ifadesi denklem (5.2)'deki gibidir.

$$|F(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^{2n}}} \quad (5.2)$$

Şekil (5.2)'de karakteristikte yer alan  $A_{max}$ ,  $A_{min}$ ,  $\omega_p$  ve  $\omega_s$  değerlerinden yararlanılarak verilen karakteristiği sağlayan  $\theta(s)$  Butterworth polinomun belirlenir. Butterworth polinomları kullanılarak elde edilen süzgeçlere Butterworth süzgeç denir.

Butterworth yaklaşıklarınının  $\omega_p = 1 \text{ rad/sn}$  için genlik düşümleri her zaman 3dB'dir. Denklem (5.3)'de bu durum görülmektedir.

$$Kazanç = 20 \log |F(j\omega)| = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^{2n}}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (5.3)$$

$$Kazanç = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3dB$$

Butterworth polinomlarının  $\omega_p = 1 \text{ rad/sn}$  köşe frekansındaki zayıflaması hep 3 dB olduğu için, iletim bandı koşulu her n değeri için sağlanır.

Genelleştirilmiş Butterworth yaklaşıklığı ise iletim bandı köşe frekansındaki zayıflamanın 3dB'den farklı olduğu herhangi bir  $A_{max}$  değerinde olması durumunu ifade eder. Bu durumda iletim bandı köşe frekansı kriterinden denklem (5.4) elde edilir.

$$\varepsilon = 10^{0,1A_{max}} - 1 \quad (5.4)$$

Söndürme bandı köşe frekansı kriterinden denklem (5.5) elde edilir.

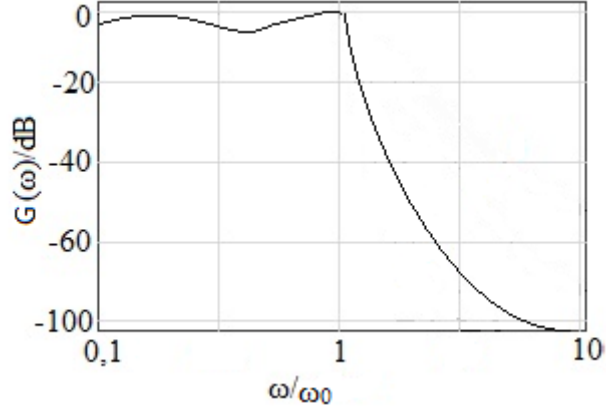
$$n = \frac{\log \left\{ \frac{10^{0,1A_{max}} - 1}{\varepsilon} \right\}}{2 \log \omega_s} \quad (5.5)$$

Denklem (5.5)'den bulunan n değerinden büyük ilk tamsayı derece olarak alınır ve buna karşılık gelen düşen  $\theta(s)$  butterworth polinomları tablosundan bakılarak elde edilir. Buradan denklem (5.6) elde edilir.

$$F(s) = \frac{1}{\theta(s)_{s=k}} \Big|, k = \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2n}} \quad (5.6)$$

## 5.2 Chebyshev Yaklaşımı

Bu yaklaşımda geçirme bandında süzgecin derecesine göre farklılık gösteren dalgalanmalar görülür. Chebyshev süzgeç yaklaşımı bu özelliği ile diğer türlerden ayrılır. Şekil 5.3'de Chebyshev süzgece ait genlik cevabı görülmektedir (Dindar, 2013)



**Şekil 5-9:** Chebyshev süzgece ait genlik cevabı

Chebyshev fonksiyonları yaklaşıklık teorisinde önemli rol oynarlar ve Chebyshev fonksiyonları aşağıda verilen rekürans bağıntısı kullanılarak hesaplanırlar.

$$\begin{aligned}
 C_0(\omega) &= 1 \\
 C_1(\omega) &= \omega \\
 C_N(\omega) &= 2\omega C_{N-1}(\omega) - C_{N-2}(\omega); \quad N \geq 2 \text{ için}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

İlk birkaç Chebyshev fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 N = 2 \text{ için;} \quad C_2(\omega) &= 2\omega C_1(\omega) - C_0(\omega) \\
 &\Rightarrow C_2(\omega) = 2\omega^2 - 1 \\
 N = 3 \text{ için;} \quad C_3(\omega) &= 2\omega C_2(\omega) - C_1(\omega) \\
 &\Rightarrow C_3(\omega) = 4\omega^3 - 3\omega \\
 N = 4 \text{ için;} \quad C_4(\omega) &= 2\omega C_3(\omega) - C_2(\omega) \\
 &\Rightarrow C_4(\omega) = 8\omega^4 - 8\omega^2 + 1 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

$\omega = 0$  frekansında Chebyshev fonksiyonları denklem (5.6)'da görüldüğü gibi olur.

$$\begin{aligned} N \text{ tek ise } C_N(0) &= 0 \\ N \text{ çift ise } C_N(0) &= \mp 1 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Butterworth iletim bandından, normal Chebyshev ise iletim bandında dercesine göre ripple oluşturur. Ripple'lar söndürme bandında ise invers Chebyshev denir. Hem iletim hem söndürme bandında ise eliptic Chebyshev denir.

Chebyshev yaklaşıklığında yaklaşım fonksiyonu denklem (5.7)'de görüldüğü gibidir.

$$|F(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon_c^2 C_N^2(\omega)}} \quad (5.7)$$

İletim bandındaki dalgacık sayısı ise;

$$\begin{aligned} N \text{ çift} &\Rightarrow \text{Dalgacık Sayısı} = \frac{N}{2} \\ N \text{ tek} &\Rightarrow \text{Dalgacık Sayısı} = \frac{N+1}{2} \end{aligned} \quad (5.8)$$

İletim bandı dalgacık genişliği  $A_{max}$  dB olarak verilmiş olduğunda

$$A_{max} = 20 \log_{(\omega=1)} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon_c^2 C(\omega)_N^2}} \right] \quad (5.9)$$

$$A_{max} = 20 \log \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon_c^2}} \right]$$

$$\Rightarrow \varepsilon_c = \sqrt{10^{0,1A_{max}} - 1}$$

Süzgeç derecesi  $N$ 'yi belirlemek için denklem (5.10) kullanılır.

$$A_{min} \leq 20 \log_{(\omega=\omega_s)} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon_c^2 C(\omega)_N^2}} \right]$$

$$C_N(\omega_s) \geq \sqrt{\frac{10^{0,1A_{min}} - 1}{\varepsilon_c^2}}$$
(5.10)

Son yazılan eşitsizliği sağlayan ilk Chebyshev fonksiyonunun derecesi  $N$ , transfer fonksiyonunun derecesi olarak alınabilir.

Derecesi belirlenen  $F_{AG_C}(s)$  transfer fonksiyonunun  $s_k$  kutupları denklem (5.11)'de görüldüğü gibi hesaplanır.

$$s_k = \sigma_k + j\omega_k; \quad k = 1, 2, \dots, 2N$$

$$\sigma_k = -\sin \left[ \frac{2k-1}{2N} \pi \right] \sinh \left[ \frac{1}{N} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon_c} \right) \right]$$

$$\omega_k = \cos \left[ \frac{2k-1}{2N} \pi \right] \cosh \left[ \frac{1}{N} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon_c} \right) \right]$$
(5.10)

Hesaplanan bu köklerden sadece sol yarı düzlemde olanlar alınarak  $F_{AG_C}(s)$  transfer fonksiyonu oluşturulur.

$$F_{AGC}(s) = \frac{K(-1)^N (s_1) \cdot (s_2) \cdot (s_3) \cdot \dots \cdot (s_N)}{(s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) \cdot \dots \cdot (s - s_N)}$$

$$N = \text{tek} \Rightarrow K = 1 \quad (5.11)$$

$$N = \text{çift} \Rightarrow K = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon_c^2}}$$

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak her seferinde aynı kökleri hesaplama zahmetinden kurtulmak için farklı  $\varepsilon$  değerlerine karşılık gelen Chebyshev tabloları kullanılır.

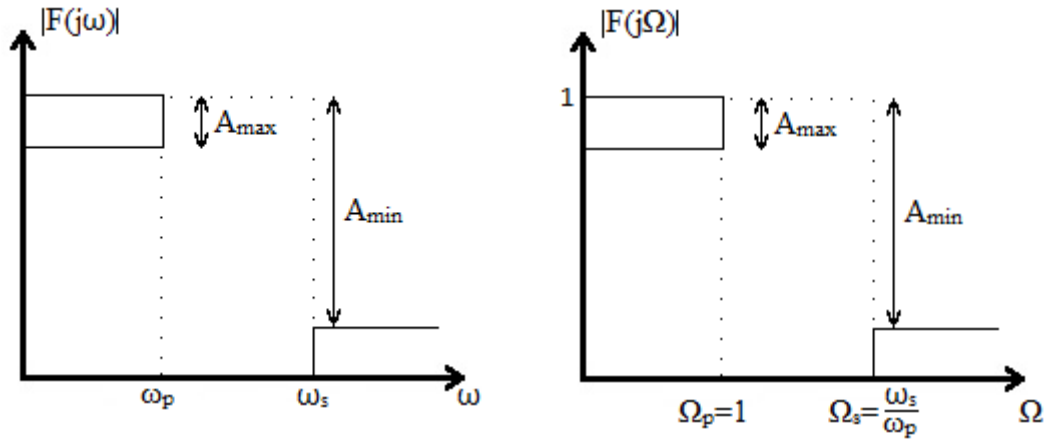


## 6. FREKANS DÖNÜŞÜMLERİ

Yaklaşıklık sorunu doğrudan doğruya alçak geçiren süzgeç karakteristiklerinde ele alınır. Frekans dönüşümleri ile yüksek geçiren, bant geçiren ve bant söndüren süzgeçlere nasıl uygulanacağı incelenecektir. Bu amaçla önce, frekans dönüşümlerinden yararlanılarak verilen yüksek geçiren, bant geçiren ya da bant söndüren süzgeçlerin karakteristiklerden alçak geçiren süzgeç karakteristiğine nasıl geçileceği incelenecektir. Önceki bölümde açıklanan yaklaşıklık yöntemleri uyarınca alçak geçiren süzgeç fonksiyonu elde edilerek yüksek geçiren, bant geçiren ya da bant söndüren süzgeç yaklaşık fonksiyonlarına dönüşü sağlanacaktır

### 6.1 Alçak Geçiren Süzgeç – Alçak Geçiren Süzgeç Dönüşümü:

Alçak geçiren süzgeç karakteristiği köşe frekansı  $\omega_p > 1$  rad/sn ise köşe frekansı 1 rad/sn olacak şekilde alçak geçiren süzgeç dönüşümü yapılır.



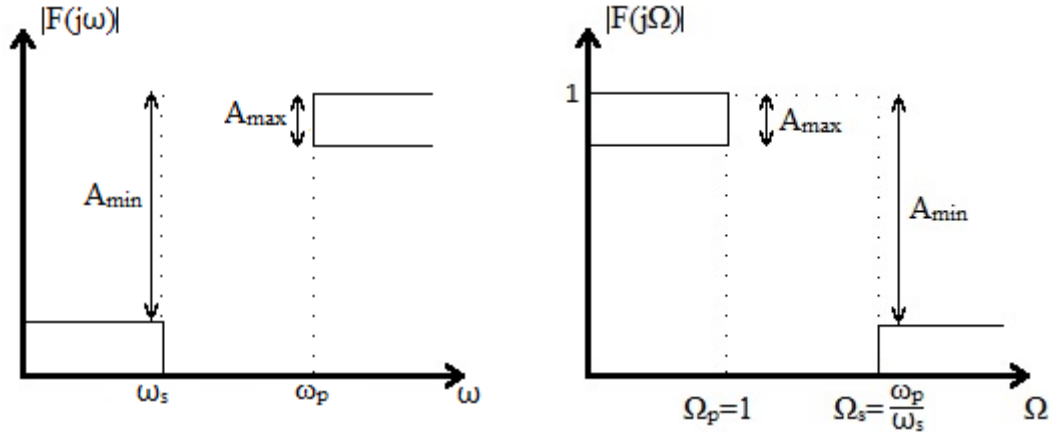
**Şekil 6-10:** Alçak geçiren süzgeç – Alçak geçiren süzgeç dönüşümü

Gerçekleştirilmek istenen alçak geçiren süzgeç karakteristiğinin köşe frekansı  $\omega_p > 1$  rad/sn ise denklem (6.1)'deki dönüşüm gerçekleştirilir.

$$F_{AG}(s) = F_{AG}(p)_{p|\frac{s}{\omega_p}} \quad (6.1)$$

## 6.2 Yüksek Geçiren Süzgeç – Alçak Geçiren Süzgeç Dönüşümü:

Yüksek geçiren süzgeç karakteristiği öncelikle alçak geçiren süzgeç karakteristiğine dönüştürülür. Süzgeç fonksiyonu bulunduktan sonra ters dönüşüm yapılarak tekrar yüksek geçiren fonksiyonları elde edilir.



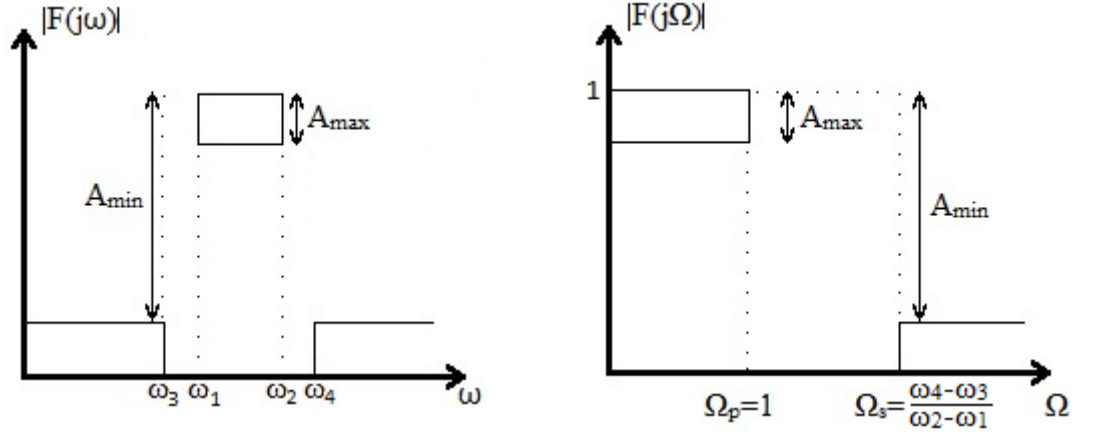
Şekil 6-11: Yüksek geçiren süzgeç - Alçak geçiren süzgeç dönüşümü

Yüksek geçiren süzgeç fonksiyonunun  $\omega_p$  geçirme bandı köşe frekansı olmak üzere  $p = \frac{\omega_p}{s}$  frekans dönüşüm fonksiyonu ile alçak geçiren türden bir fonksiyona dönüştürülebilir. Genlik karakteristiğinin orijine göre simetrik olması nedeniyle pozitif eksenler birbirine karşılık düşürülür. Bu durumda dönüşüm denklem (6.2)'de görüldüğü gibidir.

$$F_{YG}(s) = F_{AG}(p)_{p|\frac{\omega_p}{s}} \quad (6.2)$$

## 6.3 Bant Geçiren Süzgeç – Alçak Geçiren Süzgeç Dönüşümü:

Bant geçiren süzgeç karakteristiği öncelikle alçak geçiren süzgeç karakteristiğine dönüştürülür. Süzgeç fonksiyonu bulunduktan sonra ters dönüşüm yapılarak tekrar bant geçiren fonksiyonları elde edilir.



**Şekil 6-12:** Bant geçiren süzgeç – Alçak geçiren süzgeç dönüşümü

Burada simetrik türden bant geçiren süzgeçler ele alınmaktadır.

$$\omega_3 \cdot \omega_4 = \omega_1 \cdot \omega_2$$

$$\text{Merkez Frekansı; } \omega_0 = \sqrt{\omega_2 \cdot \omega_1} \quad (6.3)$$

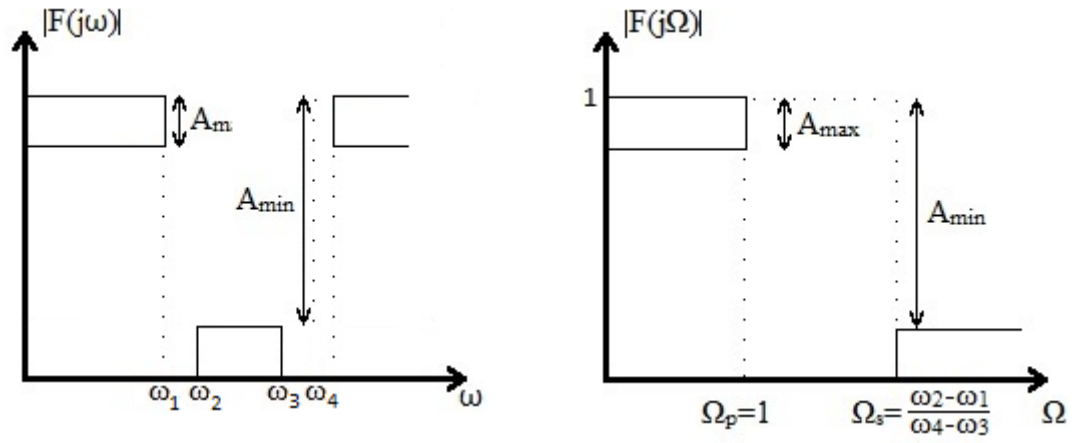
$$\text{Bant Genişliği; } B = \omega_2 - \omega_1$$

Bu durumda bant geçiren süzgeç karakteristiğinden alçak geçiren süzgeç karakteristiğine geçmek için denklem (6.4) kullanılır.

$$F_{BG}(s) = F_{AG}(p) \Big|_{p = \frac{s^2 + \omega_0^2}{Bs}} \quad (6.4)$$

#### 6.4 Bant Söndüren Süzgeç – Alçak Geçiren Süzgeç Dönüşümü:

Bant söndüren süzgeç karakteristiği öncelikle alçak geçiren süzgeç karakteristiğine dönüştürülür. Süzgeç fonksiyonu bulunduktan sonra ters dönüşüm yapılarak tekrar bant söndüren fonksiyonları elde edilir.



Şekil 6-13: Bant söndüren süzgeç – Alçak geçiren süzgeç dönüşümü

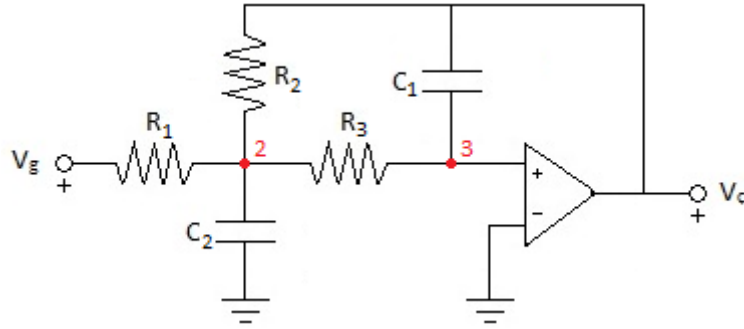
$$\begin{aligned} \text{Merkez Frekansı; } \omega_0 &= \sqrt{\omega_0 \cdot \omega_4} \\ \text{Bant Genişliği; } B &= \omega_2 - \omega_1 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Bu durumda bant söndüren süzgeç karakteristiğinden alçak geçiren süzgeç karakteristiğine geçmek için denklem (6.6) kullanılır.

$$F_{BS}(s) = F_{AG}(p) \Big|_{p = \frac{Bs}{s^2 + \omega_0^2}} \quad (6.6)$$

## 7. PROJE DEVRESİ

Şekil (7.1)'de devresi verilen ikinci dereceden alçak geçiren çoklu geri besleme (Multiple feedback: MFB) devresinin analizi yapılarak öncelikle gerilim transfer fonksiyonu belirlenebilir. Daha sonra süzgeç karakteristiğini sağlayan transfer fonksiyonu bulunup eleman değerleri belirlenerek pratiğe uygun hale getirilebilir.



Şekil 7-14: MFB (Multiple feedback) Süzgeç devresi

Devreye ait gerilim transfer fonksiyonunu belirlemek için ilk olarak  $d_2$  ve  $d_3$  düğümlerine ilişkin akım denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_{R1} + I_{C2} + I_{R2} + I_{R3} = 0 \quad (7.1)$$

$$I_{C1} - I_{R3} = 0 \quad (7.2)$$

Yukarıda verilen akım denklemleri düğüm gerilimlerine bağlı olarak ifade edilebilir.

$$G_1(V_{d2} - V_{d1}) + V_{d2}sC_2 + G_2(V_{d2} - V_c) + G_3(V_{d2} - V_{d3}) = 0 \quad (7.3)$$

$$(V_{d3} - V_c)sC_1 - G_3(V_{d2} - V_{d3}) = 0 \quad (7.4)$$

Denklem (7.3) ve (7.4) düğüm gerilimlerine göre yeniden düzenlenebilir. İşlemsel yükselteç tanımı gereği  $V_{d3} = 0$  alınabilir.

$$(G_1 + G_2 + G_3 + sC_2)V_{d2} - G_1V_{d1} - G_2V_{\zeta} = 0 \quad (7.5)$$

$$-G_3V_{d2} - sC_1V_{\zeta} = 0 \quad (7.6)$$

Denklem (7.6)'dan  $V_{d2}$  çekilerek elde edilen denklem (7.7) elde edilir. Bu sonuç denklem (7.8) görüldüğü üzere denklem (7.5)'de yerine yazılır.

$$V_{d2} = -\frac{sC_1}{G_3}V_{\zeta} \quad (7.7)$$

$$-\frac{sC_1}{G_3}V_{\zeta} \cdot (G_1 + G_2 + G_3 + sC_2) - G_1V_{d1} - G_2V_{\zeta} = 0 \quad (7.8)$$

Denklem (7.8)'de parantezler açılır.

$$-V_{\zeta} \cdot (sC_1 \cdot (G_1 + G_2 + G_3) + s^2C_1C_2) - G_1G_3V_{d1} - G_2G_3V_{\zeta} = 0 \quad (7.9)$$

$$V_{\zeta} \cdot (s^2C_1C_2 + sC_1 \cdot (G_1 + G_2 + G_3) + G_2G_3) = -G_1G_3V_{d1} \quad (7.10)$$

Denklem (7.9) ve (7.10)'dan giriş çıkış gerilimi çekilir. Elde edilen denklem (7.10)'da  $V_{d1} = V_g$  olarak düzenlenir.

$$\frac{V_{\zeta}}{V_g} = -\frac{G_1G_2}{s^2C_1C_2 + sC_1 \cdot (G_1 + G_2 + G_3) + G_2G_3} \quad (7.11)$$

Denklem (7.11)'de pay ve payda  $C_1C_2$  'ye bölünerek gerilim transfer fonksiyonu elde edilir.

$$\frac{V_{\zeta}}{V_g} = \frac{-\frac{G_1G_2}{C_1C_2}}{s^2 + s\frac{(G_1+G_2+G_3)}{C_2} + \frac{G_2G_3}{C_1C_2}} \quad (7.12)$$

Böylece devremizin gerilim transfer fonksiyonunu tespit ettik. Şimdi süzgeç devremizin karakteristiğini sağlayan transfer fonksiyonunu Chebyshev yaklaşıklığını kullanarak belirlenebilir.

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0,1 \times 1} - 1} = \sqrt{10^{0,1} - 1} = 0,5088 \quad (7.13)$$

$$\varepsilon = 0,5088$$

Burada  $\varepsilon$ ,  $A_{max}$  cinsinden bir parametre ve  $A_{max}$  geçiş bandında izin verilen maksimum zayıflama değeridir.

$$C_N(\omega_s) \geq \sqrt{\frac{10^{0,1} A_{min} - 1}{\varepsilon^2}} = \sqrt{\frac{10^{0,1 \times 32} - 1}{(0,5088)^2}} \quad (7.14)$$

$$C_N(\omega_s) \geq 78,2194$$

Denklem (7.14)'de  $\omega_s$  durdurma bandı frekansı ve  $N$  filtre derecesini ifade etmektedir. Burada  $N=2$  yani çifttir. Aşağıdaki tablo (7.1)'de yazılan değerlere göre eşitsizliği sağlayan ilk Chebyshev fonksiyonunun derecesi olarak alınabilir

**Tablo 7.1:** Chebyshev polinomları

N	$C_N(\Omega)$	$C_N(2)$	$C_N(2) \geq 78.2194$
0	1	1	X
1	$\Omega_s$	2	X
2	$2\Omega_s^2 - 1$	7	X
3	$4\Omega_s^2 - 3\Omega_s$	24	X
4	$8\Omega_s^4 - 8\Omega_s^2 + 1$	97	✓

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} \text{ ise } K = \frac{1}{\sqrt{0,5088^2}} = 0,89126 \text{ ( } N \text{ çift )} \quad (7.13)$$

Derecesi belirlenen  $F_{AGC}(s)$  transfer fonksiyonunun kutupları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sinh\left(\frac{1}{4} \sinh^{-1}\left(\frac{1}{0,5088}\right)\right) = 0,3646 \quad (7.14)$$

$$\cosh\left(\frac{1}{4} \sinh^{-1}\left(\frac{1}{0,5088}\right)\right) = 1,0644 \quad (7.15)$$

$$\sigma_k = -\sin\left(\frac{2k-1}{8}\pi\right) 0,3646 \quad (7.16)$$

$$\omega_k = \cos\left(\frac{2k-1}{8}\pi\right) 1,0644 \quad (7.17)$$

Denklem (7.14), (7.15), (7.16) ve (7.17) değerleri kullanarak sırasıyla kutuplar bulunur.

k=1,2,3,4 için değerleri bulalım

➤ k=1 için kutup noktalarımızı hesaplayalım

$$\sigma_1 = \sin\left(\frac{1}{8}\pi\right) \times 0,3646 = -0,1395 \quad (7.18)$$

$$\omega_1 = \cos\left(\frac{1}{8}\pi\right) \times 1,0644 = 0,9834 \quad (7.19)$$

Denklem (7.18) ve (7.19)'da bulunan değerlere göre denklem (7.20)'de birinci kutup belirlenir.

$$s_1 = 0,1395 + j0,9834 \quad (7.20)$$

Denklem (7.20)'de elde edilen bu sonuç s düzleminin sol tarafında olduğundan kabul edilir.

➤ k=2 için kutup noktalarımızı hesaplayalım



$$\sigma_2 = \sin\left(\frac{3}{8}\pi\right) 0,3646 = -0,3368 \quad (7.21)$$

$$\omega_2 = \cos\left(\frac{3}{8}\pi\right) 1,0644 = 0,4073 \quad (7.22)$$

Denklem (7.21) ve (7.22)'de bulunan değerlere göre denklem (7.23)'de ikinci kutup belirlenir.

$$s_2 = -0,3368 + j0,4073 \checkmark \quad (7.23)$$

Denklem (7.23)'de elde edilen bu sonuç s düzleminin sol tarafında olduğundan kabul edilir.

➤ k=3 için kutup noktalarımızı hesaplayalım

$$\sigma_3 = \sin\left(\frac{5}{8}\pi\right) \times 0,3646 = -0,3368 \quad (7.24)$$

$$\omega_3 = \cos\left(\frac{5}{8}\pi\right) \times 1,0644 = -0,4073 \quad (7.25)$$

Denklem (7.24) ve (7.25)'de bulunan değerlere göre denklem (7.26)'de üçüncü kutup belirlenir.

$$s_3 = -0,3368 - j0,4073 \checkmark \quad (7.26)$$

Denklem (7.26)'da elde edilen bu sonuç s düzleminin sol tarafında olduğundan kabul edilir.

➤ k=4 için kutup noktalarımızı hesaplayalım

$$\sigma_4 = \sin\left(\frac{7}{8}\pi\right) \times 0,3646 = -0,1395 \quad (7.27)$$

$$\omega_4 = \sin\left(\frac{7}{8}\pi\right) \times 1,0644 = -0,9834 \quad (7.28)$$

Denklem (7.27) ve (7.28)'de bulunan değerlere göre denklem (7.29)'da dördüncü kutup belirlenir.

$$s_4 = -0,1395 - j0,9834 \checkmark \quad (7.29)$$

Denklem (7.26)'da elde edilen bu sonuç s düzleminin sol tarafında olduğundan kabul edilir.

Hesaplanan bu kökler alınarak  $F_{AGC}(s)$  transfer fonksiyonu oluşturulur.

$$Q_1(s) = (s - s_1)(s - s_4) = s^2 - ss_4 - ss_1 + s_1s_4 \quad (7.30)$$

$$Q_1(s) = s^2 - s(s_1 + s_4) + s_1s_4 \quad (7.31)$$

Denklem (7.30) ve denklem (7.31) de denklem (7.20) ve denklem (7.29)'da elde edilen değerler yazılır.

$$Q_1(s) = s^2 - s(-2 \times 0,1395) + 0,1395^2 + 0,9834^2 \quad (7.32)$$

$$Q_1(s) = s^2 + s0,279 + 0,9865$$

İkinci kısım için aynı yol izlenir.

$$Q_2(s) = s^2 - s(s_2 + s_3) + s_2s_3 \quad (7.33)$$

Denklem (7.23) ve (7.26)'da elde edilen değerler yerlerine yazılır.

$$Q_2(s) = s^2 - s(-2 \times 0,3368) + 0,3368^2 + 0,4073^2 \quad (7.34)$$

$$Q_2(s) = s^2 + s0,6736 + 0,2793$$

$$F_{AG_c}(s) = \frac{K(-1)^N s_1 s_4 s_2 s_3}{(s - s_1)(s - s_4)(s - s_2)(s - s_3)} \quad (7.35)$$

$$F_{AG_c}(s) = \frac{0,89126 \times 0,9865 \times 0,2793}{(s^2 + s0,279 + 0,9865) \times (s^2 + 0,6736 + 02793)} \quad (7.36)$$

Denklem (7.36)'da gerekli sadeleştirmeler yapılır

$$F_{AG_c}(p) = \frac{0,2456}{p^4 + 0,9526p^3 + 1,4537p^2 + 0,7424p + 0,2755} \quad (7.37)$$

Yukarıda verilen ve normalize alçak geçiren transfer fonksiyonunu temsil eden fonksiyon  $p = j\Omega$  ortamında tanımlı olduğu için aşağıdaki değişken dönüşümü ile  $s = j\omega$  frekans ortamında tanımlı fonksiyon elde edilebilir.

$$F_{AG}(s) = F_{AG}(p)|_{p=\frac{s}{\omega_p}} \quad (7.38)$$

Bu durumda s-ortamında tanımlı alçak geçiren süzgeç fonksiyonu denklem (7.39) ile verildiği gibi olur.

$$F_{AG}(s) = \frac{0,89126 \times 0,9865}{\frac{s^2}{\omega_p^2} + \frac{s}{\omega_p} 0,279 + 0,9865} \times \frac{0,2793}{\frac{s^2}{\omega_p^2} + \frac{s}{\omega_p} 0,6736 + 0,2793} \quad (7.39)$$

Burada hem pay hem de payda  $\omega_p^4$  ile çarpıp  $\omega_p = 2 \times 10^4$  kullanılırsa denklem (7.40) ile verilen transfer fonksiyonu elde edilir.

$$F_{AG}(s) = \frac{0,89126 \times 393,4 \times 10^6}{s^2 + 5580s + 393,4 \times 10^6} \times \frac{111,72 \times 10^6}{s^2 + 13742s + 111,72 \times 10^6} \quad (7.40)$$

Elde edilen dördüncü dereceden transfer fonksiyonu ikinci dereceden iki adet devrenin kaskat bağlanması ile gerçekleştirilebilir.

$$F_{AG}(s) = F_{AG_1}(s) \times F_{AG_2}(s) \quad (7.41)$$

Birinci kat için:

$$F_{AG_1}(s) = \frac{393,4 \times 10^6}{s^2 + 5580s + 393,4 \times 10^6} \quad (7.42)$$

İkinci kat için:

$$F_{AG_2}(s) = \frac{111,72 \times 10^6}{s^2 + 13742s + 111,72 \times 10^6} \quad (7.43)$$

Denklem (7.42)'de elde ettiğimiz birinci kat transfer fonksiyonunu kullanarak pratikte uygulamak için eleman değerlerini belirleyelim.

$$\frac{G_{11}G_{13}}{C_{11}C_{12}} = 0,89126 \times 393,4 \times 10^6 \quad (7.44)$$

$$\frac{G_{12}G_{13}}{C_{11}C_{12}} = 393,4 \times 10^6 \quad (7.45)$$

$$\frac{G_{11} + G_{12} + G_{13}}{C_{12}} = 5580 \quad (7.46)$$

5 bilinmeyenli 3 denkleminiz var.  $C_{11}$  ve  $C_{12}$  değerlerini sabitleyerek diğer değerleri bulabiliriz. Belirlediğimiz bu değerlerin, elde ettiğimiz köklerin pozitif çıkması ile doğruluğunu anlayabiliriz.

Denklem (7.44), (7.45) ve (7.46) için  $\bar{C}_{11} = 1F$  ve  $\bar{C}_{12} = 110F$  keyfi değerlerini kullanarak tasarım eşitliklerini yeniden yazalım:

$$G_{11}G_{13} = 110 \times 0,89126 \times 393,4 \times 10^6 \quad (7.47)$$

$$G_{12}G_{13} = 110 \times 393,4 \times 10^6 \quad (7.48)$$

$$G_{11} + G_{12} + G_{13} = 110 \times 5580 = 613800 \quad (7.49)$$

Denklem (7.47) ile denklem (7.48)'i birbirine oranlayalım (7.48) denklemden  $G_3$  'ü çekelim ve (7.49) denkleminde ifadeyi  $G_2$  cinsinden yazalım.

$$\frac{G_{11}}{G_{12}} = 0,89126 \Rightarrow G_{11} = 0,89126G_{12} \quad (7.50)$$

$$G_{12}G_{13} = 43,27 \times 10^9 \Rightarrow G_{13} = \frac{43,27 \times 10^9}{G_{12}} \quad (7.51)$$

Elde edilen bu iki eşitliği denklem (7.49)'da yerine yazalım:

$$0,89G_{12} + G_{12} + \frac{43,27 \times 10^9}{G_{12}} = 613800$$

$$1,89G_{12} + \frac{43,27 \times 10^9}{G_{12}} = 613800 \quad (7.52)$$

$$G_{12}^2 - 324538,7G_{12} + 22,8784 \times 10^9 = 0$$

Son elde edilen ikinci dereceden denklemin köklerini belirlemek için öncelikle diskriminantını hesaplayalım:

$$\Delta = 1,3812 \times 10^{10} \Rightarrow \sqrt{\Delta} = 117523 \quad (7.53)$$

Denklem (7.53) bulduğumuz değeri kökler için kullanalım

$$G_{12,1,2} = \frac{324538,7 \mp 117523}{2} \quad (7.54)$$

$$G_{12_1} = 221031,10$$

$$G_{12_2} = 103507,85$$

Denklem (7.54) elde edilen her iki kök sonucunu da kullanabiliriz.  $G_{12_1}$ 'i kullanalım. Bu durumda iletkenlik değerleri:

$$G_{12} = 222031,1 S \Rightarrow R_{12} = 4,5243 \times 10^{-6} \Omega$$

$$G_{11} = 197005 S \Rightarrow R_{11} = 5,076 \times 10^{-6} \Omega$$

$$G_{13} = 195763,9 S \Rightarrow R_{13} = 5,108 \times 10^{-6} \Omega$$

Buradan elde ettiğimiz kapasite ve direnç değerleri denklem (7.55) ile verilen dönüşüm kullanılarak pratiğe uygun hale getirilebilir:

$$R = A \times \bar{R} \text{ ve } C = \frac{\bar{C}}{A} \quad (7.55)$$

Burada  $A=10^8$  kullanılarak birinci kat için eleman değerleri aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$R_{12} = 452,4 \Omega$$

$$R_{11} = 507,6 \Omega$$

$$R_{13} = 510,8 \Omega$$

$$C_{11} = 10nF$$

$$C_{12} = 1100nF$$

Şimdi aynı çözüm yoluyla devremizin 2. kısmını oluşturalım.

$$\frac{G_{21}G_{23}}{C_{21}C_{22}} = 111,72 \times 10^6 \quad (7.56)$$

$$\frac{G_{22}G_{23}}{C_{21}C_{22}} = 111,72 \times 10^6 \quad (7.57)$$

$$\frac{G_{21} + G_{22} + G_{23}}{C_{22}} = 13472 \quad (7.58)$$

5 bilinmeyenli 3 denkleminiz var.  $C_{21}$  ve  $C_{22}$  değerlerini sabitleyerek diğer değerleri bulabiliriz. Belirlediğimiz bu değerlerin, elde ettiğimiz köklerin pozitif çıkması ile doğruluğunu anlayabiliriz.

Denklem (7.56), (7.57) ve (7.58) için  $C_{21} = 1F$   $C_{22} = 110F$  olsun.

Denklemlerimizi yeniden yazalım.

$$G_{21}G_{23} = 111,72 \times 10^6 \quad (7.59)$$

$$G_{22}G_{23} = 111,72 \times 10^6 \quad (7.60)$$

$$G_{21} + G_{22} + G_{23} = 110 \times 13472 = 1481920 \quad (7.61)$$

Denklem (7.59) ile denklem (7.60)'ı birbirine oranlayalım, denklem (7.60)'da  $G_{23}$  'ü çökelim ve (7.61) denkleminde ifadeyi  $G_1$  cinsinden yazalım.

$$\frac{G_{21}}{G_{22}} = 1 \text{ ise } G_{21} = G_{22} \quad (7.62)$$

$$G_{21}G_{23} = 111,72 \times 10^6 \text{ ise } G_{23} = \frac{111,72 \times 10^6}{G_{21}} \quad (7.63)$$

$$G_{21} + G_{21} + \frac{12289,2 \times 10^6}{G_{21}} = 1481920$$

$$2G_{21} + \frac{12289,2 \times 10^6}{G_{21}} = 1481920 \quad (7.64)$$

$$G_{21}^2 - 740960G_{21} + 6144,6 \times 10^6 = 0$$

Şimdi kökleri bulalım

$$\Delta = 524443321600 \quad (7.65)$$

$$\sqrt{\Delta} = 724184,59$$

Denklem (7.65)'de bulduğumuz değeri kökler için kullanalım

$$G_{21} = \frac{740960 \mp 724184,59}{2}$$

$$G_{21_1} = 732572,2954 \quad (7.63)$$

$$G_{21_2} = 8387,705$$

Her iki kök sonucunu da kullanabiliriz.  $G_{21_1}$ 'i kullanalım.

$$G_{21} = 732572,29 \text{ S} \Rightarrow R_{21} = 1,3651 \times 10^{-6} \Omega$$

$$G_{22} = 732572,29 \text{ S} \Rightarrow R_{22} = 1,3651 \times 10^{-6} \Omega$$

$$G_{23} = 16775,40 \text{ S} \Rightarrow R_{23} = 59,61 \times 10^{-6} \Omega$$

Buradan elde ettiğimiz sonuçları denklem (7.55)'de gösterildiği üzere  $A=10^8$  sabit değeriyle çarpılarak pratikte uygulanabilir değerlere ulaşılabilmektedir.

Öyleyse oluşturacağımız devrenin ikinci kısmı için değerlerimiz:

$$R_{22} = 136,51 \Omega$$

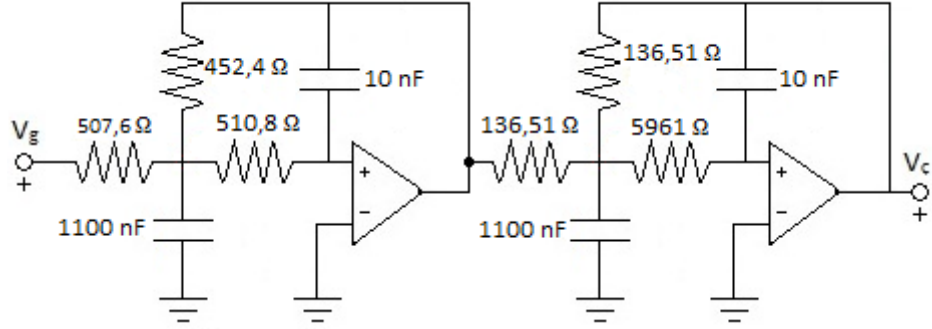


$$R_{21} = 136,51 \Omega$$

$$R_{23} = 5961 \Omega$$

$$C_{21} = 10 \text{ nF}$$

$$C_{22} = 110 \text{ nF}$$



Şekil 7-15: MFB (Multiple feedback) Tasarlanan süzgeç devresi

## 8. Laboratuvar Ölçüm Sonuçları

Devremizde bağlantılarımız tamamladıktan sonra sinyal jeneratörümüzden değişik frekanslarda sinyal üretip, osiloskop ile giriş ve çıkış sinyallerimizi ölçümleyerek devremizin karakteristik yapısını, giriş frekansı için çıkış genliğimiz ve gerilim kazancımız elde edilir.



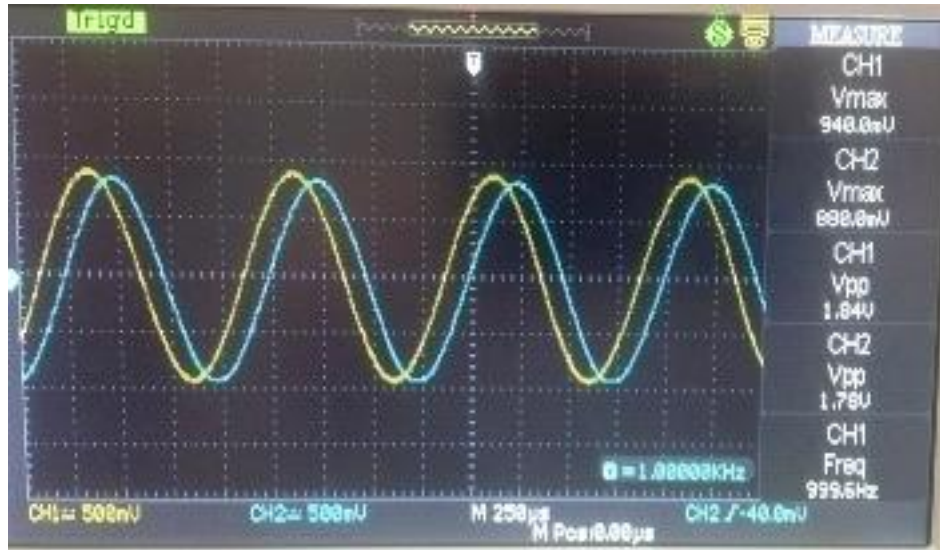
**Şekil 8-16:** Proje devresi prototip

Devremiz ikinci dereceden alçak geçiren çoklu geri besleme (Multiple feedback: MFB) süzgeç olduğu için düşük frekanslardan ölçmeye başlayabiliriz.



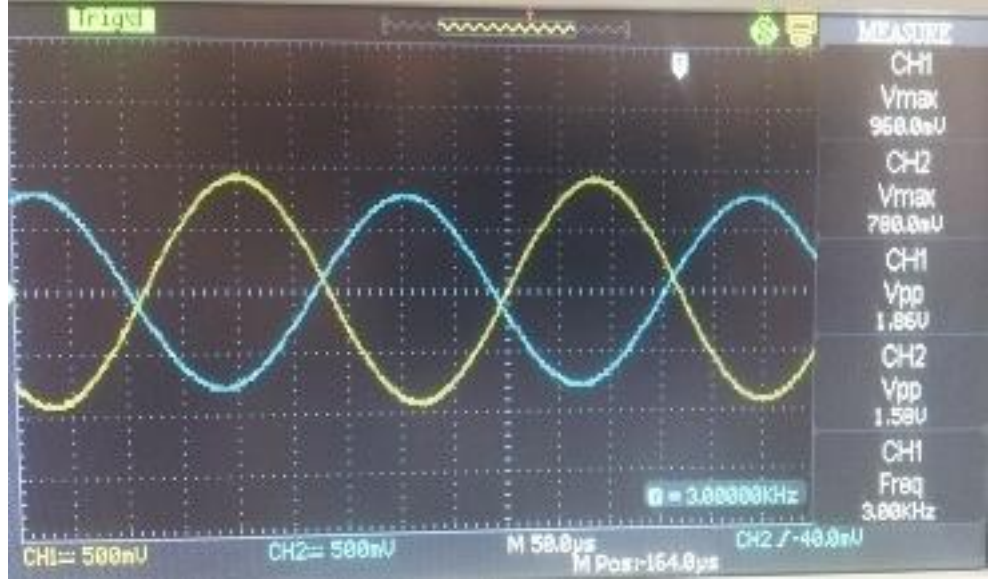
**Şekil 8-17:** MFB Süzgeç 10 Hz genlik cevabı

Şekil (8.2)'de görüldüğü gibi 10 Hz'lik bir giriş sinyali uyguladığımızda giriş ve çıkış sinyalleri üst üste gelmektedir. 10 Hz'de giriş sinyal gerilimi 1,88 Vpp, çıkış sinyal gerilimimiz ise 1,82 Vpp'dir.



**Şekil 8-18:** MFB Süzgeç 1 kHz genlik cevabı

Şekil (8.3)'de görüldüğü gibi 1 kHz'lik bir giriş sinyali uyguladığımızda giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki açı farkı fazlaşmaktadır. 1 kHz'de giriş sinyal gerilimi 1,84 Vpp, çıkış sinyal gerilimimiz ise 1,78 Vpp'dir



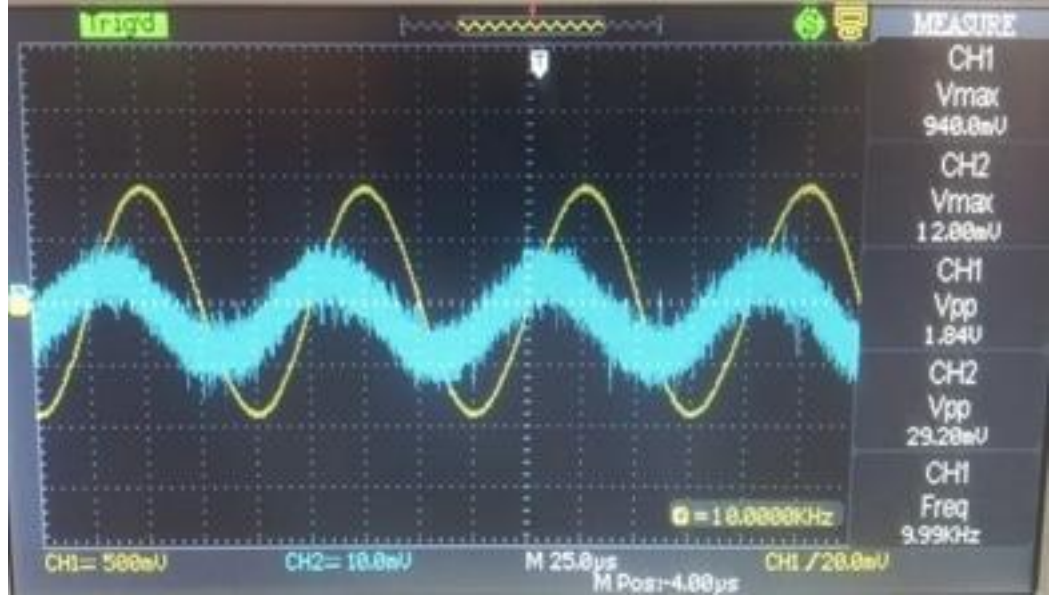
**Şekil 8-19:** MFB Süzgeç 3 kHz genlik cevabı

Şekil (8.4)'de görüldüğü gibi 3 kHz'lik bir giriş sinyali uyguladığımızda giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki açı farkı daha da fazlalaşmaktadır. 3 kHz'de giriş sinyal gerilimi 1,86 Vpp, çıkış sinyal gerilimimiz ise 1,58 Vpp'dir



**Şekil 8-20:** MFB Süzgeç 5 kHz genlik cevabı

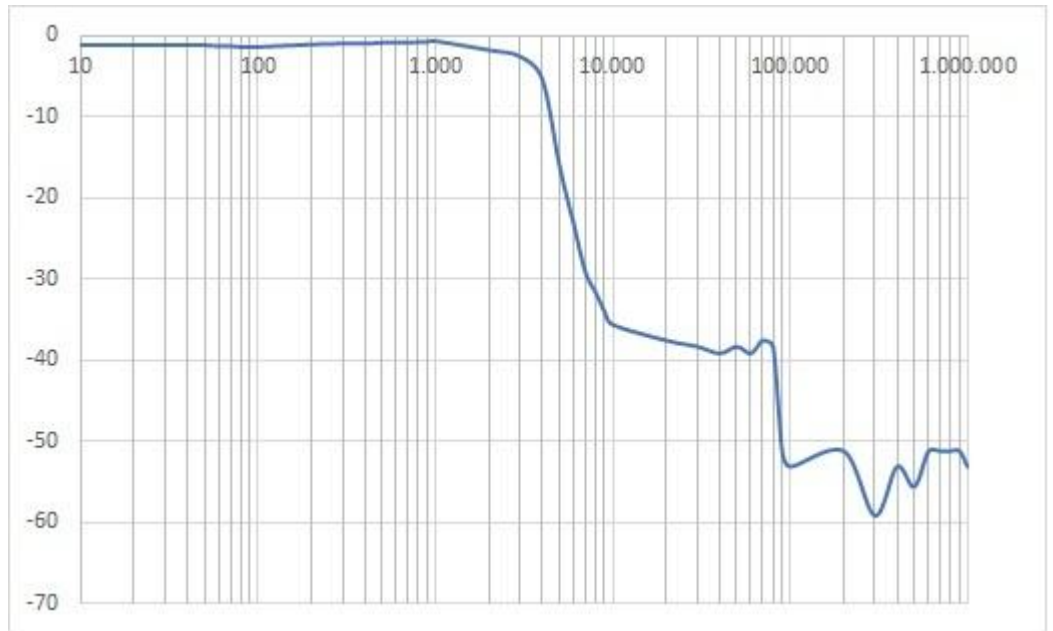
Şekil (8.5)'de görüldüğü gibi 5 kHz'lik bir giriş sinyali uyguladığımızda giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki açı farkı çok fazlalaşmaktadır. 5 kHz'de giriş sinyal gerilimi 1,88 Vpp, çıkış sinyal gerilimimiz ise 264 mV'a kadar düşmüştür.



**Şekil 8-21:** MFB Süzgeç 10 kHz genlik cevabı

Şekil (8.6)'da görüldüğü gibi 10 kHz'lik bir giriş sinyali uyguladığımızda giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki açı farkı çok fazlalaşmaktadır. 10 kHz'de giriş sinyal gerilimi 1,88 Vpp, çıkış sinyal gerilimimiz ise 29,2 mV'a kadar düşmüştür.

Ölçülen frekans değerlerinde elde edilen sonuçlara göre gerilim kazanç grafiğimiz şekil (8.7)'de görüldüğü gibidir.

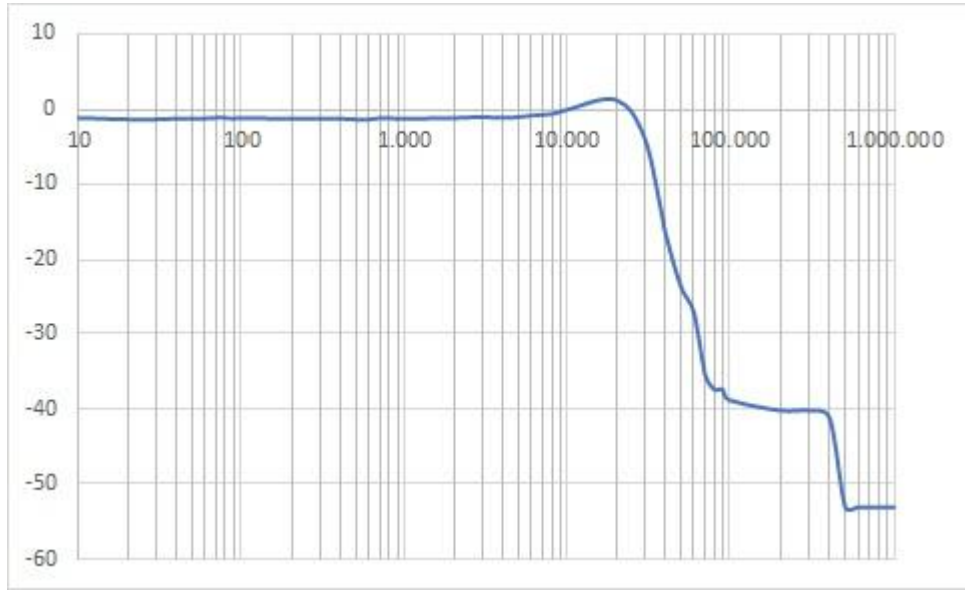


**Şekil 8-22:** MFB Süzgeç Gerilim Kazanç Grafiği

Şek,1 (8.7)'de görüldüğü gibi düşük frekanslarda giriş çıkış sinyalleri gerilim kazancımız kayıp azdır. Giriş sinyalindeki Frekans yükseldikçe gerilim kazancımız azalmaktadır.

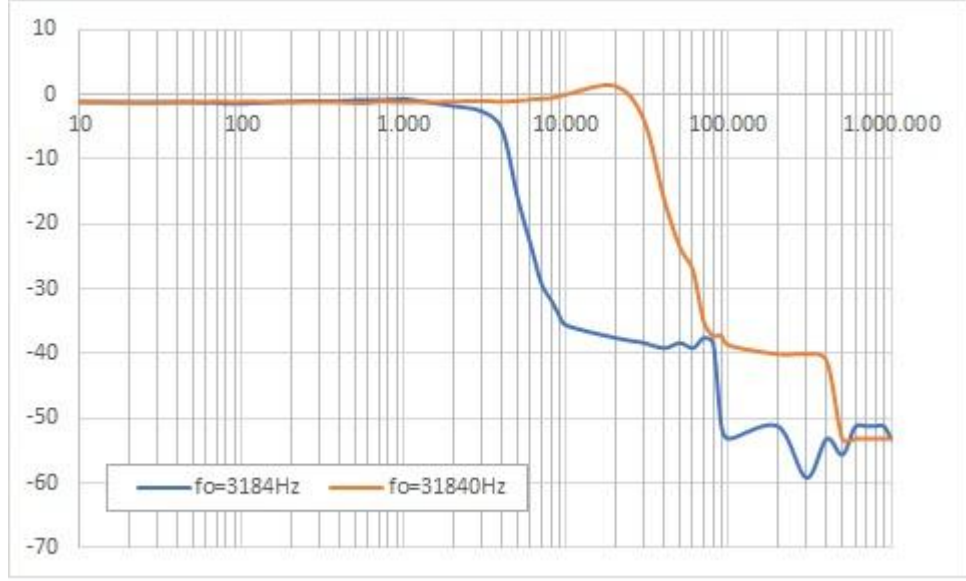
Elde ettiğimiz MFB süzgeç devresindeki kondansatör değerlerini değiştirerek farklı frekans değerlerinde gerilim kazan grafiği şekil (8.8)'de görülmektedir.

Şekil (8.8)'de MFB süzgeç devresinde  $C_{12} = C_{22} = 110 \text{ nF}$  ve  $C_{11} = C_{21} = 1 \text{ nF}$  olarak alınmıştır.



**Şekil 8-23:** MFB Süzgeç Gerilim Kazanç Grafiği

Devrede kullanılan kondansatör değerleri 10 kat azaltılarak yeniden kurulan devreye uygulanan frekans değerlerine göre elde edilen grafik şekil (8.8)'de görülmektedir.



**Şekil 8-24:** MFB Süzgeç Karşılaştırmalı Gerilim Kazanç Grafiği

## 9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu projede, yüksek mertebeden aktif süzgeç devrelerinin tasarlanmasında kullanılan aktif alt devreler incelenerek, süzgeç tasarımında kullanılan Butterworth ve Chebyshev yöntemleri araştırılmış ve elde edilen bilgiler kullanılarak yüksek mertebeden bir süzgeç devresinin tasarımı yapılmıştır. Şekil (7.1)'de gösterilen devrenin özellikleri belirlenerek, devre özelliklerini sağlayan devre fonksiyonu bulunmuştur. Elde edilen devre fonksiyonunun gerçekleştirilmesi için prototipi hazırlanmıştır. Laboratuvar modelinin değişik frekanslarda ölçüm sonuçları değerlendirilmiş ve şekil (8.7)'deki gerilim kazanç grafiği elde edilmiştir. Elde edilen devre fonksiyonuna göre, prototipte kullanılan kondansatör değerleri 10 kat küçültülmüş ve ilk devreye uygulanan frekans değerlerine göre yeniden ölçüm sonuçları alınmıştır. Şekil (8.9)'da birinci ve ikinci devreden elde edilen gerilim kazanç grafiği karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Süzgeç devresinde kondansatör değerlerinin on kat küçültülmesi kesim frekansında kayma olmasına sebep vermiştir.

Elde edilen bu sonuçlar kapsamında; kullanılan devre elemanlarının değerleri ve karakteristik yapıları, istenilen çıkış sinyaline göre yeniden tasarlanabilir ve farklı uygulama alanları için daha yüksek dereceden süzgeçler tasarlanabilir.

Yakın bir gelecekte, yapılan ve yapılacak olan çalışmalarla yarı iletken malzeme teknolojisinin geliştirilmesi ve dış etkenlerin azaltılabilmesi sonucu süzgeçlerin çalışma karakteristiği üzerindeki etkiler incelenebilir.



## 10. KAYNAKLAR

**Baki, A. R.**, 2001 : Log-Domain Filtering: Disk-Drive Applications and Distortion Analysis, McGill University, Montreal.

**Deliyannis, T., Sun, Y. and Fidler, J. K.**, 1999: Continuous-Time Active Filter Design, (1nd Ed.) CRC Press LLC, ISBN- 0-8493-2573-0.

**Johnson D. E.**, 1976: Introduction to Filter Theory, Prientice-Hall, ISBN: 0 13 483776 2.

**Sedra, A. S., Smith, K. C.**, 1998: Microelectronics Circuits, (4nd Ed.) Oxford University Press, ISBN 0-19-511663-1, 1237.

**Anday F.**, *Devre Sentezine Giriş*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, (1999).

**Dindar M.**, “Video Frekans Uygulamaları için A – Sınıfı Logaritmik Ortam Eliptik Süzgeç Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2013).

**Alkan M. A.**, Elektronik Filtreler (1. ve 2. Bölüm), (01 Ocak 2017) <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/elektronik-filtreler-1-bolum-elektrikport-akademi/17069#> , (2017)

## 11. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Övgün ÖZLÜSÖZ

Doğum Yeri ve Tarihi : Denizli / 29.06.1982

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik Posta : [ozlusoz@gmail.com](mailto:ozlusoz@gmail.com)

Adres : Gültepe Mah. 4835 sok. No:3/4 DENİZLİ