



A novel IIR based FIR filter design technique using a new fitness function determined by distance metrics

Fatma Latifoğlu^{1*}, Sümeyya Arıkan²

¹Department of Biomedical Engineering, Engineering Faculty, Erciyes University, 38280, Talas, Kayseri, Türkiye

²Department of Biomedical Engineering, Engineering Faculty, Düzce University, 81620, Düzce, Türkiye

Highlights:

- High performance FIR filter design based on IIR filter
- Optimization of the filter parameters using ABC and PSO algorithms, with the fitness function determined by a distance metrics
- Testing the designed filter on the ECG signal

Keywords:

- FIR Filter Design
- IIR Filter
- Optimization Algorithms

Article Info:

Research Article
Received: 25.03.2022
Accepted: 25.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1061112

Acknowledgement:

The authors would like to thank Erciyes University Scientific Research Projects Unit. Project number: FDK-2019-8760

Correspondence:

Author: Fatma Latifoğlu
e-mail:
flatifoglu@erciyes.edu.tr
phone: +90 352 207 6666 /
32977

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the focus is on the design of a filter that will provide high performance in signal processing applications. The performance of the designed filter has been numerically demonstrated and tested on the ECG signal. The design scheme of the proposed study is shown in Figure A.

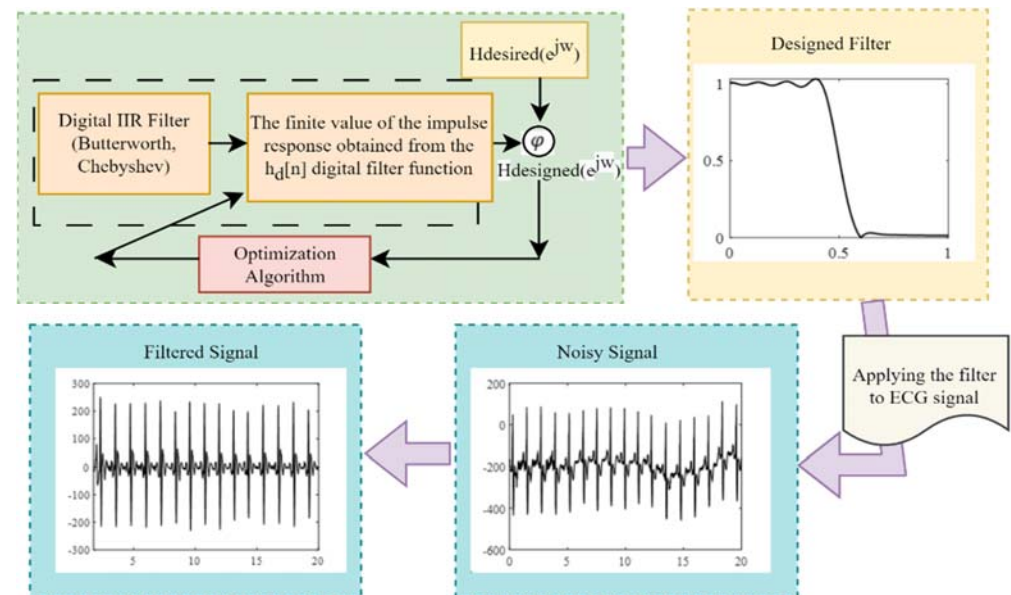


Figure A. Design scheme of the proposed method

Purpose: This paper aims to develop a high-performance Finite Impulse Response (FIR) filter design method that controls the over-frequency response parameters of the designed filter with a simple and new approach. For this purpose, an optimal FIR filter based on an Infinite Impulse Response (IIR) filter is designed, taking into account all the parameters of pass and stop band ripples, stop band attenuation, transition bandwidth, and linear phase response, and using the advantages of the better frequency response of the IIR filter.

Theory and Methods: The optimal FIR filter was designed using the finite impulse response of the IIR filter, leveraging the advantages of the IIR filter's better frequency response characteristics. The parameters of Butterworth and Chebyshev filters were optimized using Artificial Bee Colony (ABC) and Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithms with novel fitness functions by employing various distance metrics. The optimization of IIR filter parameters using a multi-objective fitness function based on distance metrics provided effective results using the total and mean square error of the filter performance error vector.

Results: According to the numerical results, the filter designed using the proposed approach achieved more precise signal decomposition compared to other commonly used traditional filters.

Conclusion: The performance of the designed low-pass filter was compared with existing literature filters in terms of band stopband ripple, stopband attenuation, and transition band. Based on the numerical results, the proposed approach offers a high-performance alternative to other literature filters, utilizing new ideas with IIR-based design and novel fitness functions that address the drawbacks of both IIR and FIR filters.



Mesafe ölçümleriyle belirlenen uygunluk fonksiyonunu kullanan yeni bir IIR temelli FIR süzgeç tasarım tekniği

Fatma Latifoğlu^{1*}, Sümeyya Arıkan²

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 38280, Talas, Kayseri, Türkiye

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Yüksek performanslı IIR tabanlı FIR süzgeç tasarımı
- Süzgeç parametrelerinin ABC, PSO ve uzaklık ölçütleriyle oluşturulan uygunluk fonksiyonu ile optimizasyonu
- Tasarlanan süzgecin EKG işareti üzerinde test edilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.03.2022

Kabul: 25.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1061112

Anahtar Kelimeler:

FIR süzgeç tasarımı,
IIR süzgeç,
optimizasyon algoritmaları

ÖZ

Bu çalışmada, basit ve yeni bir yaklaşımla süzgecin tüm frekans yanıtı parametrelerini kontrol ederek yüksek performanslı bir sonlu dürtü yanıtı (Finite Impulse Response - FIR) süzgeç tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Bu amaçla, geçirme ve durdurma bandı dalgalanmaları, durdurma bandı zayıflaması, geçiş bandı genişliği ve doğrusal faz yanıtı parametrelerinin tamamı göz önünde bulundurularak ve sonsuz dürtü yanıtı (Infinite Impulse Response - IIR) süzgecin daha iyi frekans yanıtına sahip olma avantajları da kullanılarak IIR süzgeç temelli optimal FIR süzgeç tasarlanmıştır. Butterworth ve Chebyshev süzgeçlerin parametreleri, Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony - ABC) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO) algoritmaları ve çeşitli uzaklık ölçütleri kullanılarak yeni uygunluk fonksiyonlarıyla optimize edilmiştir. Süzgeçlenen işaretler görsel olarak incelendiğinde, önerilen algoritma ile süzgeçlenen işaretin faz gecikmesinin geleneksel süzgeçlere göre daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca, tasarlanan süzgecin performansı, dört farklı frekans içeren sinüzoidal bir işareti alt bantlarına ayırtmak için test edilmiştir. Sayısal sonuçlara göre, önerilen yaklaşımla tasarlanan süzgeç, işareti diğer yaygın olarak kullanılan geleneksel süzgeçlere göre daha hassas bir şekilde ayırtmıştır.

A novel IIR based FIR filter design technique using a new fitness function determined by distance metrics

HIGHLIGHTS

- High performance FIR filter design based on IIR filter
- Optimization of the filter parameters using ABC and PSO algorithms, with the fitness function determined by a distance metrics
- Testing the designed filter on the ECG signal

Article Info

Research Article

Received: 25.03.2022

Accepted: 25.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1061112

Keywords:

FIR filter design,
IIR filter,
optimization algorithms

ABSTRACT

This paper aims to develop a high-performance method for designing Finite Impulse Response (FIR) filters that effectively control the over-frequency response parameters. The proposed approach involves designing an optimal FIR filter based on an Infinite Impulse Response (IIR) filter, considering various parameters such as pass and stop band ripples, stop band attenuation, transition bandwidth, and linear phase response. The advantages of the IIR filter's better frequency response are utilized in this design. The parameters of Butterworth and Chebyshev filters are optimized using Artificial Bee Colony (ABC) and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms, incorporating novel fitness functions based on different distance metrics. Visual examination of the filtered signals shows that the proposed algorithm reduces phase delay compared to traditional filters. Additionally, the performance of the designed filter is evaluated by decomposing a sinusoidal signal with four different frequencies into its sub-bands. The numerical results demonstrate that the proposed approach achieves more precise decomposition compared to commonly used traditional filters.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *flatifoglu@erciyes.edu.tr, sumeyyaarikan@duzce.edu.tr /
Tel: +90 352 207 6666 / 32977

1. Giriş (Introduction)

Bir işaretin frekans spektrumundaki belirli özellikleri güçlendiren, yeniden şekillendiren veya istenen belirli özelliklere göre değiştiren sistemler genellikle sayısal süzgeçler olarak adlandırılır. Sayısal süzgeçler, birçok alanda, örneğin haberleşme, ses işleme, güç elektroniği, biyomedikal sinyal işleme, görüntü işleme ve endüstriyel uygulamalar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sayısal süzgeçler, genellikle FIR ve IIR olmak üzere dürtü yanıtı veya frekans yanıtı açısından sınıflandırılırlar. IIR ve FIR süzgeçlerin bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. IIR süzgeçlerin FIR süzgeçlere göre en önemli avantajı, genellikle daha az katsayı ve bellek alanı gerektirmeleridir. Ancak, IIR süzgeçlerin yapısından dolayı kutupları bulunur ve bir kutup birim çemberin dışında ise süzgeç kararsız olabilir. Oysa FIR süzgeçler her zaman kararlı olup doğrusal bir faz tepkisine sahiptir. Frekans tepkisi özelliklerine gelince, IIR süzgeçler, daha düşük mertebede daha dar geçiş bandı, daha küçük geçirme/durdurma bandı dalgalanmaları ve daha yüksek durdurma bandı zayıflaması sağlayabilirler. IIR süzgeçleri kullanarak, ideal bir süzgeç frekans tepkisine daha yakın bir performans elde etmek mümkündür [1-4]. FIR süzgeçlerin tasarım teknikleri genellikle geleneksel ve optimizasyona dayalı yaklaşımlar olarak iki kategoride incelenir. Geleneksel teknikler arasında Equiripple, Parks-McClellan, En Küçük Kareler, Pencereleme ve Frekans Örneklemme teknikleri yaygın olarak kullanılır. Bu tekniklerin kolay anlaşılabilir ve uygulanabilir olmasının avantajları olsa da, bazı dezavantajları da vardır, örneğin, geçirme/durdurma bandı frekanslarının ve dalgalanmalarının tam olarak belirtilmemesi gibi. Bu nedenle, bu geleneksel teknikleri kullanarak süzgeç parametrelerini tam olarak kontrol etmek mümkün olmayabilir [1-4].

Optimizasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen FIR süzgeç tasarımlarında, süzgeç parametrelerinin doğru kontrolü ve optimize edilmiş süzgeç katsayılarının elde edilmesiyle daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, San-José-Revuelta vd. [5], Çiçek Tozlaşma Algoritması (Flowers Pollination Algorithm-FPA) kullanarak çoklu uygunluk fonksiyonuyla optimize edilmiş süzgeç katsayılarına sahip ideal süzgeç özelliklerine yaklaşan bir FIR süzgeci tasarlamıştır. Başka bir çalışmada, Kar ve Mandal [6], FIR süzgeç tasarımında Parçacık Sürü Algoritmasını (Particle Swarm Optimization-PSO) değiştirerek süzgeç parametrelerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlayan bir FIR süzgeç tasarımı gerçekleştirmiştir. Dash ve Dam [7] ise Melez Ateş Böceği Diferansiyel Evrim Algoritması (Hybrid Firefly Differential Evolution Algorithm-HFDE) kullanarak çok amaçlı bir sayısal doğrusal faz çift bantlı süzgeç tasarlamıştır. Aggarwal vd. [8] ise Guguk Kuşu Arama Algoritması (Cuckoo Search Algorithm-CSA), Genetik Algoritma (Genetic Algorithm-GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyon (Particle Swarm Optimization-PSO) algoritmalarını kullanarak yüksek geçiren bant durduran bir FIR süzgeç tasarımını karşılaştırmıştır [9]. Saha vd. [10] ise FIR süzgecinin en iyi dürtü yanıt katsayılarını belirlemek için Kedi Sürüsü Optimizasyonu (Cat Swarm Optimization-CSO) kullanmıştır [10]. Dwivedi vd. [11] ise klasik ve evrimsel optimizasyon yöntemlerini (GA, ABC, PSO, CSO) karşılaştırarak FIR süzgeç tasarımında evrimsel yöntemlerin üstünlüğünü ortaya koymuştur.

IIR süzgeç tasarım teknikleri de genellikle klasik ve optimizasyona dayalı yaklaşımlar olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Klasik yaklaşımda, istenilen özelliklere sahip bir sürekli zamanlı süzgeç, Bilinear veya Dürtü Değişmezliği teknikleriyle ayrık zamanlı bir süzgece dönüştürülür [12-15]. Bu yaklaşımın avantajı, gelişmiş sürekli zamanlı süzgeç tasarımı sunmasıdır. Ancak, doğrudan ayrık zamanlı IIR süzgeç tasarımında basit çözümler elde edilemez. Butterworth, Chebyshev ve Eliptik IIR süzgeçleri gibi sürekli zamanlı süzgeçler, süzgeç parametrelerinin belirli bir ön bilgiye ihtiyaç

duyduğu ayrık zamanlı IIR süzgeç tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu tasarım tekniğinin dezavantajları arasında süzgeç performansının düşük olabilmesi bulunmaktadır [12].

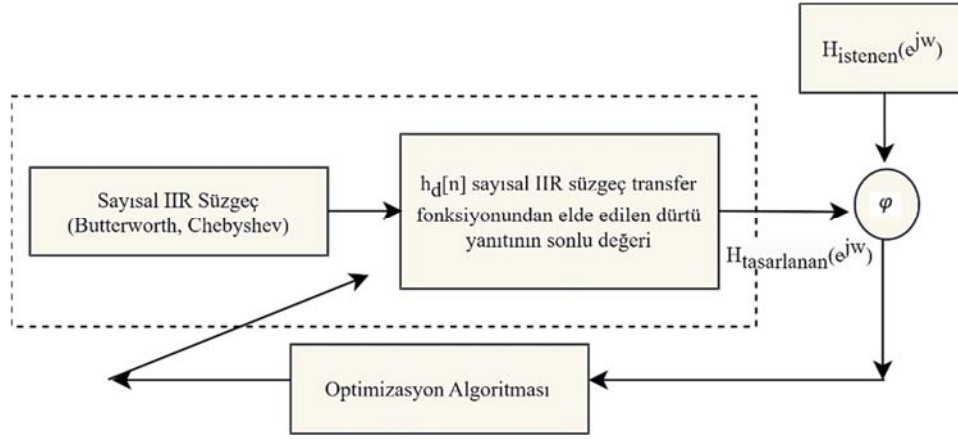
Bu nedenle, daha yüksek performans elde etmek ve süzgeç parametrelerine daha az ön bilgi gereksinimi duymak için optimizasyona dayalı IIR süzgeç tasarım teknikleri önerilmiştir. Literatürde, Cooperative Coevolutionary Genetic Algorithm (CCGA), Artificial Immune Algorithm (AIA), Multi-objective Evolutionary Algorithm (MOEA) gibi farklı optimizasyon algoritmaları ve farklı amaç fonksiyonlarının tanımlarıyla IIR süzgeçleri tasarlamak için kullanılan farklı optimizasyon yöntemleri bulunmaktadır [13-16]. Literatürde yapılan çalışmalar, farklı amaç fonksiyonlarını kullanarak optimum FIR veya IIR süzgeç yapısını elde etmek için süzgeç katsayılarının optimize edildiğini göstermektedir. Bu çalışmalarda, hata (uygunluk) fonksiyonu minimize edilerek sayısal süzgeç tasarımı problemini çözmek amaçlanmıştır. Hata fonksiyonu, geçirme/durdurma bandı dalgalanmalarını kontrol etmek veya tasarlanan süzgecin istenen tepkiden sapma miktarını hesaplamak gibi farklı şekillerde tanımlanabilir.

Bu çalışmada, IIR süzgeç temelli FIR süzgeç tasarımı için yeni bir yaklaşım önerilmektedir. IIR süzgecin dezavantajları olan yuvarlama hatalarına duyarlılık ve kararsızlık gibi sorunları ortadan kaldırmak amacıyla FIR süzgeci tasarlanmıştır. Bu yenilikçi yaklaşım, IIR süzgeçlerin düşük süzgeç derecesi ile keskin ve dar geçiş bandı özelliklerinden faydalanmak için IIR süzgecinin transfer fonksiyonunu kullanmaktadır. Bu nedenle, Butterworth ve Chebyshev süzgeçleri kullanılarak, süzgeç derecesi ve kesim frekansı parametrelerinin optimizasyonu ile geçiş bandı genişliği, geçirme ve durdurma bandı kesim frekansı gibi parametrelerin kontrolü sağlanmıştır. Kesim frekansı ve süzgeç derecesini optimize etmek için ABC ve PSO gibi yaygın olarak kullanılan optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Ayrıca, bu makalede, IIR tabanlı FIR süzgeç tasarımı için yeni bir hata fonksiyonu tanımlamak amacıyla çeşitli mesafe ölçümleri kullanılmıştır. Butterworth ve Chebyshev süzgeç parametrelerinin optimizasyonu ve IIR süzgeç transfer fonksiyonu kullanılarak FIR süzgecinin tasarımını içeren bu çalışma, ideal genlik ve doğrusal faz tepkisine sahip bir optimum frekans tepkisine ulaşmayı hedeflemektedir. Yapılan çalışmada, sadece kesim frekansı ve süzgeç derecesi gibi süzgeç parametreleri optimize edilmiştir. Ancak, literatürdeki diğer çalışmalarda süzgeç katsayıları doğrudan optimize edilmiştir. Bu durum, hesaplama karmaşıklığının artmasına neden olabilir [5-18]. Bu nedenle, önerilen yaklaşım düşük derecelilerle keskin geçiş bandı, düşük seviyeli geçirme bandı dalgalanması ve yüksek durdurma bandı zayıflaması gibi önemli avantajlar sunmaktadır.

2. Teorik Metot (Theoretical Method)

2.1. IIR Tabanlı FIR Süzgeç Tasarımı (Design of FIR Filter Using IIR Based Approach)

Önerilen çalışmada, FIR süzgeci, bir sayısal IIR süzgecin transfer fonksiyonundan elde edilen sonlu dürtü yanıtı kullanılarak tasarlanmıştır ve IIR süzgeç, sürekli zamandan ayrık zamana dürtü değişmezliği prensibi kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, ideale en yakın FIR süzgeç frekans yanıtını elde etmek üzere IIR süzgeç tasarımı sırasında Butterworth ve Chebyshev süzgeçlerinin kesim frekansı ve süzgeç derecesi optimize edilmiştir. Böylece tasarım sürecinde Şekil 1'de görüldüğü gibi uygunluk fonksiyonu (ϕ) kullanılarak kesim frekansı ve süzgeç derecesi gibi süzgeç parametrelerinin optimizasyonu ile IIR süzgeç katsayıları (a_k, b_k) istenen süzgeç frekans tepkisine göre ayarlanmıştır.



Şekil 1. IIR tabanlı dijital FIR süzgeç tasarım şeması (IIR based digital FIR filter design scheme)

2.2. FIR ve IIR Süzgeçler (FIR and IIR Filters)

FIR ve IIR süzgeçleri, belirtilen frekans aralığındaki işaret bileşenlerini geçiren ve diğerlerini reddeden frekans seçici Doğrusal Zamanla Değişmeyen (Linear Time Invariant, LTI) sistemlerdir. FIR süzgeçler, çıkış değerleri sonlu uzunluklu evrişim işlemleri ile tanımlandığı için özinelemeli olmayan süzgeçler ya da evrişim süzgeçleri olarak da bilinmektedir. Nedensel FIR süzgeçler, Eş. 1’de görüldüğü gibi giriş-çıkış değişkenine göre ileri beslemeli sabit katsayılı fark denklemi ile tanımlanmaktadır.

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] \quad (1)$$

Burada b_k , FIR süzgeç katsayılarıdır ve M, FIR süzgecin derecesidir. Birinci eşitliğe göre, çıkış değerlerinin girişin şu andaki ve önceki değerlerine bağlı olduğu görülmektedir. LTI sisteminin dürtü yanıtı ($h_d[n]$), sistemin girişine birim dürtü işareti ($\delta[n]$) uygulanarak elde edilir. Bu nedenle, sonlu uzunluğa sahip nedensel FIR süzgeçlerin dürtü yanıtı, Eş. 2’de olduğu gibi tanımlanmaktadır.

$$h_d[n] = \sum_{k=0}^M b_k \delta[n-k] \quad (2)$$

Nedensel FIR süzgeçlerin transfer fonksiyonu Z düzleminde, Eş. 3’teki gibi ifade edilmektedir.

$$H_d(z) = \sum_{k=0}^M b_k z^{-k} \quad (3)$$

IIR süzgeçlerin çıkış değerleri, önceki ve şu andaki giriş değerlerinin ağırlıklı toplamının önceki çıkış değerlerinin ağırlıklı toplamına eklenerek hesaplanır. Nedensel IIR süzgeçler ise Eş. 4’te görüldüğü gibi sabit katsayılı fark denklemi ile tanımlanmaktadır.

$$\sum_{k=0}^N a_k y[n-k] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] \quad (4)$$

Bu denkleme göre, çıkış değerleri mevcut girişe, ayrıca IIR süzgeçler için önceki giriş ve çıkış değerlerine bağlıdır [1]. Burada, a_k, b_k IIR süzgeç katsayılarıdır ve süzgeç derecesi, M ve N değişkenlerinin büyük olan değerine göre belirlenmektedir. IIR süzgeçlerin transfer fonksiyonu Z düzleminde, Eş. 5’te görüldüğü gibi ifade edilmektedir.

$$H_d(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}} = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad (5)$$

IIR süzgeçlerin tasarımına yönelik geleneksel yöntemler, tanımlanmış özelliklerine göre sürekli zamanlı bir süzgecin ayrık zamanlı bir süzgece dönüştürülmesi yaklaşımlarını içermektedir. Bu çalışmada Butterworth ve Chebyshev süzgeçleri sonlu dürtü yanıtı ile

tasarlanmıştır ve kesim frekansı, süzgeç derecesi gibi parametreler istenen frekans genliği yanıtı özelliklerini karşılayacak şekilde optimize edilmiştir.

2.2.1. Butterworth süzgeçler (Butterworth filters)

Butterworth süzgeçler, geçiş bandında mümkün olduğunca düz bir frekans tepkisine sahiptir ve durdurma bandında sıfıra doğru yakınsar. Bu nedenle, geçiş bandında maksimum düz bir yapıya sahip olmanın önemli bir avantajını elde etmek mümkündür [1]. Butterworth süzgecin frekans yanıtının mutlak genlik karesi Eş. 6’da tanımlanmıştır.

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^N} \quad (6)$$

Burada N süzgeç derecesidir ve ω_c süzgeç kesim frekansıdır. Süzgeç tasarım sürecinde N ve ω_c parametrelerinin belirlenmesi istenen özelliklerin karşılanması açısından önemlidir.

2.2.2. Chebyshev süzgeçler (Chebyshev filters)

Chebyshev süzgeçleri, Butterworth süzgeçlerinden daha dik bir geçiş bandına sahiptir. Bu nedenle, Chebyshev süzgeçlerin frekans tepkisi daha fazla geçiş bandı dalgalanmasına (Tip I) veya durdurma bandı dalgalanmasına (Tip II) sahiptir. Bir Chebyshev süzgecin frekans yanıtının mutlak genlik karesi Eş. 7’de tanımlanmıştır.

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \delta^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)} \quad (7)$$

Burada δ dalgalanma faktörüdür, ω_c kesim frekansıdır ve T_n n. dereceden bir Chebyshev polinomudur. Chebyshev süzgeç tasarımı sırasında δ , ω_c ve T_n parametrelerinin belirlenmesi istenen özelliklerin karşılanması açısından önemlidir.

2.2.3. Süzgeç tanımlamaları (Filter specifications)

Açık geçiren süzgeçler için genel olarak frekans ekseninde özellikler geçiş bandı frekansı (ω_{pd}), durdurma bandı frekansı (ω_{sd}), geçiş bandı dalgalanması (δ_{p1}, δ_{p2}), durdurma bandı dalgalanması (δ_s) ve geçiş bant genişliğine (ΔT) göre tanımlanır. Süzgeç tanımlamaları aşağıdaki eşitliklerde (Eş. 8-Eş. 12) tanımlanmıştır.

$$\delta_{p1} = \max\{|H_{ds}(e^{j\omega})|\} \omega \leq \omega_{pd} \quad (8)$$

$$\delta_{p2} = \max\{1 - |H_{ds}(e^{j\omega})|\} \omega \leq \omega_{pd} \quad (9)$$

$$\delta_s = \max\{|H_{ds}(e^{jw})|\} w \geq w_{sd} \quad (10)$$

$$A_{sr} = H_o(e^{jw}) w = w_{sd} \quad (11)$$

$$A_s = -20 \log_{10}(H_o(e^{jw})) w = w_{sd} \quad (12)$$

Bu çalışmada Butterworth ve Chebyshev süzgeçlerin kesim frekansı ve süzgeç derecesi optimum FIR süzgecin tasarımı için optimize edilmiştir. FIR ve IIR süzgeçlerin avantajları önerilen yeni yaklaşımla birleştirilmiştir. İdeal süzgece ait frekans yanıtına yaklaşmak için süzgeç tasarımı sırasında, önerilen uygunluk fonksiyonu kullanarak sürekli zamanda IIR süzgeç parametreleri bir sonlu dürtü yanıtı elde etmek üzere optimize edilmiştir. Bu nedenle, IIR süzgecin doğrusal olmayan faz tepkisi ve kararlılık problemine sahip olma dezavantajlarının ve FIR süzgeci için daha düşük mertebede keskin geçiş genişliğine, düşük geçiş bandı dalgalanmasına ve yüksek durdurma bandı zayıflamasına sahip olamama dezavantajlarının ortadan kaldırılması sağlanmıştır. Bildiğimiz kadarıyla, literatürde, yeni bir mesafe metrik tabanlı uygunluk fonksiyona sahip IIR tabanlı yaklaşımı kullanarak optimum FIR süzgeç tasarımı için bir çalışma bulunmamaktadır.

2.3. Uygunluk Fonksiyonunun Belirlenmesi (Determination of Objective Function)

Sürekli zamanda en iyi sonlu dürtü yanıtını elde etmek için Butterworth ve Chebyshev süzgeç parametreleri değişken parametre olarak alınmıştır. Ayrıca, tasarlanan süzgecin performans parametrelerinden hata terimleri hesaplanmış ve bu parametreler uygunluk fonksiyonunun minimum değerini verecek şekilde optimize edilmiştir. Önerilen çalışmada, uygunluk fonksiyonu üç ana hata terimi kullanılarak belirlenmiştir. Bu hata terimlerinden birinci sınıf, tasarlanan süzgeç ile önceden tanımlanmış (istenen) en uygun süzgeç arasındaki Öklid Mesafesi, Korelasyon mesafesi ve Şehir Bloğu (City block) mesafesi gibi çeşitli mesafe ölçümleri kullanılarak tanımlanmıştır. İkinci sınıf hata terimleri, Şekil 2'de görülen süzgeç performans parametreleriyle, üçüncü sınıf hata terimleri ise doğrusal faz yanıt hatasıyla ilişkilidir.

2.3.1. Mesafe ölçümlerinden elde edilen hatalar (Errors from distance measurements)

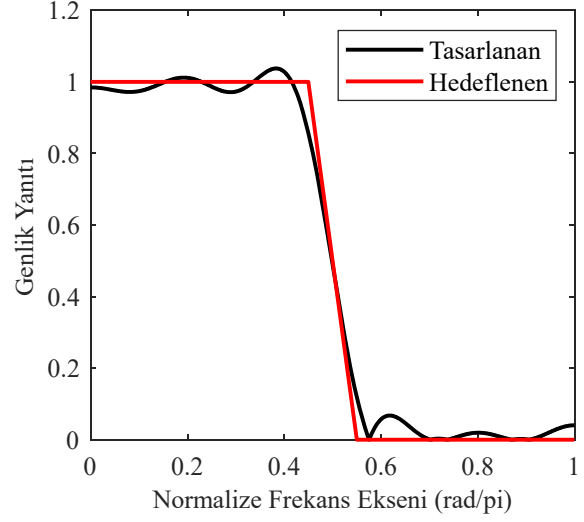
Bu çalışmada, uygunluk fonksiyonu, aşağıda belirtilen denklemlere göre İstenen Frekans Tepkisi ($|H_{dsr}(e^{jw})|$) ile Tasarlanan Frekans Tepkisi ($|H_{dsn}(e^{jw})|$) arasındaki Öklid, Korelasyon ve Şehir Bloğu mesafe ölçümlerini içeren benzerlik indekslerine göre hesaplanmıştır.

Öklid mesafesi, Öklid uzayındaki iki nokta arasındaki mesafe olarak tanımlanır [17]. Önerilen çalışmada Öklid mesafesi ile hesaplanan hata terimi Eş. 13'te yer almaktadır.

$$\Phi_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^N (|H_{dsr}(e^{jw})| - |H_{dsn}(e^{jw})|)^2} \quad (13)$$

Korelasyon mesafesi, iki vektör eşit boyutu arasındaki basit bir bağımlılık ölçüsünü göstermektedir [18]. Uygunluk fonksiyonu için kullanılan Pearson korelasyon katsayısı ve hata terimi Eş. 14'teki gibi tanımlanmıştır.

$$corr = \frac{cov(|H_{dsr}(e^{jw})|, |H_{dsn}(e^{jw})|)}{\sigma_{|H_{dsr}(e^{jw})|} \sigma_{|H_{dsn}(e^{jw})|}} \quad (14)$$



Şekil 2. Hedeflenen Süzgeç ($\delta_{p1} = 0, \delta_{p2} = 0, \delta_s = 0, A_s = \infty, w_p = 0,46, w_s = 0,54$) ve Tasarlanan Süzgeçler için Frekans Yanıtı (Desired Filter ($\delta_{p1} = 0, \delta_{p2} = 0, \delta_s = 0, A_s = \infty, w_p = 0,46, w_s = 0,54$) and Designed Filter Frequency Responses)

Burada $cov(|H_{dsr}(e^{jw})|, |H_{dsn}(e^{jw})|)$ istenen ve tasarlanan frekans yanıtları arasındaki kovaryansı, $\sigma_{|H_{dsr}(e^{jw})|}$, $\sigma_{|H_{dsn}(e^{jw})|}$ sırasıyla istenen ve tasarlanan süzgeç frekans yanıtının ortalama standart sapmasını göstermektedir. Çalışmada kullanılan üçüncü hata terimi ise Eş. 15'te verilmektedir.

$$\Phi_3 = \sum_{i=1}^N \left| |H_{dsr}(e^{jw})| - |H_{dsn}(e^{jw})| \right| \quad (15)$$

2.3.2. Hata terimleri (Error terms)

İkinci olarak, bu çalışmada uygunluk fonksiyonunun tanımı sırasında geçiş bandı-durdurma bandı dalgalanmaları ($\delta_{p1}, \delta_{p2}, \delta_{p2'}$), ΔT ve durdurma bandı zayıflama (A_{sr} : dB cinsinden A_s) parametreleri kullanılmıştır.

Doğrusal faz tepkisi hatasını hesaplamak için, kaynak [13]'te tanımlanan hem geçiş bandı hem de geçiş bandı faz tepkisi dikkate alınmıştır. İlk olarak, tasarlanan süzgecin faz tepkisinin birinci dereceden farkı ($\Phi(H(e^{jw})) = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$) Eş. 16'da görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta Phase = \{\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_{n-1}\} \quad (16)$$

Doğrusal faz yanıt hatası ise Eş. 17'de görüldüğü gibi tanımlanan geçiş ve geçiş bandındaki yanıtın birinci dereceden farkın varyansı olarak tanımlanır.

$$\Phi_4 = \text{varyans}\{\Delta\theta_i \mid \theta_i \in \text{Geçiş Bandı} \cup \text{Geçiş Bandı}\} \quad (17)$$

İdeal süzgeç için $\delta_{p1}, \delta_{p2}, \delta_s, \Delta T, A_{sr}, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ ve Φ_4 değerleri sıfırdır. Bu nedenle, bu performans parametreleri istenen süzgecin optimizasyonu için hata terimleri olarak kabul edilmiştir. Yukarıdaki denklemlerde tanımlanan terimlerine göre; hata terimi Eş. 18'de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

$$[\delta_{p1} \delta_{p2} \delta_s A_{sr} \Delta T \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 \Phi_4] \quad (18)$$

İdeal olmayan süzgeç tasarımı sırasında ΔT 'yi sıfıra yaklaştırmak istenirse δ_{p1} , δ_{p2} , δ_s artmaktadır. Aksi takdirde δ_{p1} , δ_{p2} ve δ_s değerlerini en aza indirmek istenirse, ΔT değeri artacaktır. Bu nedenle, birbiriyle çelişen iki durum göz önüne alındığında, çok amaçlı yaklaşım kullanılarak geçirme/durdurma bandı dalgalanmaları ve geçiş bandı dikkate alınarak uygunluk fonksiyonu tanımlanmıştır. Literatürde uygunluk fonksiyonu, ağırlıklı hata toplamı [5-17] ve genellikle tasarım için kullanılan δ_{p1} , δ_{p2} ve δ_s parametrelerinin kullanımı gibi farklı şekillerde tanımlanmıştır. Bu çalışmada, δ_{p1} , δ_{p2} , δ_s , A_{sr} ve ΔT hatalarını en aza indirerek optimal FIR süzgeci elde etmek için yeni uygunluk fonksiyonları önerilmiştir. Elde edilen sonuçları ve literatür çalışmalarını karşılaştırmak için çok amaçlı bir yaklaşım olarak dört uygunluk fonksiyonu kullanılmıştır.

Önerilen uygunluk fonksiyonları Eş. 19'da açıklanmıştır.

- i) $\Phi_1 = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_4$
- ii) $\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4$
- iii) $\Phi_3 = \delta_{p1} + \delta_{p2} + \delta_s + A_{sr} + \Delta T + \Phi_4$
- iv) $\Phi_4 = \sum_{i=1}^9 J_i$

(19)

Uygunluk fonksiyonu (ϕ_i) eşitlik 19'da görüldüğü gibi formüle edilmiş, Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 ve Φ_4 uygunluk fonksiyonları toplama, ortalama kare hatası ve J hata vektörünün maksimum değerine göre oluşturulmuştur. Önerilen çalışmada, önerilen yeni uygunluk fonksiyonlarına sahip ABC ve PSO optimizasyon algoritması kullanılarak kesim frekansı ve süzgeç derecesi optimize edilmiştir.

Karaboğa tarafından geliştirilen ABC algoritması, bal arılarının akıllı davranışını modelleyen, popülasyona dayalı doğadan ilham alan yeni bir optimizasyon algoritmasıdır [20]. ABC algoritmasına ilişkin detaylı açıklamalar 22 numaralı referansta yer almaktadır. Bu çalışmada ABC algoritması döngüsünü durdurmak için, maksimum nesil 200 olarak ayarlanarak beş çalışmadan sonra en iyi çözümler ortaya konmuştur. Deneysel olarak en iyi performansı elde etmek üzere ABC algoritması için koloni büyüklüğü 20 olarak seçilmiştir. Ayrıca, ABC algoritması için kontrol parametreleri olarak literatür çalışmalarında yer alan değerler kullanılmıştır [20, 21].

Kennedy ve Eberhart tarafından 1995 yılında geliştirilen PSO algoritması, kuş sürüsü veya balık sürüsünün sosyal davranışlarından esinlenen popülasyona dayalı bir stokastik optimizasyon tekniğidir [24, 25]. PSO algoritmasına ilişkin detaylı açıklamalar 24 numaralı referansta yer almaktadır. Bu çalışmada PSO algoritmasının kontrol parametreleri olarak literatürde yer alan değerler kullanılmıştır [6, 9, 24].

Ayrıca, FIR süzgeç tasarımında, PSO algoritma döngüsünü durdurmak için, maksimum nesiller 200 olarak belirlenmiş ve beş çalışmadan sonra, en iyi çözümler ortaya konmuştur.

2.4. Yeni Amaç Fonksiyonu ile Önerilen IIR Tabanlı FIR Algoritması (Proposed IIR Based FIR Algorithm with Novel Objective Function)

Önerilen çalışmada ABC ve PSO algoritması, Butterworth ve Chebyshev süzgeç parametrelerinin optimizasyonu ile δ_{p1} , δ_{p2} , δ_s , A_{sr} (dolayısıyla A_s 'yi maksimize eder), ΔT , Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 ve Φ_4 hatalarını en aza indiren optimal FIR süzgeci tasarlamak için kullanılmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen tasarım aşamaları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Adım 1 : İstenilen süzgeç frekans yanıtının ve FIR süzgeç derecesinin (N) belirtilmesi

Adım 2 : Süzgeç parametrelerinin kullanarak IIR süzgecin tasarlanması

Adım 3: Sonlu dürtü yanıtının hesaplanması

Adım 4 : Tasarlanan süzgeçten Eş. 8-18 kullanılarak $J = [\delta_{p1} \delta_{p2} \delta_s A_{sr} \Delta T \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 \Phi_4]$ hata terimlerinin hesaplanması

Adım 5 : Eş. 19 kullanılarak uygunluk fonksiyonunun hesaplanması

Adım 6 : Optimizasyon algoritması kullanılarak IIR süzgeç parametresinin uygunluk fonksiyonuna göre ayarlanması

Gerçekleştirilen çalışmada tüm hesaplamalar ve deneysel çalışmalar MATLAB programı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu bölümde, önerilen optimum FIR süzgeç tasarımı aşamasında elde edilen sonuçlar ve süzgeç tasarımı için önerilen uygunluk fonksiyonuna göre yöntemin etkinliği gösterilmiştir. Sonuçlar bölümünün ilk aşamasında IIR temelli FIR süzgecin önerilen tasarım şemasına göre performansı hesaplanmıştır. Eş. 19'da tanımlanan önerilen uygunluk fonksiyonuna sahip $J = [\delta_{p1} \delta_{p2} \delta_s A_{sr} \Delta T \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 \Phi_4]$ hata vektörü tasarlanmıştır.

Tablo 1'de ABC ve PSO algoritması ile optimize edilmiş Butterworth ve Chebyshev süzgeçleri kullanılarak farklı uygunluk fonksiyonu yaklaşımları ile elde edilen FIR süzgeç tasarımı için performans değerleri görülmektedir. Optimizasyon işlemi sırasında kesim frekansı w_c , geçiş bandı frekansı w_p ve durdurma bandı frekansı w_s 0,5 π radyan olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, FIR süzgeç uzunluğu 20 ve frekans örnekleri=2048 olarak seçilmiştir ve tasarlanan FIR süzgecinin δ_{p1} , δ_{p2} , δ_s , A_{sr} ve ΔT performans parametreleri hesaplanmıştır. Tasarlanan süzgecin tanımlamalarından elde edilen $Error_{Total} = \delta_{p1} + \delta_{p2} + \delta_s + A_{sr} + \Delta T$ ve ortalama kare hatasına ($Error_{mse} = mse([\delta_{p1} \delta_{p2} \delta_s A_{sr} \Delta T])$) göre uygunluk fonksiyonlarının performanslarını karşılaştırmak için bir hata terimi tanımlanmıştır. Ayrıca sürekli zamanda optimize edilmiş IIR süzgeç parametreleri (N_c, w_c) Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1'de görüldüğü gibi ABC ve PSO algoritmaları ile Butterworth ve Chebyshev Tip 1 süzgeç kullanılarak tasarlanan FIR süzgeç performanslarının PSO algoritması ile elde edilene göre daha iyi olduğu görülmüştür. Chebyshev tabanlı FIR süzgecin geçiş ve durdurma bandı performansı, PSO optimizasyon yaklaşımında azalmıştır ancak geçiş bandı da artmıştır. Bu nedenle çalışmanın ilerleyen bölümünde optimizasyon işlemi için ABC algoritması kullanılmıştır.

Ayrıca Φ_2 ve Φ_4 uygunluk fonksiyonu ile tasarlanan Butterworth tabanlı FIR süzgecinin, $Hata_{Total}$, ve $Hata_{mse}$ performans değerleri Φ_1 ve Φ_3 uygunluk fonksiyonu ile tasarlanandan daha iyi olduğu görülmektedir. Φ_3 uygunluk fonksiyonuyla tasarlanan Chebyshev Tip 1 tabanlı FIR süzgeci de $Hata_{Total}$, ve $Hata_{mse}$ 'ye göre daha iyi performans göstermiştir. En iyi geçirme bandı performansına Chebyshev Tip 1 tabanlı FIR süzgeci ile ulaşılmıştır. Butterworth tabanlı FIR süzgeci ile en yüksek durdurma bandı zayıflaması elde edilmiştir.

Şekil 3'de, Φ_3 uygunluk fonksiyonu ile bir Chebyshev süzgeci ve Φ_2 uygunluk fonksiyonu ile elde edilen Butterworth, uygunluk fonksiyonu temel alınarak 19. (Dürtü cevap uzunluğu 20'dir) FIR süzgecinin genlik ve faz yanıtları görülmektedir.

Genlik yanıtı performansları eşit olarak kabul edilirse, Φ_2 uygunluk fonksiyonu ile elde edilen Butterworth süzgeci, en düşük $Hata_{Total}$, parametresi ile optimal süzgeç frekansı karakteristiğini karşılamaktadır. Bu nedenle, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde

Tablo 1. Butterworth ve Chebyshev süzgeçleri kullanılarak ABC ve PSO algoritmaları ile optimum FIR süzgeç tasarımı için kullanılan farklı uygunluk fonksiyonlarının performans karşılaştırılması
(Performance comparison of different fitness functions for optimal FIR filter design using Butterworth and Chebyshev filters with optimization of ABC and PSO algorithms)

φ	$\delta_{p1} 0-$ w_{pd}	$\delta_{p2} 0-$ w_{pd}	$\delta_s w_{sd} - \pi$	$A_s w_{sd}$	ΔT	w_{pd}	w_{sd}	$\frac{Hata_{Total}}{Hata_{mse}}$	Sürekli Zamanda Optimize Edilmiş Süzgeç Özellikleri
ABC ve PSO algoritması kullanılarak sürekli zamanda Butterworth süzgecinden elde edilen FIR süzgeci (ilk satır ABC algoritması kullanılarak elde edilen sonuçları, ikinci satır PSO algoritması kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir)									
φ_1	0,0324	0,0221	0,0301	30,2531	0,1587	0,4248	0,5835	0,2741 0,0057	Nc=9 Wc=0,4780
	0,0326	0,0225	0,0304	30,250	0,1616	0,4240	0,5856	0,2806 0,0059	Nc=9 Wc=0,4780
φ_2	0,0302	0,0201	0,0300	29,989	0,1581	0,4281	0,5862	0,2728 0,0051	Nc=9 wc=0,4800
	0,0310	0,0207	0,0310	29,9073	0,1582	0,4263	0,5845	0,2736 0,0059	Nc=9 wc=0,4800
φ_3	0,0391	0,0224	0,0371	28,5408	0,1587	0,4976	0,6563	0,2955 0,0060	Nc=10 wc=0,5504
	0,0393	0,0227	0,0373	28,5400	0,1594	0,4971	0,6565	0,2963 0,0062	Nc=10 wc=0,5504
φ_4	0,0310	0,0207	0,0310	29,9035	0,1582	0,4263	0,5845	0,2729 0,0057	Nc=9 wc=0,48
	0,0318	0,0214	0,0304	29,8041	0,1590	0,4261	0,5851	0,2733 0,0062	Nc=9 wc=0,48
ABC ve PSO algoritmaları kullanılarak sürekli zamanda Chebyshev1 süzgecinden elde edilen FIR süzgeci (için δ dalgalanma faktörü 0,01 'dir)									
φ_1	0,0359	0,0221	0,0468	26,4848	0,1357	0,4355	0,5713	0,2879 0,0049	Nc=6 Wc=0,5
	0,0018	0,0019	0,0023	52,7598	0,4888	0,2632	0,7520	0,4971 0,0478	Nc=5 Wc=0,4229
φ_2	0,0383	0,0247	0,0444	26,9765	0,1377	0,4404	0,5781	0,2898 0,0050	Nc=6 Wc=0,4267
	0,0016	0,0017	0,0025	52,0944	0,4849	0,2646	0,7495	0,4931 0,0470	Nc=5 Wc= 0,4267
φ_3	0,0338	0,0194	0,0459	26,7688	0,1348	0,4800	0,6147	0,2797 0,0048	Nc=6 Wc=0,4677
	0,0015	0,0018	0,0012	58,0972	0,4976	0,3076	0,8052	0,5034 0,0495	Nc=5 Wc= 0,4677
φ_4	0,0383	0,0247	0,0444	26,9765	0,1377	0,4404	0,5781	0,2898 0,0050	Nc=6 Wc=0,4267
	0,0016	0,0017	0,0025	52,0944	0,4849	0,2646	0,7495	0,4931 0,0470	Nc=5 Wc=0.4267

Butterworth tabanlı FIR süzgeç yaklaşımı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın bu aşamasında, FIR süzgeç farklı derecelerde tasarlanmıştır ve Tablo 2'de görüldüğü gibi frekans tepkisine ait performans parametreleri verilmiştir. Optimizasyon aşamasında istenen süzgeç olarak ideal süzgeç frekans tepkisi karakteristiği kullanılmıştır. Farklı süzgeç dereceleri için φ_2 amaç fonksiyonu kullanılarak tasarlanan ideal süzgeç durumuna göre ABC algoritması kullanılarak sürekli zamanda Butterworth süzgecinden elde edilen FIR süzgeci parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

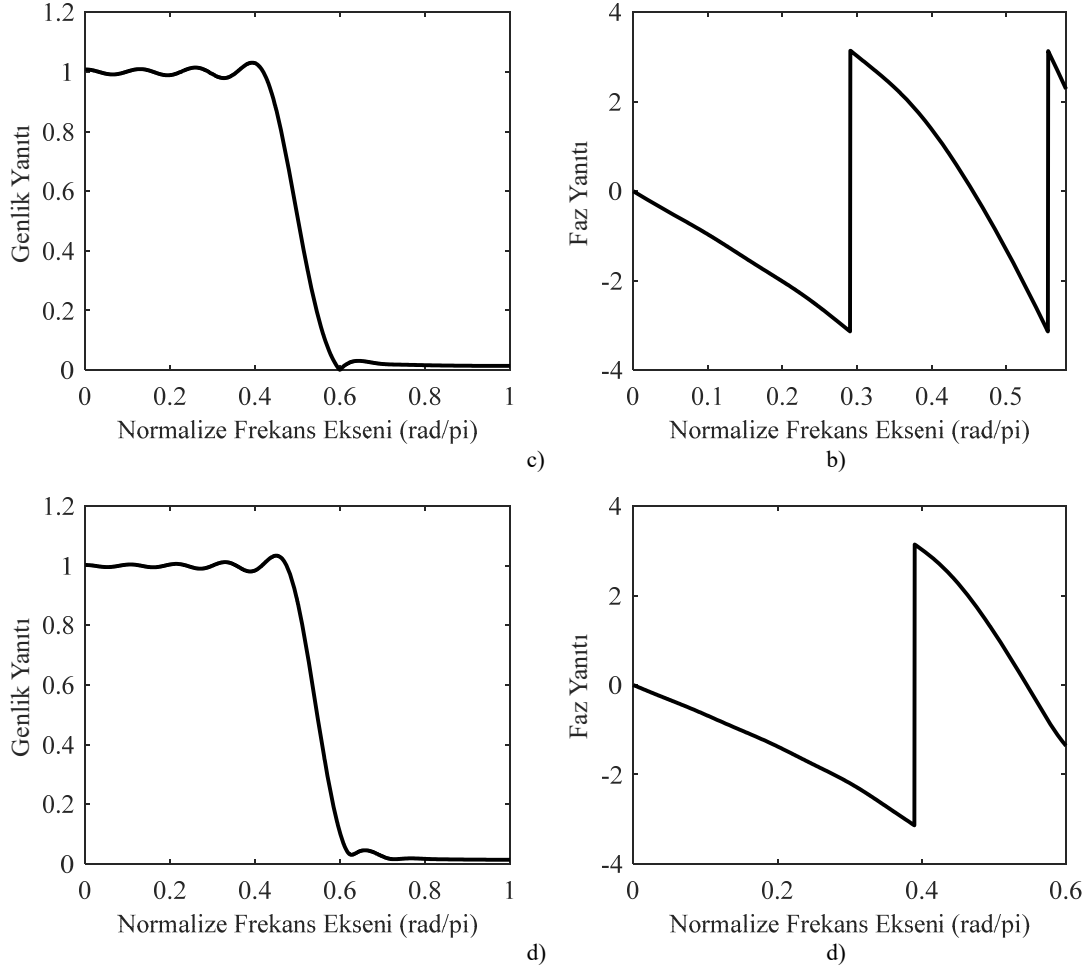
Önerilen süzgeç tasarım tekniği kullanılarak, Butterworth süzgeç parametrelerine ait sadece iki parametre ayarlanarak optimal süzgeç elde edilmiştir. Şekil 4'de görüldüğü gibi Butterworth tabanlı FIR süzgeci, sürekli zamanda kesim frekansı $w_c=0,49269$ ve süzgeç derecesi $N_c=29$ olan 128. dereceden FIR süzgeci için önerilen uygunluk fonksiyonu kullanılarak tasarlanmıştır.

Tablo 2'den görüldüğü gibi, tasarlanan FIR süzgecin derecesi 256 olarak tanımlandığında, sürekli zamandaki süzgecin derecesi daha düşük bir derece ile $N_c=47$ olarak elde edilmiştir. İdeal bir süzgeç

yapısının tasarımı sırasında süzgeç derecesi artırıldığında, geçiş bandı ideal süzgeç özelliklerini karşılamaya daha yakındır. Ancak geçiş bandı ile istenilen süzgeç durumu için süzgeç derecesi arttıkça geçiş, durdurma bandı dalgalanma değerleri azalmaktadır. Önerilen yaklaşım, istenen koşul için uyarlanabilir bir çözüm sunmakta olup ve tüm performans parametreleri göz önüne alındığında makul bir çözüm ortaya koymaktadır. Tablo 3. de önerilen algoritma ile tasarlanan 20. FIR süzgeç katsayıları verilmiştir.

3.1. Literatür Çalışmalarının Karşılaştırılması (Comparison of Literature Studies)

Literatürde FIR süzgeçleri, belirtilen referanslarda [5,8,11, 24-26] olduğu gibi uygunluk fonksiyonu kullanılarak istenen süzgeç özelliklerine göre süzgeç katsayısı optimize edilerek tasarlandığı görülmüştür. Bu çalışmaların çoğu, süzgeç derecesinin yarısı için optimize edilecek bir parametre gerektirir (doğrusal faz için), Bu nedenle optimize edilecek parametre sayısı süzgeç derecesine göre artmaktadır. Bu yaklaşımlar karmaşıklığa ve işlem yüküne yol açar. Önerilen çalışmada, IIR süzgecinin avantajlarını elde etmek için sürekli zaman özelliklerine ile FIR süzgeci tasarlanmış ve sadece bir parametre optimize edilerek yüksek performanslı bir FIR süzgeci elde



Şekil 3. a) ABC algoritması ile optimize edilmiş Butterworth Tabanlı FIR Süzgeci Genlik Yanıtı b) Geçirme ve Geçiş Bandında Butterworth Tabanlı FIR Süzgeci Faz Yanıtı c) Chebyshev Tabanlı FIR Süzgeç Genlik Yanıtı d) Geçirme ve Geçiş Bandında Chebyshev Tabanlı FIR Süzgeç Faz Yanıtı

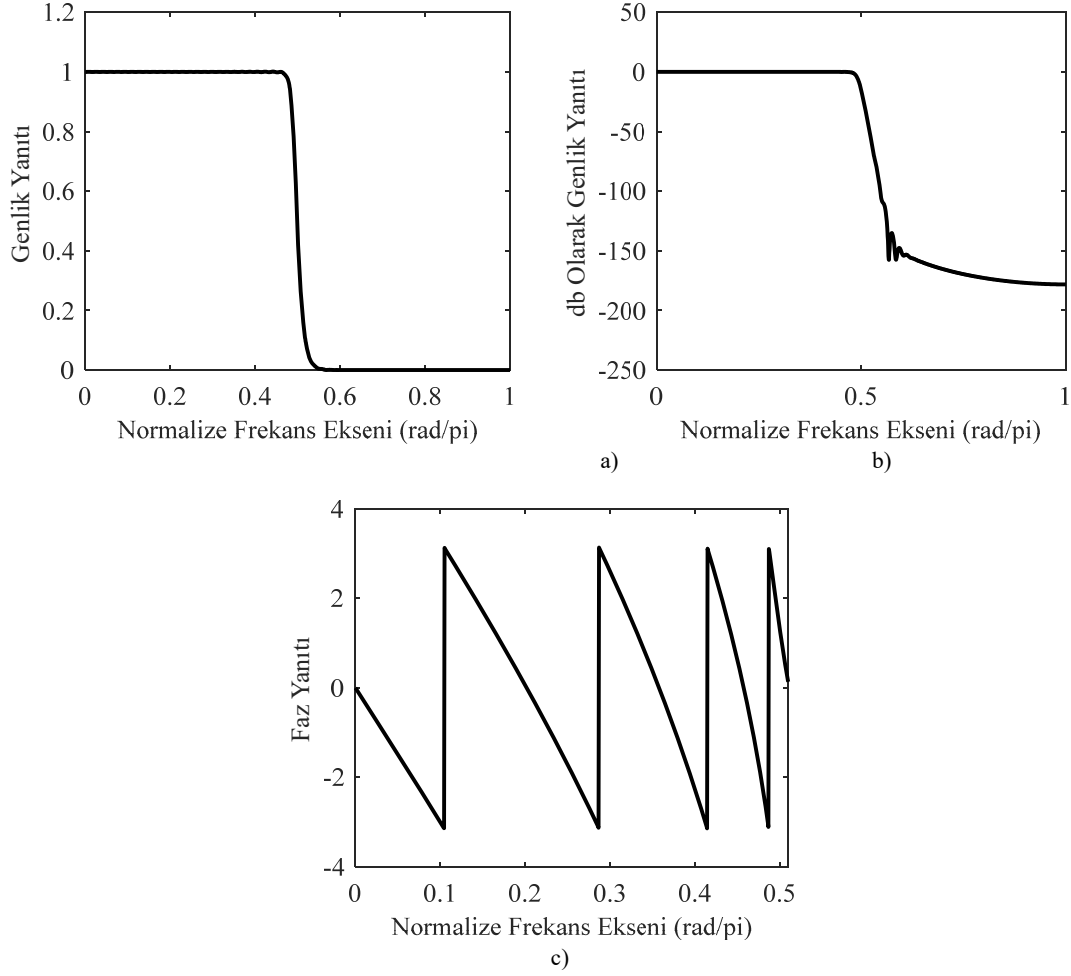
(a) Butterworth Based FIR Filter optimized with ABC algorithm Magnitude Response b) Butterworth Based FIR Filter Phase Response in Pass and Transition Band c) Chebyshev Based FIR Filter Magnitude Response d) Chebyshev Based FIR Filter Phase Response in Pass and Transition Band)

Tablo 2. φ_4 amaç fonksiyonu ile ideal bir süzgeç benzerliği kullanılarak tasarlanan FIR süzgecinin performans parametreleri (Performance parameters of the FIR filter designed using an ideal filter similarity with the φ_4 objective function)

Süzgeç Derecesi	δ_{p1} 0- w_{pd}	δ_{p2} 0- w_{pd}	δ_s $w_{sd}-\pi$	A_s w_{sd}	ΔT	w_{pd}	w_{sd}	Faz Yanıtı Hatası	Analog Domende Süzgeç Özellikleri
20	0,0336	0,0215	0,0321	29,8674	0,1460	0,4331	0,579	3,0891e-06	$N_c=10$ $W_c=0,482554$
32	0,0182	0,0167	0,0308	30,2300	0,1074	0,4487	0,5562	1,0127e-06	$N_c=13$ $W_c=0,483645$
64	0,0085	0,0127	0,0093	40,5922	0,0913	0,4712	0,5625	1,5845e-05	$N_c=22$ $W_c=0,491758$
128	0,0084	0,0125	0,0079	42,0061	0,0488	0,4829	0,5317	4,4319e-05	$N_c=40$ $W_c=0,494266$
256	0,0068	0,0109	0,0078	42,1811	0,0259	0,4907	0,5166	1,3373e-04	$N_c=72$ $W_c=0,497068$

edilmiştir. Ek olarak, FIR süzgecinin tasarımı için yeni uygunluk fonksiyonları ile IIR yaklaşımını kullanarak tüm süzgeç performans parametrelerini eşit olarak dikkate alan yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Tablo 4, literatür çalışmaları ve önerilen algoritma ile elde edilen süzgecin frekans karakteristiğini göstermektedir.

Literatürde, geçiş ve durdurma bandı dalgalanmalarını en aza indirmek üzere farklı süzgeç tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmalarda, durdurma bandı dalgalanma değeri azaldıkça, geçiş bandı dalgalanması veya geçiş bandı artmaktadır. Bu çalışma sadece geçirme ve durdurma bandı dalgalanmasını en aza



Şekil 4. 128. Derecede tasarlanmış FIR süzgecinin a) Genlik yanıtı b) dB cinsinden Genlik Yanıtı c) geçirme ve geçiş bandındaki Faz Yanıtı (FIR filter designed at 128 order a) Magnitude Response b) Magnitude Response in dB and c) Phase Response in pass and transition band)

Tablo 3. Önerilen algoritma ile tasarlanan FIR süzgeç katsayıları (The FIR filter coefficient designed with proposed algorithm)

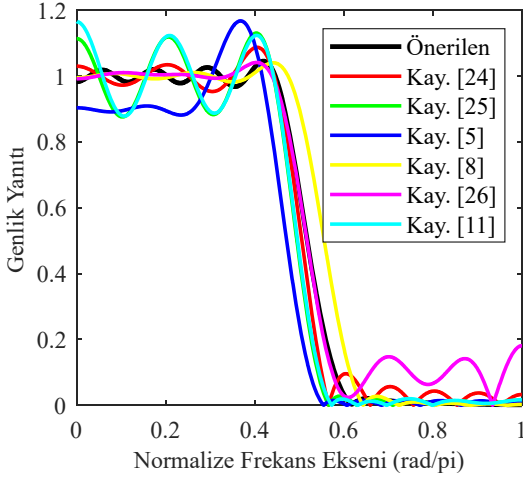
h[n]										
h[1]	h[2]	h[3]	h[4]	h[5]	h[6]	h[7]	h[8]	h[9]	h[10]	h[11]
0,0022	0,0227	0,1034	0,2682	0,4163	0,3478	0,0396	-0,2059	-0,1271	0,0970	0,1193
h[12]	h[13]	h[14]	h[15]	h[16]	h[17]	h[18]	h[19]	h[20]	h[21]	
-0,0411	-0,0944	0,0138	0,0706	-0,0006	-0,0515	-0,0055	0,0370	0,0079	-0,0262	

Tablo 4. Önerilen ve farklı tasarım yöntemleriyle elde edilen süzgeç performans parametrelerinin karşılaştırılması (Performance parameters obtained with different design methods in comparison to those obtained with proposed approach)

Literatür Çalışması	Süzgeç Derecesi	δ_{p1} in $0-0,4\pi$ rad.	δ_s in $0,6\pi-\pi$ rad.	A_s in $0,6\pi$ rad.	$w_{sd}-w_{pd}$
San-José-Revuelta [5]	20	0,1670	0,0145	46,9200	0,1147
Aggarwal [8]	20	0,0102	0,1721	15,2848	0,1514
Dwivedi [11]	20	0,1645	0,0201	34,6401	0,1064
Karaboğa [24]	20	0,0857	0,0960	20,4482	0,0977
Saha [25]	20	0,1294	0,0255	31,8613	0,0991
Singh [26]	20	0,0404	0,1810	30,9483	0,1230
Önerilen	20	0,0336	0,0321	37,8921	0,1460

indirmekle kalmayıp, aynı zamanda tolere edilebilir limitli optimum süzgeç parametrelerini elde etmek için geçiş bandını en aza indirmeye odaklanılmıştır. Ayrıca, IIR tabanlı FIR süzgeci, yeni bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak yalnızca iki parametre optimizasyonuna

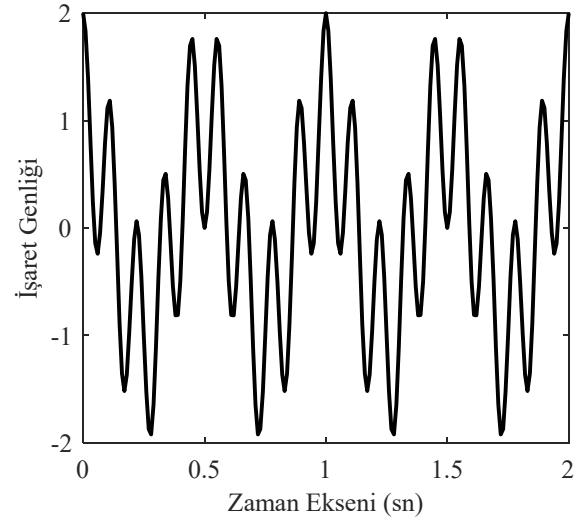
dayanan düşük işlem yükü ile tasarlanmıştır. Ayrıca görsel değerlendirme açısından önerilen yaklaşımdan elde edilen FIR süzgecinin frekans tepkisi ve literatür çalışmaları Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Butterworth süzgeç parametrelerinin analog domende optimizasyonu ile elde edilen IIR süzgeç temelli FIR süzgecin frekans tepkisi ve literatür çalışmalarında tasarlanan süzgecin frekans tepkisi (Frequency Response of IIR based FIR filter obtained from optimization of Butterworth filter parameters in analog domain and Frequency response of designed filter in literature studies)

3.2. Uygulama: Sentetik İşaret (Application: Synthetic Signal)

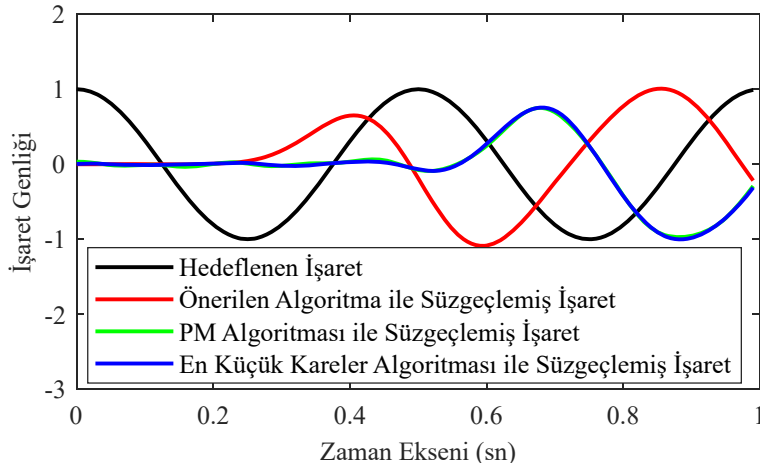
Bu bölümde, 100 Hz örnekleme frekansı ile örneklenen 3 Hz ve 9 Hz iki farklı frekanslı sinüzoidal işaret içeren bir işaret, önerilen yöntemle tasarlanan bir alçak geçiren Butterworth temelli FIR süzgeç ($N=128$) kullanılarak süzgeçlenmiştir. Ayrıca, aynı sinüzoidal işaret, tasarlanan süzgecin doğrusal faz tepkisi ve geçiş bandı ile ilgili performansını karşılaştırmak için geleneksel Parks & McClellan (PM) ve aynı süzgeç derecesine sahip En Küçük Kare Doğrusal Faz FIR süzgeci ile süzgeçlenmiştir [27]. Şekil 6'da 2 saniyelik süreye sahip 3 Hz ve 9 Hz kosinüs işaretini içeren sentetik bir sinüzoidal işaret görülmektedir. Önerilen süzgeç, geleneksel PM ve En Küçük Kareler algoritması kullanılarak süzgeçlenen ile istenen işaretler Şekil 7 de görülmektedir. Ayrıca süzgeçlenen işaretin başlangıç durumu ile üç süzgecin faz yanıt performansları karşılaştırılabilmektedir. Şekil 7 görsel olarak analiz edildiğinde, önerilen algoritma ile süzgeçlenmiş işaretin faz gecikmesi, geleneksel bir süzgeç ile süzgeçlenmiş işaretten daha küçüktür. Ayrıca, önerilen süzgecin geçici tepkisi, geleneksel süzgeçlerden daha küçüktür.



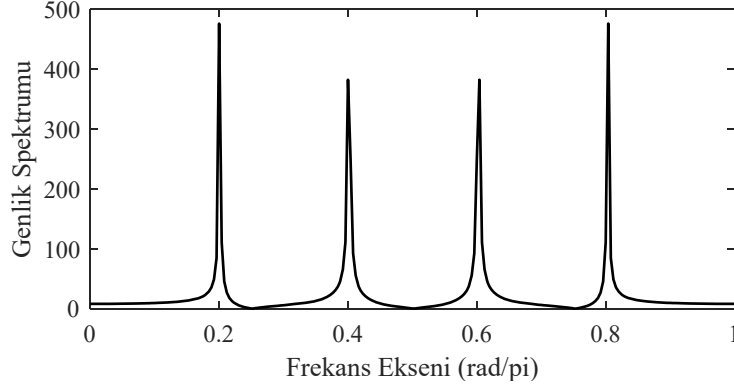
Şekil 6. Sentetik sinüzoidal işaret (Synthetic sinusoidal signal)

Ayrıca bu çalışmada, önerilen yöntem kullanılarak elde edilen prototip süzgeç ile kosinüs modülatönlü dört kanallı süzgeç bankası elde edilmiştir. Süzgeç bankası 0,2, 0,4, 0,6 ve 0,8 rad. olmak üzere dört frekans bileşenine sahip ayrık zamanlı bir sinüzoidal işarete uygulanmıştır. Sinüzoidal işaretin frekans spektrumu Şekil 8'de görülmektedir. Süzgeç bankasının frekans yanıtı Şekil 9'da görülmektedir. Bu süzgeç bankası kullanılarak sinüzoidal işaret süzgeçlenmiştir. Tasarlanan süzgeç bankasının birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü kanalı ile süzgeçlenmiş sinüzoidal işaretlerin frekans spektrumu Şekil 10'da görülmektedir.

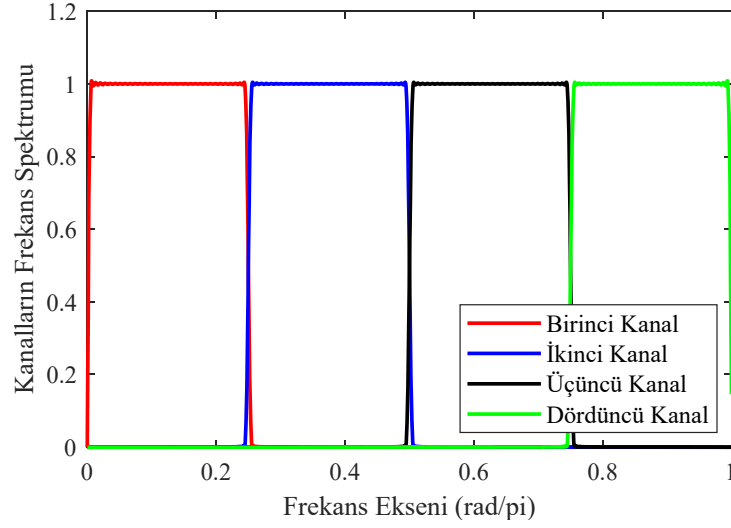
Şekil 10'dan da görülebileceği gibi, tasarlanan süzgeç ile elde edilen süzgeç bankası kullanılarak alt bant işaretler oldukça başarılı olarak ayrıştırılmıştır. Tasarlanan süzgecin sayısal olarak performansının analizi için, istenen her bir alt bant işaretlerin eldesi ve ayrıştırılmasında, süzgeçlenen işaretin gücü, Tablo 5'te görüldüğü gibi hem geçirme hem de durdurma bantlarında hesaplanmıştır. Tablo 5'te görüldüğü gibi önerilen süzgeç ikinci, üçüncü ve dördüncü frekans bantları için diğer geleneksel süzgeçlere göre istenmeyen işaretleri daha fazla bastırmaktadır. Ayrıca tasarlanan süzgeç için geçirme ve durdurma bantları için işaret gücü oranı diğer geleneksel süzgeçlere göre daha yüksektir.



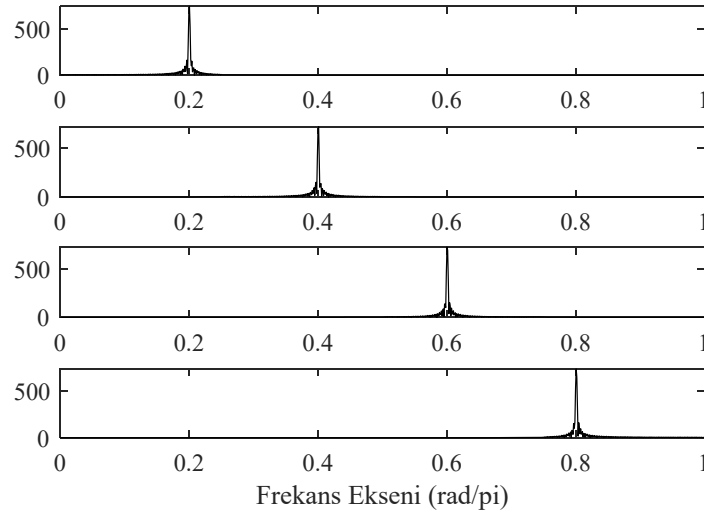
Şekil 7. İstenen ve Süzgeçlenen işaretler (Desired and filtered signals)



Şekil 8. 0,2, 0,4, 0,6 ve 0,8 rad. dahil sinüsoidal işaretin frekans spektrumu
(Frequency spectrum of sinusoidal signal including 0,2, 0,4, 0,6 and 0,8 rad. frequency)



Şekil 9. Prototip süzgeç tasarımı önerilen yaklaşımdan elde edilen Kosinüs Modülasyonlu Süzgeç Bankasının frekans yanıtı
(Frequency Response of Cosine Modulated Filter bank obtained from prototype filter designed proposed approach)



Şekil 10. Süzgeçlenmiş alt bant işaretlerinin frekans spektrumu (Frequency spectrum of filtered sub band signals)

3.3. Uygulama: EKG İşaretinden Gürültü Giderme (Application: ECG Signal Denoising)

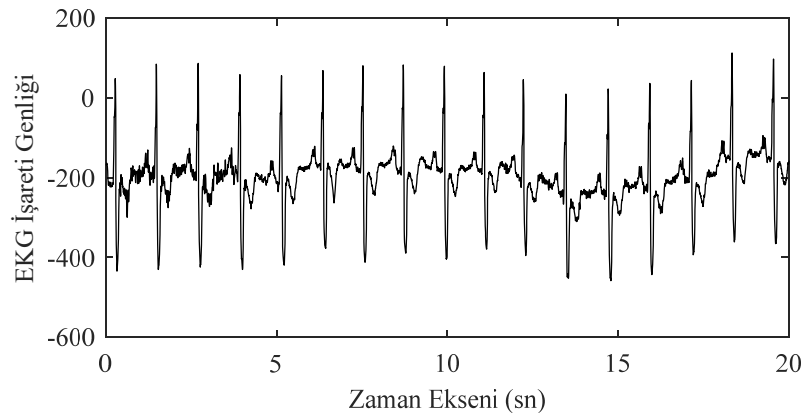
Biyomedikal sistemlerde süzgeçleme, biyomedikal işaretleri analiz etmek, biyomedikal işaretlerden önemli bilgiler elde etmek ve biyomedikal işaretlerin istenmeyen bileşenlerini gidermek için kullanılmakta olup çok önemlidir. Bu nedenle bu bölümde, tasarlanan süzgecin performansı Şekil 11'de görüldüğü gibi EKG işareti kullanılarak gerçek bir süzgeç uygulaması ile analiz edilmiştir. EKG işareti, elektriksel aktiviteyi yansıtan ve kalpteki kardiyovasküler bir hastalığı değerlendirmede kullanılan biyomedikal bir işarettir. Bu çalışmada kullanılan EKG işareti physionet halka açık veri tabanından elde edilmiştir [28]. Kayıt prosedürü ile ilgili detaylı bilgiler [28, 29] numaralı kaynaklarda belirtilmiştir. İşaretlerin örnekleme frekansı F_s

= 250 Hz. dir. Bu çalışmada, ilk 20 saniyelik süreye karşılık gelen ilk 5000 örnek kullanılmıştır.

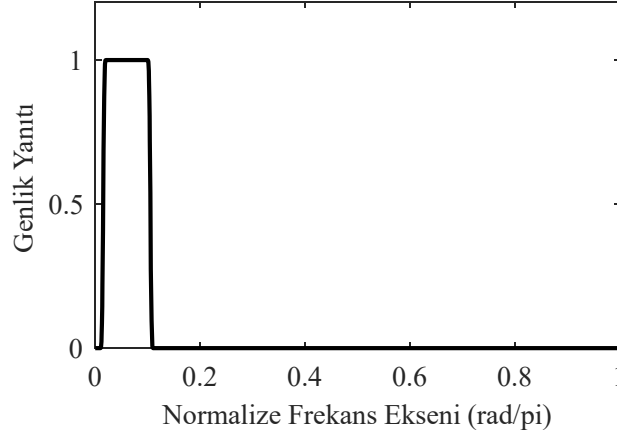
EKG işaretlerine kayıt sırasında bireylerin hareketi, veya elektrotların hareketinden kaynaklanan taban çizgisi sapmaları, elektrotlara etki eden aralıklı mekanik kuvvetlerin neden olduğu elektrot hareketi gürültüsü, kas gürültüsü (EMG) ve güç hattı girişimleri gibi çeşitli gürültüler karışmaktadır. EKG işareti, önerilen yaklaşımla tasarlanmış bir bant geçiren süzgeç kullanılarak gürültüden arındırılmıştır. Bant geçiren süzgecin frekans yanıtı Şekil 12'de görülmektedir. Bu süzgecin geçirme bandı kesim frekansı 0,02 rad., durdurma bandı kesim frekansı 0,1 rad. ve derecesi 128 olarak belirlenmiştir. Yeterli faz gecikmesine sahip önerilen süzgeç ile süzgeçlenmiş EKG işareti ise Şekil 13'te görülmektedir.

Tablo 5. Alt bant olarak hedeflenen ve süzgeçlenen işaretin gücü (Power of desired and filtered signal as sub band)

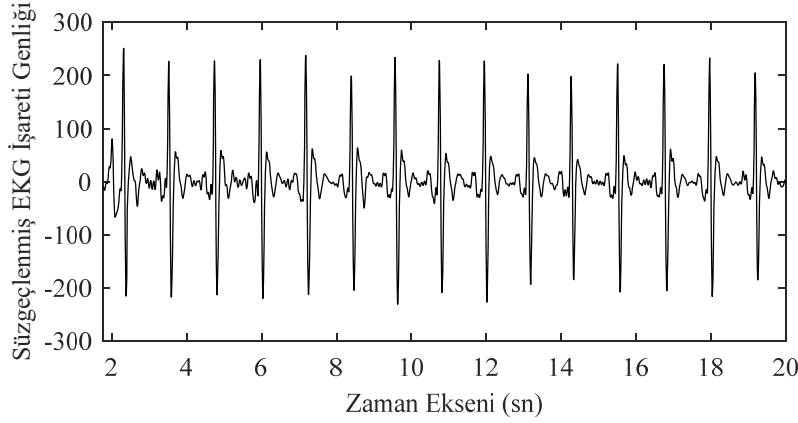
Sentetik İşaret Alt Bant	Süzgeç Tasarım Metodu	Süzgeçlenen İşaretin Geçirme Bandındaki Gücü	Süzgeçlenen İşaretin Durdurma Bandındaki Gücü	Geçirme ve Durma Bandında İşaret Gücü Oranı
1.Band	Önerilen	489,3	0,8527	573,8
	PM (Parks & McClellan)	596,4330	1,6867	353,6055
	En Küçük Kareler Liner Faz FIR Süzgeç	493,9317	0,6925	713,2252
2.Band	Önerilen	496,5	0,4612	1076,5
	PM (Parks & McClellan)	425,9248	12,9421	32,9100
	En Küçük Kareler Liner Faz FIR Süzgeç	463,9350	0,5648	821,4190
3. Band	Önerilen	496,4	0,3765	1318,5
	PM (Parks & McClellan)	425,9217	12,9452	32,9020
	En Küçük Kareler Liner Faz FIR Süzgeç	463,9324	0,5677	817,2378
4. Band	Önerilen	489,6	0,2791	1754,0
	PM (Parks & McClellan)	596,4550	1,6637	358,5191
	En Küçük Kareler Liner Faz FIR Süzgeç	493,9531	0,6703	736,8821



Şekil 11. EKG İşareti (ECG signal)



Şekil 12. EKG işaretini süzgelemek için kullanılan bant geçiren süzgecin frekans yanıtı (Frequency response of band-pass filter for filtering of ECG signal)



Şekil 13. Yeterli faz gecikmesine sahip gürültüsüz EKG işareti (Denoised ECG signal with enough phase delay)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, yüksek performanslı FIR süzgeç tasarımı için IIR süzgecin dürtü yanıtı kullanılan yeni bir yöntem önerilmektedir. Literatürdeki süzgeç tasarım tekniklerinin çoğu, geçirme ve durdurma bandı dalgalanmalarını minimize etmeye odaklanmaktadır. Bu çalışmada ise geçiş bandı büyüklüğü de minimize edilerek, Butterworth ve Chebyshev süzgeçlerine ait sadece iki parametrenin optimizasyonu ile süzgeç tasarımı gerçekleştirilmiştir. ABC ve PSO algoritmaları kullanarak süzgeç parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmada, ABC algoritması ile tasarlanan süzgecin performansının PSO algoritması ile tasarlanandan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, önceki bir çalışmada tekil spektrum analizine (SSA) dayalı çok amaçlı bir yaklaşım önerilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [30]. Bu çalışmada ise önceki çalışmadan, farklı bir tasarım yaklaşımı kullanılarak, IIR süzgeç özelliklerini kullanan yeni uygunluk fonksiyonuna dayalı bir süzgeç tasarımı önerilmiştir.

Butterworth temelli FIR süzgecin performansının, Chebyshev temelli FIR süzgeç performansından daha iyi olduğu ortaya koyulmuştur. PSO algoritması ile tasarlanan Chebyshev temelli FIR süzgeç ile geçirme ve durdurma bandı dalgalanması minimize edilmiş ancak elde edilen geçiş bandı genişlemiştir. Bu nedenle, IIR tabanlı FIR süzgeç tasarımı için tüm süzgeç performans parametrelerini eşit olarak dikkate alan tasarımın gerçekleştirildiği önerilen yaklaşımda, süzgeç parametreleri ABC algoritması kullanılarak optimize

edilmiştir. Butterworth veya Chebyshev yaklaşımının süzgeç tasarımındaki performansları incelendiğinde Butterworth temelli FIR süzgecin toplam hatasının Chebyshev temelli FIR süzgeçten daha az olduğu görülmektedir. Önerilen süzgeç için sadece iki parametre (süzgeç derecesi ve kesme frekansı) optimize edilerek optimal süzgeç tasarlanabilmiştir.

Tasarlanan alçak geçiren süzgecin performansı, geçirme bandı dalgalanması, durdurma bandı zayıflaması ve geçiş bandı parametreleri kullanılarak literatürde yer alan süzgeçler ile karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlarla ilgili olarak, önerilen yaklaşım ile elde edilen süzgecin, IIR ve FIR süzgeçlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırarak yeni uygunluk fonksiyonlarıyla diğer literatür süzgeçlere göre yüksek performans gösterdiği ve daha iyi bir alternatif sunduğu görülmüştür. Ayrıca, önerilen süzgeç ve geleneksel (PM, En Küçük Kareler Algoritması) süzgeçler, iki farklı frekansı içeren bir sinüzoidal işarete uygulanmıştır. Süzgeçlenen işaret görsel olarak incelendiğinde, önerilen süzgecin kullanıldığı işaretin faz gecikmesinin diğer geleneksel süzgeçlerden daha iyi olduğu gösterilmiştir. Optimizasyon sırasında, faz gecikmesi uygunluk fonksiyonu ile değerlendirilmiştir. Bu nedenle, önerilen süzgecin faz gecikmesi azaltılmıştır. Ek olarak, işareti alt bant frekanslarına ayırtırmak için dört farklı frekanslı sinüzoidal bileşen içeren bir işarete geleneksel süzgeçler ve önerilen süzgeç uygulanmıştır. Bu amaçla, farklı kesim frekanslarına sahip kosinüs modülasyonlu bir süzgeç bankası elde etmek için bir prototip süzgeç tasarlanmıştır.

Tasarlanan süzgecin performansına ilişkin sayısal sonuçları göstermek üzere işaretin geçirme ve durdurma bandındaki gücü hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen IIR temelli FIR süzgecin istenmeyen işareti yaygın olarak kullanılan diğer geleneksel süzgeçlere göre daha iyi zayıflatıldığı görülmüştür. Ek olarak, gürültülü EKG işareti önerilen yaklaşımla tasarlanan bir bant geçiren süzgeç kullanılarak başarıyla gürültüsü bastırılmıştır. Biyomedikal EKG sinyali üzerinde gerçekleştirilen bu uygulama ile önerilen yaklaşımın performansı ortaya konmuştur.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-2019-8760 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynaklar (References)

- Oppenheim, A.V., Ronald W. S., and John R. B., Discrete-Time Signal Processing, NJ: Prentice Hall, 1999.
- Najarian K., Splinter R., Biomedical Signal and Image Processing, CRC Press, 2012
- Proakis J.G., Manolakis D.K., Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications, Prentice Hall, 1996.
- Parks, T. W., and Burrus C.S., Digital Filter Design, New York: John Wiley & Sons, 54–83, 1987.
- San-José-Revuelta L.M., Arribas J.I., A new approach for the design of digital frequency selective FIR filters using an FPA-based algorithm, Expert Systems With Applications, 106, 92–106, 2018.
- Kar R., Mandal D., Mondal S., Ghoshal S.P., Crazyness Based Particle Swarm Optimization Algorithm for FIR Band Stop Filter Design, Swarm and Evolutionary Computation, 7, 58–64, 2012
- Dasha J., Damb B., Swainca R., Design of multipurpose digital FIR double-band filter using hybrid firefly differential evolution algorithm, Applied Soft Computing, 59, 529–545, 2017.
- Aggarwal A., Rawat T.K., Upadhyay D.K., Design of optimal digital FIR filters using evolutionary and swarm optimization techniques, Int. J. Electron. Commun. (AEÜ) 70, 373–385, 2016.
- Ababneh J.I., Bataineh M.H., Linear phase FIR filter design using particle swarm optimization and genetic algorithms, Digital Signal Processing 18 657–668, 2008.
- Saha S.K., Ghoshal S.P., Kar R., Mandal D., Cat Swarm Optimization algorithm for optimal linear phase FIR filter design, ISA Transactions, 52, 781–794, 2013.
- Dwivedi A.K., Ghosh S., Londhe N.D., Review and Analysis of Evolutionary Optimization-Based Techniques for FIR Filter Design, Circuits Syst Signal Process, 37, 4409–4430, 2018
- Tsai J.T., Chou J.H., Liu T.K., Optimal design of digital IIR filters by using hybrid Taguchi genetic algorithm, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53, 867–879, 2006
- Yu Y., Xinjie Y., Cooperative coevolutionary genetic algorithm for digital IIR filter design, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54, 1811–1819, 2007.
- Kalinli A., Karaboga N., Artificial immune algorithm for IIR filter design, Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence, 18, 919–929, 2005.
- Vanuysel G., Boets P., Van Biesen L., Temmerman S., Efficient hybrid optimization of fixed-point cascaded IIR filter coefficients, in: Proc. IEEE Instrumentation and Measurement, May, 793–797, 2002.
- Wang Y., Li B., Chen Y., Digital IIR filter design using multi-objective optimization evolutionary algorithm, Applied Soft Computing, 11, 1851–1857, 2011
- Gray, A., The Intuitive Idea of Distance on a Surface, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 341-345, 1997.
- Li R., Zhong W. and. Zhu L., Feature screening via distance correlation learning. Journal of the American Statistical Association, 107 (499), 1129-1139, 2012.
- Melter R.A., Some characterizations of city block distance, Pattern Recognition Letters, 6, 235-240, 1987.
- Karaboga D., An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Technical Report TR06, Computer Engineering Department, Erciyes University, Turkey, 2005.
- Karaboga N., A new design method based on artificial bee colony algorithm for digital IIR filters, J.Frankl.Inst., 346, 328–348, 2009.
- J. Kennedy, R.C. Eberhart, Particle swarm optimization, in: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1942–1948, 1995.
- Kennedy J., Eberhart R.C., Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann, San Francisco, 2001.
- Karaboga N. and Cetinkaya B., Design of Digital FIR Filters using Differential Evolution Algorithm, Circuits Systems Signal Processing, 25 (5), 649–660, 2006.
- Saha, S. K., Kar, R., Mandal, D., Ghoshal, S. P., Bacteria foraging optimization algorithm for optimal FIR filter design, International Journal of Bio-Inspired Computation, 5, 52–66, 2013.
- Singh, A. P., Design of linear phase low pass fir filter using particle swarm optimization algorithm. International Journal of Computer Applications, 98 (3), 40–44, 2014.
- Erturan M.B., Merdivenci F., Optimized ARIMA-ANN hybrid model for time series analysis. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (2), 1019-1032, 2022.
- <https://physionet.org/physiobank/database/nstdb/>
- Moody GB, Muldrow WE, Mark RG., A noise stress test for arrhythmia detectors, Computers in Cardiology; 11, 381-384, 1984.
- Latifoğlu F, A Novel Singular Spectrum Analysis Based Multiobjective Approach For Optimal FIR Filter Design Using Artificial Bee Colony Algorithm, Neural Computing & Applications, 32, 13323–13341, 2020.