



Optimizasyon Tabanlı FIR Süzgeç Tasarımlarında Performans Analizi

Mehmet Fatih Karakaş^{1,2*}, Fatma Latifoğlu²

^{1*} Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

^{1*} Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye
(ORCID: 0000-0003-0233-6141), karakasmf@gmail.com

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye
(ORCID: 0000-0003-2018-9616), flatifoglu@erciyes.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 28 Haziran 2021 ve Kabul Tarihi 15 Aralık 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.958748)

ATIF/REFERENCE: Karakas, M. F., Latifoglu F. (2021). Optimizasyon Tabanlı FIR Süzgeç Tasarımlarında Performans Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31), 8-22.

Öz

There are two types of digital filters designed and used on digital signal processing systems: finite impulse response (FIR) and infinite impulse response (IIR). There are two approaches used during the design of FIR filters. The first of these is classical methods, while the other is optimization-based methods. The use of metaheuristic algorithms in optimization-based methods has been increasing in recent years, especially in order to realize more performance filter designs. In order to design a filter as close to the ideal as possible, in this study, FIR filter designs were carried out with metaheuristic algorithms using the multi-objective error approach, and the performance parameters of these designed filters were analyzed. FIR filter coefficients were optimized using Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization Algorithm, Artificial Bee Colony Algorithm, Black Widow Algorithm, Squirrel Search Algorithm, and Harmony Search Algorithm. When the obtained results and literature studies were compared, it was seen that there were significant improvements in the performance parameters of the FIR filter obtained with the proposed approach

Anahtar Kelimeler: Metasezgisel Algoritmalar, FIR Filtre Tasarımı, Sinyal İşleme, Optimizasyon.

Performance Analysis in Optimization Based FIR Filter Designs

Abstract

There are two types of digital filters designed and used on digital signal processing systems: finite impulse response (FIR) and infinite impulse response (IIR). There are two approaches used during the design of FIR filters. The first of these is classical methods, while the other is optimization-based methods. The use of metaheuristic algorithms in optimization-based methods has been increasing in recent years, especially in order to realize more performance filter designs. In order to design a filter as close to the ideal as possible, in this study, FIR filter designs were carried out with metaheuristic algorithms using the multi-objective error approach, and the performance parameters of these designed filters were analyzed. FIR filter coefficients were optimized using Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization Algorithm, Artificial Bee Colony Algorithm, Black Widow Algorithm, Squirrel Search Algorithm, and Harmony Search Algorithm. When the obtained results and literature studies were compared, it was seen that there were significant improvements in the performance parameters of the FIR filter obtained with the proposed approach.

Keywords: Metaheuristic Algorithms, FIR Filter Design, Signal Processing, Optimization.

* Sorumlu Yazar: Mehmet Fatih Karakaş, ORCID: 0000-0003-0233-6141, karakasmf@gmail.com

1. Giriş

Dijital Sinyal İşleme (DSP) sistemleri üzerinde tasarlanan basit yapı bloklarına dijital süzgeçler denir (Litwin, 2000). Dijital süzgeçler bir sinyalin frekans ekseninin belirli bileşenlerini istenen çıkış sinyaline göre güçlendirmek, şekillendirmek için kullanılan sistemlerdir. Sonsuz dürtü yanıtı (IIR) süzgeçler ve sonlu dürtü yanıtı (FIR) süzgeçler olmak üzere iki ana süzgeç türü vardır. FIR süzgeçler her bir giriş dizisinin ağırlıklı toplamlarından oluşan lineer zamanla değişmeyen (LZD) sistemlerdir. Her zaman durağan olan bu sistemler lineer faz yanıtına sahiptir ve bu avantajları dolayısıyla geniş kullanım alanları bulunmaktadır. FIR süzgeçler gürültü azaltma, istenen frekans iyileştirme ya da bastırma gibi hem sinyallere hem de görüntülere uygulanabilmektedir (Oppenheim, 1999). Dijital süzgeçler aynı zamanda elektrokardiyografi (EKG) gibi biyomedikal sinyaller üzerine gürültü azaltma, özellik çıkarımı gibi çeşitli analizleri gerçekleştirme amacıyla da uygulanmaktadır.

FIR süzgeç tasarımı konusunda 2 yaklaşım mevcuttur. Bunlardan ilki klasik yöntemler diğeri ise optimizasyon tabanlı yöntemlerdir. Klasik yöntemlerde pencereleme, frekans örnekleme, ağırlıklı en küçük kareler veya eşdüzey yöntemi ile adaptif FIR süzgeç tasarımı mümkündür. Ancak bu yöntemlerde geçirme ve durdurma bandı dalgalanmaları, geçiş bandı genişliği, geçirme ve durdurma bandı kesim frekansı gibi parametreler tam istenildiği gibi kontrol edilememektedir. Diğer bir yaklaşım olan optimizasyon tabanlı tasarımlarda bu parametreler bir hata fonksiyonu olarak tanımlanarak bu hata fonksiyonunun minimum yapılması amaçlanmaktadır. FIR süzgeç dizaynı konusunda optimizasyon tabanlı çeşitli uygulamalar bulunmaktadır (Parks & Burrus, 1987; Proakis, 2001).

Optimizasyon tabanlı süzgeç tasarımlarında çeşitli yaklaşımlar ve yöntemler kullanılmaktadır. Literatürde optimizasyon tabanlı süzgeç tasarımı için; Genetik Algoritma (GA) (N. Karaboga & Cetinkaya, 2004; Kaya & İnce, 2011; Najjarzadeh & Ayatollahi, 2008; Zhang et al., 2003), Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması PSO (Chen & Luk, 2010; Gupta & Mehra, 2011; Najjarzadeh & Ayatollahi, 2008), Diferansiyel Gelişim Algoritması (DE) (N. Karaboga, 2005; N. Karaboga & Cetinkaya, 2006; Reddy & Sahoo, 2015), Yapay Arı Kolonisi Algoritması (ABC) (Bose et al., 2014; N. Karaboga, 2009; Karaboğa & Çetinkaya, 2011; Latifoğlu, 2020; Latifoğlu, 2013), Harmoni Arama Algoritması (HA) (Manuel & Elias, 2012; Saha et al., 2013), Sincap Arama Algoritması (SSA) (Karakaş & Latifoğlu, 2020; Nagasirisha & Prasad, 2020) kullanılan çalışmalar mevcuttur. Ancak Karadul Örümceği Algoritması (BWO) için herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca Kumar ve ark. 2021 yılında yaptığı “Dijital Filtre Tasarımı İçin Optimizasyon Algoritmalarının İncelenmesi ve Analizi” isimli araştırma çalışmasında bu algoritmalarla yapılmış filtre tasarımları incelenmiştir (S. Kumar & others, 2021).

İdeal yapıdaki bir FIR süzgeç zaman ekseninde ileri yönlü fark denklemleri kullanılarak

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

şeklinde ifade edilmektedir.

Bu denklemde b_k FIR süzgeç katsayılarıdır. Bir LZD sistemin dürtü yanıtı $h[n]$, sistem girişine uygulanan $\delta[n]$ lerin toplamı şeklinde gösterilebilir ve ideal olmayan M. dereceden bir FIR süzgeç için

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

şeklinde tanımlanabilir.

$h[n]$ hesaplanarak elde edilen FIR süzgecin Z eksenindeki transfer fonksiyonu

$$H[Z] = \sum_{k=0}^M b_k Z^{-k} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanır.

FIR süzgece ait olan b_k katsayıları yukarıda bahsi geçen optimizasyon algoritmaları kullanılarak optimize edilecek parametreler olarak belirlenebilmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmada optimizasyon tabanlı FIR süzgeç tasarlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Genetik Algoritma, Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması, Diferansiyel Gelişim Algoritması, Yapay Arı Kolonisi Algoritması, Karadul Örümceği Algoritması, Sincap Arama Algoritması, Harmoni Arama Algoritması kullanarak b_k katsayıları optimize edilmiştir. Optimizasyon işlemi sırasında amaç fonksiyonu çoklu parametreye dayalı olarak elde edilmiştir.

Özet olarak bu çalışma;

- FIR süzgeç tasarımında Karadul Örümceği Algoritmasının ilk defa kullanılıyor olması açısından,
- Yukarıda belirtilen optimizasyon algoritmalarının tümünün FIR süzgeç tasarımında performansının test edilerek ilk defa karşılaştırılması açısından,
- Amaç fonksiyonunun çoklu performans parametresine bağlı olarak gerçekleştirilmesi açısından,

özgünlük içermektedir.

Makalenin organizasyonu şu şekildedir; 2. bölüm materyal ve metoddan oluşmaktadır ve süzgeç tasarımı için kullanılan algoritmalar ile gerçekleştirilen işlem adımları kısaca açıklanmıştır. 3. bölümde süzgeç tasarımına ait performans sonuçları verilmiştir ve elde edilen bulgular tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde süzgeç tasarımı için kullanılan optimizasyon algoritmaları kısaca açıklanmıştır. Kullanılan hata fonksiyonlarının ve süzgeç performans parametrelerinin eldesi ortaya konulmuştur. Algoritmalarla ilişkin kontrol parametrelerini belirlemek için literatürde bu algoritmalar ile yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir. İncelenen çalışmalardaki kontrol parametreleri ufak değişiklikler göstermekte olup genel itibarı ile standartlaşmıştır. Bu nedenle bu parametreler ve değişik değerlerdeki parametreler ile testler yapılarak en optimum

parametreler belirlenmiştir. Buna göre belirlenen algoritma kontrol parametreleri Tablo 1-2-3-4-5-6-7’de verildiği üzeredir.

Tüm analizler Windows-10 işletim sistemine, 3 GHz AMD Ryzen 5 4600H işlemci, 8 GB 3200 MHz RAM ve 4 GB NVIDIA GeForce GTX 1650 ekran kartı kullanan bir bilgisayar üzerinde MATLAB 2020b kullanılarak yapılmıştır.

2.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritma (GA); stokastik arama sürecine dayanan bir optimizasyon tekniğidir. Darwin’in yaşayan canlıların doğal evrim süreçleri ilham alınarak tasarlanmıştır. Doğal seçim ve üreme olmak üzere iki adet mekanizmadan oluşur bu optimizasyon tekniğinde en iyi bireylere ait özellikler genetik miras olarak sonraki nesle aktarılarak küresel en iyiye yaklaşım gerçekleştirilir. Tekrarlı üreme ile uygunluk değeri yüksek olan bireylerin hayatta kalması ve sayılarının artması, uygunluk değeri düşük olan bireylerin ise sayılarının azalarak kaybolması amaçlanır. Çaprazlama ile iki bireyden yeni iki birey elde edilir. Çaprazlama iyi bireyler kullanılarak daha iyi bireylerin elde edilmesi amacıyla yapılır. Mutasyon ile elde bulunan çözümlerin değiştirilerek yeni bireyler elde edilmesi amaçlanır. Mutasyon sayesinde yerel minimum değerlere takılmadan küresel bir arama gerçekleştirilmesi sağlanır (Holland & others, 1992; Jarraya & Bourri, 2012)

Genetik algoritmanın temel adımları aşağıdaki gibidir;

- Rastgele değerlerden oluşan N kromozomlu bir popülasyonun oluşturulması.
- Her kromozoma ait uygunluk değerlerinin hesaplanması.
- Durdurma kriterini kontrol et, durdurma kriteri sağlanana kadar aşağıdaki adımların tekrarlanması
 - Bir çift ebeveyn kromozom seçilmesi.
 - Çaprazlamanın yapılması.
 - Mutasyonun yapılması
- Adım 2’ye geri dön.

Bu çalışmada süzgeç tasarımı aşamasında GA için parametrelerin seçimi deneysel olarak belirlenmiş ve Tablo 1’de bu parametreler verilmiştir.

Tablo 1 GA Parametreleri

Parametreler	Değerler
Çaprazlama Oranı	0,650
Mutasyon Oranı	0,100
Elit Birey Oranı	0,250

2.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO); sürü halinde hareket eden canlıların yiyecek arama, güvenlik gibi genellikle rastgele sergiledikleri hareketleri taklit ederek optimum çözüme ulaşmayı hedefleyen bir algoritmadır. PSO’da; bireylerin yani parçacıkların kendi aralarında gerçekleştirmiş oldukları sosyal bilgi paylaşımını temel alarak bu parçacıkların sürü içerisinde bulunan en iyi parçacığa yaklaştırılması esas alınmaktadır. Parçacıklar eski konumlarının bilgisini kullanarak kendilerini sürü içerisindeki en iyi parçacığa doğru yönlendirir. Bu

yaklaşma işlemi rastgele sürdürülür ve optimum çözüme ulaşılan kadar devam eder (Clerc & Kennedy, 2002).

PSO algoritmasının temel adımları aşağıdaki gibidir;

- Bütün parçacıklar için başlangıç hız ve konum değerleri ile algoritma başlangıç parametrelerinin belirlenmesi.
- Bütün parçacıkların uygunluk değerlerini belirlenmesi.
- Yerel ve küresel en iyi çözümleri belirlenmesi.
- Bütün parçacıklar için; hız ve pozisyon değerlerinin güncellenmesi.
- Durdurma kriterini kontrol et, durdurma kriteri sağlanmıyorsa Adım 2’ye geri dön.

Bu çalışmada süzgeç tasarımı aşamasında PSO için parametrelerin seçimi deneysel olarak belirlenmiş ve Tablo 2’de bu parametreler verilmiştir.

Tablo 2 PSO Parametreleri

Parametreler	Değerler
Çaprazlama Oranı	0,650
Mutasyon Oranı	0,100
Elit Birey Oranı	0,250

2.3. Diferansiyel Gelişim Algoritması

Diferansiyel gelişim algoritması (DE); çalışma prensibi bakımında genetik algoritmaya oldukça benzeyen popülasyon tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır. Sürekli değişkenli problemlerin çözümüne yönelik olarak geliştirilen DE, GA’da olduğu gibi popülasyona dayalı olarak çalışmak yerine tek tek kromozomlar üzerinde mutasyon ve çaprazlama operatörlerinin işleme geçirilmesi ile yeni bireyleri elde eder (Storn & Price, 1997).

DE algoritmasının temel adımları aşağıdaki gibidir:

- Başlangıç popülasyonunun oluşturulması.
- Uygunluk değerlerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi.
- Durdurma kriterini kontrol et, durdurma kriteri sağlanana kadar aşağıdaki adımların tekrarlanması.
 - Mutasyon
 - Rekombinasyon
 - Seleksiyon
- Adım 2’ye geri dön

Bu çalışmada süzgeç tasarımı aşamasında DE için aşağıdaki tabloda belirtilen parametreler kullanılmıştır. Parametrelerin seçimi deneysel olarak belirlenmiş ve Tablo 3’de bu parametreler verilmiştir.

Tablo 3 DE Parametreleri

Parametreler	Değerler
Beta Min	0,200
Beta Max	0,800
Çaprazlama Olasılığı	0,200

2.4. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Yapay Arı Kolonisi (ABC); bal arılarının yiyecek arama davranışı esnasında arıların kendi aralarında iletişime geçerek en iyi yiyeceğin bulunduğu yani optimum çözümün bulunduğu konum bilgisinin birbirleri arasında paylaşılması ve bu konum bilgisinin güncellenmesi esasına dayanmaktadır. Her arı bir yiyecek kaynağına konumlanarak bu kaynağın komşularının çözümleri araştırılır. Bu algoritmada üç çeşit arı bulunmaktadır ve bu arı türlerinin davranışları birbirinden farklıdır. İşçi arılar, hafıza elemanı olarak görev alarak hafızada tuttuğu kaynağın komşuluklarında bulunan çözümleri araştırarak bulunduğu daha iyi çözümlerle hafızasını günceller. Gözcü arılar; bir hafıza elemanına sahip değildir. İşçi arılardan elde edilen bilgiye göre uygunluk değeri yüksek olma ihtimali olan bir kaynağı yiyecek kaynağı olarak seçer. Gözcü arı seçilen bu kaynağın komşuluklarını araştırarak daha iyi olan çözümlerle kaynağın konum bilgisini günceller. Bir kaynağın araştırılma sayısının bir limit değerine ulaşması bu kaynaktaki yiyeceğin tükendiği anlamına gelir. Kaynakta bulunan arı araştırmayı bırakarak kaşif arı olur. Bu kaşif arı araştırma yapmak üzere rastgele yeni bir kaynak seçer. Bu rastgele kaynak seçimi yerel minimumlara algoritmanın takılmasını engellemek içindir (D. Karaboga, 2005).

ABC algoritmasının temel adımları aşağıdaki gibidir:

- Başlangıç yiyecek kaynaklarının rassal bir şekilde üretilmesi.
- İşçi arıların bu kaynaklara yine rassal olarak yönlendirilmesi.
- Olasılıksal seçimde kullanılmak üzere bulunan yeni çözüm için olasılık değerinin hesaplanması.
- Hesaplanan olasılık değerine göre gözcü arıların yiyecek kaynağına gönderilmesi.
- Nektarı biten kaynağın bırakılması ve kaşif arı üretimi.

Bu çalışmada süzgeç tasarımı aşamasında ABC için parametrelerin seçimi deneysel olarak belirlenmiş ve Tablo 4’de bu parametreler verilmiştir.

Tablo 4 ABC Parametreleri

Parametreler	Değerler
Terketme Limit Oranı	0,600
Hızlandırma Katsayısı	1,000

2.4. Karadul Örümceği Optimizasyon Algoritması

Karadul Örümcek Algoritması (BWO); karadul örümceklerinin üreme ve sonrasında ortaya çıkan yeni yavruların birbirleri arasındaki hayatta kalma ilişkilerini taklit eden popülasyon tabanlı bir algoritmadır. Karadul örümceklerinin dişi bireyleri üreme sonrasında erkek bireyleri yer. Daha sonrasında ortaya çıkan yeni yavrular arasında da yamyamlık gözükür. Bu yamyamlık neticesinde yavru karadul örümcekleri arasında güçlü olanlar hayatta kalarak güçsüz olanlar yok olur. Yavrular yeterince büyüdükten sonra annelerine de yamyamlık yapma ihtimalleri bulunmaktadır. Genetik algoritmaya çaprazlama, mutasyon gibi parametreler konusunda oldukça benzer olan bu yeni nesil algoritmada ekstra olarak yamyamlık durumu bulunmaktadır (Hayyolalam & Pourhaji Kazem, 2020).

BWO algoritmasının temel adımları aşağıdaki gibidir:

- Başlangıç popülasyonunun rastgele oluşturulması.
- Bütün bireylere ait uygunluk değerlerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi.
- Durdurma kriterini kontrol et, durdurma kriteri sağlanana kadar aşağıdaki adımların tekrarlanması.
 - Bir çift ebeveyn seçilmesi.
 - Çaprazlamanın yapılması.
 - Yamyamlık
 - Mutasyon
 - Popülasyonun güncellenmesi
- Adım 2’ye geri dön.

Bu çalışmada süzgeç tasarımı aşamasında BWO için parametrelerin seçimi deneysel olarak belirlenmiş ve Tablo 5’de bu parametreler verilmiştir.

Tablo 5 BWO Parametreleri

Parametreler	Değerler
Çaprazlama Oranı	0,800
Mutasyon Oranı	0,400
Yamyamlık Oranı	0,500

2.5. Sincap Arama Algoritması

Sincap arama algoritması (SSA); uçan sincapların yiyecek arama ve hayatta kalma döngülerini taklit eden bir algoritmadır. Burada uçan sincap olarak adlandırılan keseliler süzülme hareketi yaparak yaşadıkları ağaçlar arasında hızlı bir şekilde pozisyon değiştirmektedirler. Bu pozisyon değiştirme işlemi yiyecek kaynağı açısından sıradan olan meşe palamudu ağaçları ile normal ağaçlardan yiyecek kaynağı açısından bol olan Kuzey Amerika Cevizi ağacına doğrudur. Bu pozisyon değiştirme işlemi mevsim durumuna göre ve ortamda bulunan yırtıcı olasılığından etkilenir. Eğer yırtıcı olasılığı belirlenen değerden yüksek ise hareket eden sincap ölür ve yeni bir sincap popülasyona dahil edilir. Mevsim durumu yaz iken hareket halinde olan sincaplar mevsim durumu kış olduğundan yani durdurma kriteri sağlandığında yeterince yiyecek toplamış ve küresel optimuma yaklaşmış var sayılırlar (Jain et al., 2019).

SSA algoritmasının temel adımları aşağıdaki gibidir:

- Rastgele konumlarda sincapların oluşturulması.
- Sincapların uygunluk değerlerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi.
- Uygunluk değerlerine göre sincapların sıralanması ve bu sincaplar arasından rastgele seçimlerin yapılması.
 - En iyi uygunluk değerine sahip olan sincap Amerikan ceviz ağacında varsayılır.
 - Sonraki en iyi uygunluk değerine sahip 3 sincap meşe palamudu ağacında varsayılır.
 - Kalan sincaplar normal ağaçta var sayılır
- Sincaplar harekete geçmesi. Sincap hareketi 3 durumda olabilir.
 - Meşe palamudu ağacındaki sincaplar ortamda bulunan yırtıcı olasılığı göz önüne alınarak Amerikan ceviz ağacına doğru hareket edebilir.

- Normal ağaçlarda bulunan sincaplar ortamda bulunan yırtıcı olasılığı göz önüne alınarak Amerikan ceviz ağacına doğru hareket edebilir.
- Normal ağaçlarda bulunan sincaplar ortamda bulunan yırtıcı olasılığı göz önüne alınarak meşe palamudu ağacına doğru hareket edebilir.
- Mevsim durumunun kontrol edilmesi. Eğer kış mevsimi ise sincaplar rastgele konumlarda tekrar oluşturulur, değilse algoritma devam eder.
- Adım 2' ye geri dön.

Bu çalışmada süzgeç tasarımı aşamasında SSA için parametrelerin seçimi deneysel olarak belirlenmiş ve Tablo 6'da bu parametreler verilmiştir.

Tablo 6 SSA Parametreleri

Parametreler	Değerler
Yırtıcı Olasılığı	0,100
Süzülme Katsayısı	1,900
Meşe Palamudu Oranı	0,600

2.6. Harmoni Arama Algoritması

Harmoni Arama Algoritması (HA); müzik tabanlı bir meta sezgisel algoritma olarak optimizasyon problemlerini çözmek amaçlı geliştirilmiştir (Geem et al., 2001). HA'da her müzisyen, daha iyi parçalar çalmak amacıyla amacına uygun olan iyi notları yani yerel çözümleri hafızasında tutar. Bu algorithma bir müzisyen üç farklı şekilde en iyi harmoniyi, küresel çözümü, müzik parçasını bulur;

- Hafızasında tuttuğu be iyi olduğunu düşündüğü bir notayı çalarak. (Ezberleme)
- Hafızasındaki bu notayı iyileştirerek. (İyileştirme)
- Rastgele notalar üretmek. (Geliştirme)

HA algoritmasının temel adımları aşağıdaki gibidir:

- Başlangıç parametrelerini ve rastgele notaları oluştur.
- Esinlenme ile yeni bir çözüm oluştur.
- Çözümleri hesapla ve değerlendir.
- Sonlandırma kriterini kontrol et. Sağlanıyorsa algoritmayı durdur. Sağlanmıyorsa Adım 2'ye geri dön.

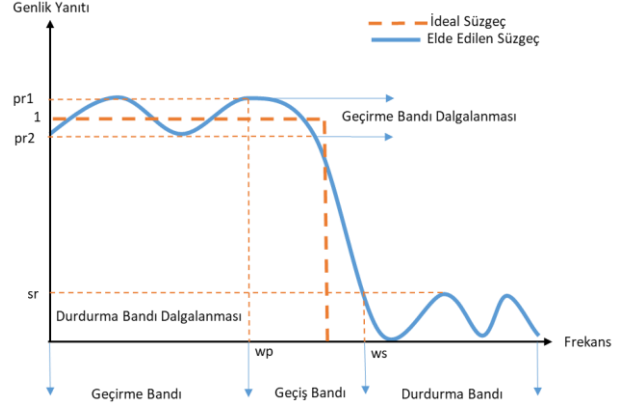
Bu çalışmada süzgeç tasarımı aşamasında HA için parametrelerin seçimi deneysel olarak belirlenmiş ve Tablo 7'de bu parametreler verilmiştir.

Tablo 7 HA Parametreleri

Parametreler	Değerler
Yeni Harmoni Sayısı	20,000
Harmoni Hafızası Önem Oranı	0,900
Adım Ayarlama Oranı	0,100
Perde Genişliği Azaltma Oranı	0,995

2.6. Hata Fonksiyonunun Tanımlanması

Bu çalışmada FIR süzgece ait b_k katsayıları, optimize edilecek parametreler olarak belirlenmiştir. b_k katsayılarının değerlerine göre ideal olmayan FIR süzgecin performans parametreleri belirlenmektedir. Bu parametreler Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. FIR Filtre Parametreleri

İdeal olmayan FIR süzgece ait performans parametreleri aşağıda verilmektedir.

- Geçirme ve durdurma bandı dalganmaları ($pr1$, $pr2$, sr)

$$pr1 = \max \{ Peaks (H(e^{jw})) \} w \leq w_p$$

$$pr2 = \min \{ Peaks (-H(e^{jw})) \} w \leq w_p$$

$$sr = \max \{ Peaks (-H(e^{jw})) \} w \geq w_s$$

- Geçirme, geçiş ve durdurma bandı hataları (Ep , Et , Es)

$$Ep = \frac{1}{\pi} \sum_0^{w_p} [H(e^{j0}) - H(e^{jw})]^2$$

$$Et = [(H(e^{j\frac{1}{\pi}}) - (0.707H(e^{j0})))^2$$

$$Es = \frac{1}{\pi} \sum_{w_s}^{\pi} [H(e^{jw})]^2$$

- İdeal süzgeç ile elde edilen süzgeç arasındaki korelasyon

$$cc = korelasyon\{H(e^{jw}), H_{istenen}\}$$

İdeal süzgeç için yukarıda tanımlanan bütün parametrelerin sıfır olması gerekmektedir. Bu parametreler belirlenen algoritmalar için hata vektörü olarak belirlenmiştir ve hata vektörü ile hata fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

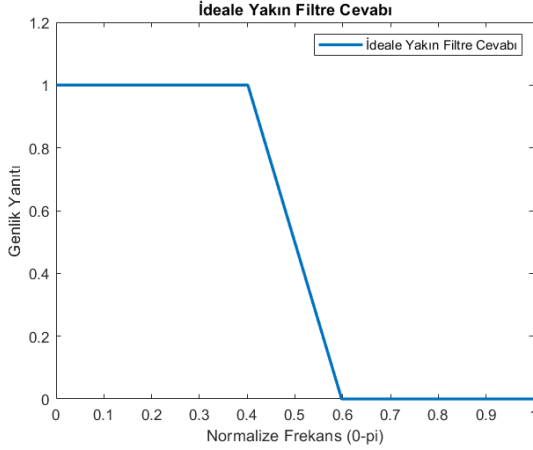
$$Hata(X) = [pr1, pr2, sr, Ep, Et, Es, cc]$$

$$ToplamHata = \sum_{i=1}^7 X_i$$

Süzgeç yapısı oluşturulurken; ideale yakın olması açısından geçirme bandı frekansı (w_p) olarak normalize frekans 0.49 rad/pi durdurma bandı frekansı (w_s) olarak normalize frekans 0.51 rad/pi belirlenmiştir. İdeale yakın süzgeç yapısı oluşturulurken aşağıdaki kod bloğu kullanılmıştır;

```
function hd = HDesired(wp,ws)
wd=1/1024:1/1024:1;
hx1=ones(1,length(find(wd<wp)));
hx2=linspace(1,0,length(find(wp<=wd&wd<=ws)));
hx3=zeros(1,length(find(wd>ws)));
hd=[hx1,hx2,hx3];
end
```

İdeale yakın süzgece ait frekans yanıtı Şekil 2'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 2. İdeale Yakın Süzgeç Frekans Yanıtı

Yukarıda bahsi geçen bütün algoritmalar için süzgeç katsayılarının hesaplanması için kullanılan parametreler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8 Algoritma Genel Parametreleri

Parametreler	Değerler
Popülasyon	100
İterasyon Sayısı	2500
wp	0,49
ws	0,51

Her bir algoritma ile elde edilen farklı derecelerdeki süzgeçler için performans parametreleri de incelenmiştir. Kullanılan performans parametreleri aşağıda verildiği üzere.

- Geçirme bandı maksimum dalgalanma miktarı

$$pr1 = \max \{ Peaks (H(e^{jw})) \}$$

$$w \leq w_p$$

- Durdurma bandı minimum dalgalanma miktarı

$$pr2 = \min \{ Peaks (-H(e^{jw})) \}$$

$$w \leq w_p$$

- Desibel cinsinden durdurma bandı zayıflaması

$$As = -20 \log \left(\max \{ Peaks (-H(e^{jw})) \} \right) w \geq w_s$$

- Geçirme bandı toplam hatası

$$Ep = \frac{1}{\pi} \sum_0^{wp} [H(e^{j0}) - H(e^{jw})]^2$$

- Durdurma bandı toplam hatası

$$Es = \frac{1}{\pi} \sum_{ws}^{\pi} [H(e^{jw})]^2$$

- Geçiş bandı toplam hatası

$$Et = [(H(e^{j\frac{1}{\pi}}) - (0.707H(e^{j0})))^2$$

- Toplam iterasyon süresi (total iter time)

3. Sonuçlar

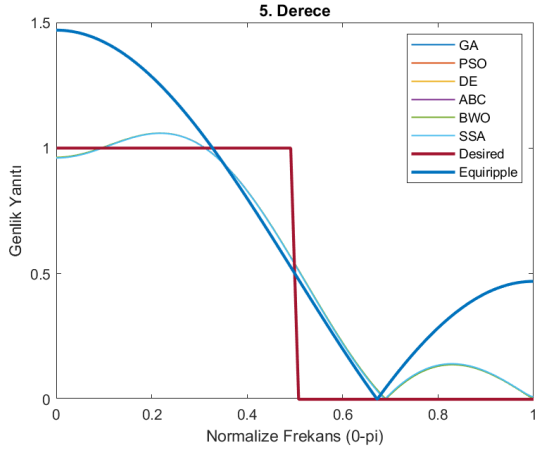
Bahsi geçen algoritmalar ve hata fonksiyonu kullanılarak elde edilen FIR süzgeçlere ait b_k katsayıları ve bu katsayılar ile elde edilmiş frekans yanıtları Tablo 10-11-12-13-14-15' de verilmiştir. Elde edilen tüm süzgeçler için ayrıca performans parametreleri karşılaştırmaları Tablo 16' de verilmiştir. Tablo 17'de tüm performans parametreleri için en iyi sonucu veren algoritma belirtilmiştir.

Örneğin tasarlanan 5. dereceden FIR süzgecin performans parametreleri incelendiğinde SSA algoritması ile optimize edilen süzgeç katsayılarına ait frekans yanıtının geçirme bandı maksimum dalgalanması, durdurma bandı toplam hatası, geçiş bandı hatası diğer algoritmalarla göre daha iyi sonuç vermiştir.

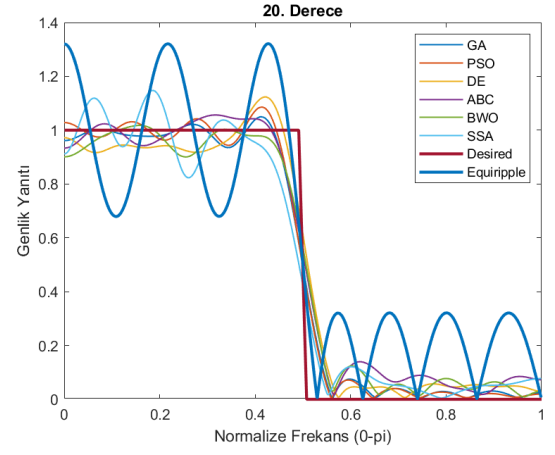
30. dereceden FIR süzgecin performans parametreleri incelendiğinde ise PSO algoritması ile optimize edilen süzgeç katsayılarına ait frekans yanıtının geçirme bandı minimum dalgalanması, geçirme bandı toplam hatası ve durdurma bandı toplam hatası diğer algoritmalarla göre daha iyi sonuç vermiştir.

Tasarlanan süzgecin performansı klasik yöntemlerden olan equiripple FIR süzgeç yapısı ile karşılaştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda tüm süzgeç dereceleri için optimizasyon algoritmaları ile elde edilen frekans yanıtları ve equiripple yöntemi ile elde edilen frekans yanıtları Şekil 3-4-5-6-7-8'de görülmektedir. Şekiller incelendiğinde; önerilen yöntemin geçirme bandı dalgalanmaları, durdurma bandı dalgalanmaları ve bunlara ait performans parametrelerinin daha üstün olduğu açıkça görülmektedir.

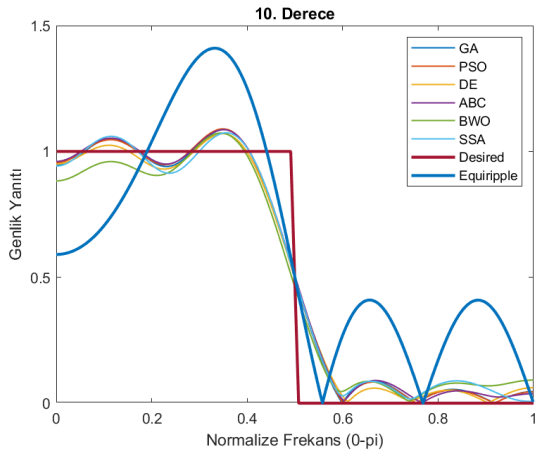
Literatür çalışmalarında hata fonksiyonunun eldesi aşamasında genellikle geçirme ve durdurma bandı hataları toplamı (Aggarwal et al., 2016; Saha et al., 2014; Shao et al., 2017) ya da istenilen frekans yanıtı ile tasarlanan frekans yanıtı arasındaki farkın ortalama karesel hatası kullanılmıştır (N. Karaboga & Cetinkaya, 2006). Önerilen bu çalışmada; çoklu hata parametreleri göz önünde bulundurularak çok amaçlı hata yaklaşımı sergilenmiştir. Literatürdeki çalışmalardan PSO (Sarangi et al., 2020), ABC (A. Kumar et al., 2017), GA ve DE (N. Karaboga & Cetinkaya, 2006) için karşılaştırma yapabilme amacıyla 0 - 0.4π geçirme bandına sahip, 0.6π - π durdurma bandına sahip 20. dereceden FIR süzgeç tasarlanmıştır. Tasarıma ait karşılaştırma tablosu Tablo 9'da verilmiştir. Tablo 9'da koyu olarak verilen değerler diğer metoda göre daha iyi sonuçlar veren değerlerdir. Tablo 9 incelendiğinde; önerilen metodun PSO için pr1,pr2,sr,AS,Ep,Et için daha iyi sonuçlar verdiği, ABC için; pr1,pr2 ve Et için daha iyi sonuçlar verdiği, GA için sr, AS, Et, Es için daha iyi sonuçlar verdiği ancak DE için herhangi bir iyileştirme yapılmadığı görülmektedir.



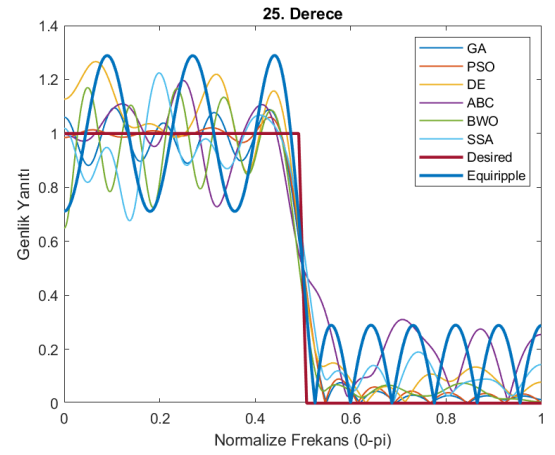
Şekil 3 5. Dereceden Süzgeç Frekans Yanıtı



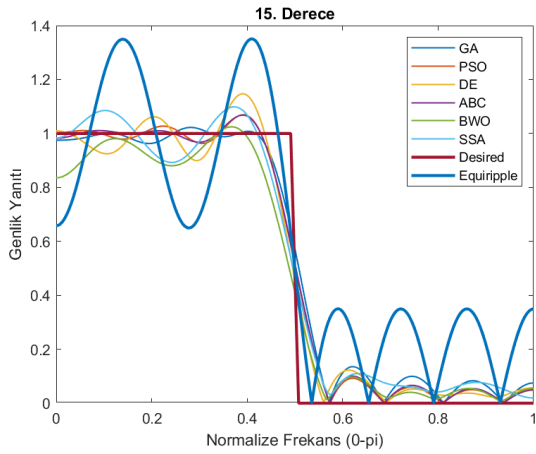
Şekil 6 20. Dereceden Süzgeç Frekans Yanıtı



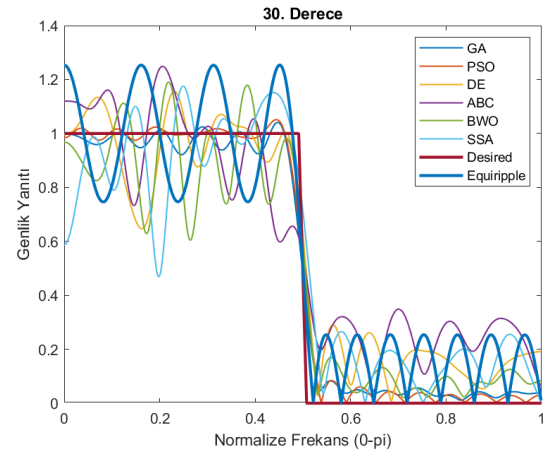
Şekil 4 10. Dereceden Süzgeç Frekans Yanıtı



Şekil 7 25. Dereceden Süzgeç Frekans Yanıtı



Şekil 5 15. Dereceden Süzgeç Frekans Yanıtı



Şekil 8. 30. Dereceden Süzgeç Frekans Yanıtı

Tablo 9. 20. Dereceden Literatür Karşılaştırma

	PSO		ABC		GA		DE	
	Literatür	Önerilen	Literatür	Önerilen	Literatür	Önerilen	Literatür	Önerilen
Pr1	0,01818	0,00631	0,22547	0,12405	0,03910	0,04518	0,03385	0,14076
Pr2	0,04481	0,00039	0,31120	0,06088	0,03445	0,03656	0,02809	0,04026
Sr	0,07781	0,00954	0,11384	0,23751	0,05326	0,03143	0,09604	0,16331
AS	51,07025	93,04556	43,45970	28,75051	58,65271	69,20062	46,85946	36,24192
Ep	0,96522	0,03217	12,72669	2,75524	0,51085	0,58851	0,39536	1,76307
Et	0,46000	0,02978	2,22048	15,95833	0,52149	0,19029	0,63342	5,55188
Es	0,05460	0,08299	0,03294	0,13967	0,07597	0,06608	0,07801	0,07245

Tablo 10. 5. Dereceden FIR Filtre Katsayıları

b_k	GA	PSO	DE	ABC	BWO	SSA	HA
1	0,3037761879	-0,1496075077	-0,1500752791	0,1500752025	0,3057104147	-0,3004822095	0,3036897493
2	0,4955602446	-0,0140320052	-0,0147057873	0,0147056712	0,4967495743	-0,4954656753	0,4955986739
3	0,3273919742	0,3274267867	0,3269526997	-0,3269530970	0,3247288871	-0,3277665761	0,3274941770
4	-0,0140472380	0,4956051022	0,4956064432	-0,4956065143	-0,0155115305	0,0099528304	-0,0139672896
5	-0,1495932530	0,3037539479	0,3040232559	-0,3040229455	-0,1483323672	0,1529653146	-0,1496563594

Tablo 11. 10. Dereceden FIR Filtre Katsayıları

b_k	GA	PSO	DE	ABC	BWO	SSA	HA
1	0,1059420541	-0,0715304257	0,0710026991	-0,1723054067	0,1074713944	-0,0684354385	0,0843801962
2	0,1265393960	-0,0340302124	0,0261703736	-0,4366283314	0,1937495733	-0,0560327401	0,0112206201
3	0,0228429004	0,0859806980	-0,0867244435	-0,4376442447	0,0302619832	0,0681358061	-0,2773930770
4	0,0132904979	0,0727848515	-0,0723600853	-0,1329407058	-0,2912659712	0,0794107484	-0,4927842082
5	0,2375636065	-0,1051542919	0,1098809817	0,1486432239	-0,4497485571	-0,0583922151	-0,3512668543
6	0,4554111197	-0,1594938383	0,1560244943	0,1229617009	-0,2771372590	-0,1677013562	-0,0220303738
7	0,3470392084	0,0987177095	-0,1128901929	-0,0649485266	-0,0002760014	0,0587251774	0,1239403603
8	-0,0033794119	0,4212087067	-0,4288881919	-0,0922514025	0,0169712247	0,3837523713	0,0066356237
9	-0,2178989531	0,4472563154	-0,4255633900	0,0271878883	-0,0832909369	0,4672414187	-0,0976213201
10	-0,1427698675	0,2003007130	-0,1868562991	0,0775144129	-0,1298126536	0,2350161403	-0,0425467122

Tablo 12. 15. Dereceden FIR Filtre Katsayıları

b_k	GA	PSO	DE	ABC	BWO	SSA	HA
1	0,0618276230	0,0081888844	-0,0775532498	0,0998385796	0,0531892843	0,0476627442	-0,0481737536
2	-0,0298890396	-0,0901928010	-0,0702607190	0,0860231085	0,0217074937	0,0159739111	0,0007580106
3	-0,1263592588	-0,1260753648	0,0676700241	-0,0812504248	-0,0475429827	-0,0446992121	0,0628742617
4	-0,0344492117	0,0253632991	0,1347840176	-0,1579572196	0,0056724223	-0,0200387880	0,0162005469
5	0,1647776161	0,1879467347	0,0778844016	0,0679489251	0,1568277615	0,1446961973	-0,0647093572
6	0,1660086188	0,0667543729	0,0757924396	0,4018102734	0,1268618390	0,2078426215	-0,0113857737
7	-0,0980368936	-0,2811654143	0,2543446508	0,4615915055	-0,1504754702	-0,0815972239	0,1060260031
8	-0,2841920536	-0,4703127872	0,4263148668	0,2144835222	-0,4121852115	-0,3805387829	0,0229438351
9	-0,1306520840	-0,3179855192	0,2903512994	-0,0090190800	-0,3878660202	-0,4483133942	-0,2955469555
10	0,1800336512	-0,0733721311	-0,0421560098	-0,0147840973	-0,1300876105	-0,2101618925	-0,4983516593
11	0,3186585211	-0,0080272692	-0,2556475398	0,0423809795	0,0312488166	-0,0095639551	-0,3424797044
12	0,2589557456	-0,0553224417	-0,1188974175	-0,0067314547	-0,0144337875	-0,0384325078	-0,0233969212
13	0,1957801909	-0,0216396252	0,0936154434	-0,0835886260	-0,0705201258	-0,1229641350	0,0991764513
14	0,1936079532	0,0715012036	0,1275823141	-0,0568217992	-0,0423962480	-0,0567318046	0,0091988549
15	0,1389283861	0,0816897546	0,0256397028	0,0184437536	0,0245434541	0,0133137966	-0,0564344256

Tablo 13. 20. Dereceden FIR Filtre Katsayıları

b_k	GA	PSO	DE	ABC	BWO	SSA	HA
1	-0,0033811821	0,0175592464	-0,0601112014	-0,0578069204	0,0077715936	-0,0530745088	0,0064063308
2	-0,0462980621	0,0381579022	-0,0555755869	-0,0159765414	-0,0465599395	-0,1323066120	-0,0188800339
3	-0,0295883608	-0,0101714747	0,0458500721	0,0439186990	-0,0216639337	-0,1854581657	0,0151125094
4	0,0189331394	-0,0473051888	0,0924368876	0,0194086241	0,0770911587	-0,1209403405	0,0256004566
5	0,0023724722	0,0033683464	-0,0320004440	-0,0308625424	0,1618414694	-0,0648454818	-0,0594649658
6	-0,0691887359	0,0572983744	-0,1036610003	0,0606181756	0,2198065707	0,0590234369	-0,1919866175
7	-0,0459082860	0,0060020888	0,0643875032	0,0359068784	0,3005765214	0,2190523910	-0,2188633345
8	0,0681952929	-0,0671818356	0,2802087315	-0,0809332743	0,3271147311	0,3801404589	-0,1927540556
9	0,1142513080	-0,0116751613	0,1968921480	-0,1831570692	0,1609764314	0,2823883255	-0,2292290313
10	0,0633238630	0,0987934115	-0,1834491596	-0,0195379737	-0,1362537623	0,0283429928	-0,2884933766
11	0,1026685527	0,0628877772	-0,3892440799	0,3378236810	-0,2286149974	-0,0961215249	-0,1604743685
12	0,3120519455	-0,0714739802	-0,3002008093	0,4856536083	-0,0289007573	0,0386000436	0,1419362699
13	0,4339632149	-0,0190135616	-0,0990358261	0,2715336732	0,1617914563	0,2053680944	0,2972913432
14	0,2321729616	0,2775313699	-0,0858936169	0,0113265155	0,1079995420	0,1721483312	0,1003763574
15	-0,1171914062	0,4875204674	-0,1107580559	-0,0243546533	-0,1137014249	-0,0137772453	-0,1749820293
16	-0,2289862449	0,3491358122	-0,0592700786	0,0858461691	-0,1304559535	-0,0902486994	-0,1867767452
17	-0,0607012953	0,0330711105	-0,0206409018	0,0726695075	0,0211187036	0,0484200457	0,0132982178
18	0,1083442307	-0,1233278205	-0,0341552720	-0,0158368469	0,0981416455	0,1469164814	0,1233845871
19	0,0962592157	-0,0651787898	-0,0666078499	-0,0353491040	0,0154096096	0,0754289620	0,0559173155
20	0,0100739639	0,0122628758	-0,0511084412	-0,0275088616	-0,0525667031	0,0127303557	-0,0313606285

Tablo 14. 25. Dereceden FIR Filtre Katsayıları

b_k	GA	PSO	DE	ABC	BWO	SSA	HA
1	-0,0104140358	-0,0418676106	-0,0814172151	-0,0260792432	0,0460874454	-0,0734783334	0,0163967584
2	0,0115130181	-0,0326895177	-0,1692957137	-0,1219835806	0,1168747521	-0,1344271728	0,1166386561
3	0,0137206355	-0,0241468829	-0,1539260751	0,0005017398	0,1549341446	-0,0099089674	0,1750681911
4	0,0525470661	-0,0680634240	-0,1691508568	0,0586392862	0,1168765064	0,0162824320	0,1049008897
5	0,1292736269	-0,0995637628	-0,2276059447	-0,0211990632	0,0202269225	-0,0045689462	-0,0129332996
6	0,1528801364	-0,0215694919	-0,2871023744	0,0712563156	-0,0088071027	-0,0409821361	-0,0268508331
7	0,0368263159	0,1215834648	-0,2602599632	0,0064299806	0,0003951338	0,0643214527	0,0385740192
8	-0,1199450073	0,2086846527	-0,0706658764	-0,0743748240	-0,0225708957	0,1954832969	0,0339243228
9	-0,1855288468	0,2386342655	0,0274012697	-0,3492633593	-0,0652816887	0,1814312481	-0,0137058234
10	-0,1737576067	0,2859939771	0,0975927493	-0,4898039551	-0,0088459129	-0,0215521643	0,0106689667
11	-0,1582070725	0,2886632151	0,1120228632	-0,2612225766	0,1382427230	-0,0799069675	0,0100522209
12	-0,0898346061	0,1113820706	0,1315759422	0,0922095037	0,1806419924	0,0289157486	-0,1360398988
13	0,1010727822	-0,1452536076	0,0596301016	0,0720934936	0,1604041448	0,0492857358	-0,3758877173
14	0,2716257412	-0,1827348284	-0,1676857063	-0,0519070226	0,1571382280	-0,1597373630	-0,3903462830
15	0,2048254541	0,0577943899	-0,2355998743	-0,0599300087	0,1921001040	-0,3738862731	-0,1050008186
16	-0,0208179219	0,2488621563	-0,0361419304	0,0193821611	0,1671534720	-0,2579583296	0,1433974645
17	-0,0758341877	0,1384106126	0,2479306526	0,1148605529	-0,0644064557	0,0229807695	0,1341225619
18	0,1293932968	-0,0922862215	0,2176753018	0,0546091523	-0,2237125261	0,1180328215	-0,0601613164
19	0,3005814116	-0,1264709892	-0,0634432641	-0,0394522592	-0,1085083842	0,0794660756	-0,1058747880
20	0,1996846720	0,0262661921	-0,1727039888	-0,0034475373	0,1385573767	-0,0861148384	0,0077250872
21	-0,0080030300	0,1075909962	-0,0354902424	0,0108863662	0,1671373324	-0,1570396275	0,0539814290
22	-0,0343566971	0,0308586753	0,1021509943	0,1024039343	-0,0644064557	-0,1822617633	-0,0458011695
23	0,0958058195	-0,0463133838	0,0509787553	0,0108560729	-0,2553595592	-0,1648312246	-0,1621825021
24	0,1580022389	-0,0221211183	-0,0008088349	-0,0279054916	-0,2222829818	-0,0568148245	-0,1433379153
25	0,0792746254	0,0234044640	-0,0428666066	-0,0841764415	-0,0638886745	0,0282808168	-0,0584621167

Tablo 15. 30. Dereceden FIR Filtre Katsayıları

b_k	GA	PSO	DE	ABC	BWO	SSA	HA
1	0,0994534958	-0,0787238280	0,0072648217	0,0234551141	0,1309013596	-0,0644922833	-0,0700058985
2	0,0858587908	-0,1259315901	0,0437724122	0,0872078094	0,1403243630	-0,1209643544	-0,0578446402
3	-0,0830544915	-0,1040796183	0,0088792187	0,0332143549	0,0455376353	-0,1602995491	0,0089295723
4	-0,2316039126	-0,0975519922	-0,0479736367	-0,0443601489	-0,1426924591	0,0262886770	0,0879000847
5	-0,1595784416	-0,1715862465	-0,0100477468	-0,0228390065	-0,1576674653	0,3027930212	0,1186204386
6	-0,0010414311	-0,2276825134	0,0029206271	0,1472936972	-0,0383936802	0,3117111635	0,1259303948
7	-0,0366812718	-0,1611450706	-0,0426269688	0,0380486082	0,1029398953	0,0094661394	0,1199277703
8	-0,2865699444	-0,0730995284	-0,0406445864	-0,0274405155	0,1403243630	-0,1270943318	0,0800792141
9	-0,4013550713	-0,1096917689	0,0605793768	-0,1238341562	0,1403243630	0,0766551053	0,0813009204
10	-0,2084760569	-0,1703292410	0,0654337602	-0,1334152814	0,0649051173	0,2268714053	0,1890955847
11	0,0673106053	-0,0257799909	0,0117813093	-0,0585673533	-0,0495742038	0,2749611499	0,2555397269
12	0,1624319274	0,2612732834	-0,0140204794	-0,0938242487	-0,0503807322	0,0555232387	0,2164399996
13	0,0922773238	0,3415359703	-0,0576542524	-0,1644879950	0,0933196251	0,0357568814	0,0728893348
14	0,0374539244	0,0830829841	-0,0369745803	-0,0442622587	0,2141080982	0,0451704224	-0,0279774836
15	0,0205792248	-0,2101541027	-0,1136188142	0,0571037643	0,1403247127	0,0033909555	-0,1025562409
16	-0,0484452416	-0,2202871234	-0,1471244680	-0,0087917657	0,0744810238	-0,1366360400	-0,2160468323
17	-0,1178795060	-0,0375311572	-0,0250597889	-0,2242350099	0,1029398953	-0,1515843157	-0,1923212705
18	-0,0861813960	0,0656805329	0,0613435314	-0,4699439638	0,2183168053	-0,0332019334	0,0153163008
19	0,0215267161	0,0329495353	0,0748202063	-0,2179593989	0,2078993737	0,0545600516	0,2229628803
20	0,0755075356	0,0048767139	0,1568703153	-0,0916668326	-0,0135646863	0,0480020910	0,1965480206
21	0,0370580160	0,0292878106	0,2344176856	0,0863652708	-0,1693874665	0,0271020423	-0,0347404991
22	0,0050496621	0,0288042004	0,3591150114	0,1132633213	-0,1024058913	0,0737030960	-0,1317700166
23	0,0062049995	-0,0108772303	0,1224013891	0,1356696898	-0,0135646863	0,0923428303	0,0454306362
24	-0,0052571324	-0,0207762963	-0,0789428726	0,0091069303	-0,0801817289	-0,0417444486	0,1541720977
25	-0,0433061537	0,0041779050	-0,1383417980	-0,0065537746	-0,1640611187	-0,1007351145	0,0611371735
26	-0,0425304145	0,0019808203	0,1128193870	0,1000484194	-0,0808392344	-0,0388326277	-0,1683887810
27	-0,0011214806	-0,0275665068	0,3276349123	0,0217975775	0,0700175990	-0,0835001159	-0,1335374895
28	0,0304732593	-0,0214928207	0,2182816086	-0,0274922116	0,1309013596	-0,0298473741	0,0546240475
29	0,0181862356	0,0216306235	-0,0581014203	-0,1038919440	0,0455376353	-0,0225107504	0,1300879680
30	-0,0056270055	0,0351239176	-0,0613942722	-0,1086958954	-0,0321837954	0,0342226911	0,0391742449

D		GA	PSO	DE	ABC	BWO	SSA	HA
5	Pr1	0,0593434466	0,0594024620	0,0595195287	0,0595195752	0,0594959773	0,0589625866	0,0594211081
	Pr2	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
	AS	39,5418904597	39,5446037865	39,5013035982	39,5013505962	39,6391940903	39,1266190403	39,5408317812
	Ep	9,7321221860	9,7291345810	9,6886666303	9,6886611929	9,6998874224	9,7976723871	9,7293565897
	Es	17,2509600841	17,2538709832	17,2942792289	17,2942847567	17,2885000418	17,2054134359	17,2536018617
	Et	0,0764470016	0,0764793119	0,0761666656	0,0761668305	0,0765843145	0,0756709266	0,0764870766
	Total Iter Time	595,0889216	601,2257538	1088,2517399	955,5287567	1168,2112419	1054,5631544	328,6004288
10	Pr1	0,0864501439	0,0896391510	0,0705766299	0,0864280029	0,0731385240	0,0740460425	0,1074763963
	Pr2	0,0598027936	0,0526520586	0,0701249029	0,0500631311	0,0953149584	0,0864287955	0,0786609936
	AS	48,5840422443	49,4923699892	56,3592805267	48,0882881403	48,8482745184	48,4460064153	52,3202771632
	Ep	5,8536577189	5,8242489230	5,8841515390	5,4936363123	8,3255973404	5,8546255799	8,0014373933
	Es	5,7039957557	5,7195837685	5,9981590321	6,2283007993	6,0240741443	6,4448625494	6,1291241838
	Et	0,0800412827	0,0818632112	0,0729899362	0,0840330300	0,0518801850	0,0755895661	0,0780433887
	Total Iter Time	585,2937285	599,7240904	1084,5020986	1123,2484986	1681,7931722	1073,4982447	323,1688785
15	Pr1	0,0223376644	0,0693940035	0,1470169178	0,0679887673	0,0247681135	0,0988219296	0,0660177127
	Pr2	0,0118643594	0,0208362155	0,0754536395	0,0000302875	0,1197731314	0,1074747511	0,0151820056
	AS	39,9888706194	47,6780982350	41,9677549058	45,9787710854	46,7433712331	44,1612382994	45,2780069664
	Ep	2,0740423547	3,1628445274	5,4043384182	3,0186045420	9,3630245426	6,0188895620	3,0788439456
	Es	6,7643667391	4,3008000062	3,4083329355	4,5818607118	2,9643344990	4,9277854981	4,7665198647
	Et	0,0793421284	0,0866637210	0,0753885478	0,0864330500	0,0454790765	0,0841650477	0,0860262526
	Total Iter Time	585,3298999	641,4800197	1095,0229301	1698,4634557	2442,2243558	1110,3831997	321,5911630
20	Pr1	0,0495188894	0,0858183169	0,1234478094	0,0563787576	0,0177516317	0,1475834064	0,0905162264
	Pr2	0,0228478972	0,0254855111	0,0654537894	0,0408536600	0,0995643288	0,0616873302	0,0488522043
	AS	51,8258960682	52,7273048624	57,2047510794	39,3834183136	41,6858055154	42,2693631621	49,6514388985
	Ep	2,7353646144	2,7230984622	2,9403986910	2,6027917894	2,8690624471	7,8515597761	2,9252163745
	Es	2,6593446985	2,4117994952	5,1060851393	6,0402229668	5,0417129531	3,1818827077	3,3216420579
	Et	0,0759525504	0,0839585100	0,0540928764	0,0861736408	0,0695270370	0,0695261338	0,0845561348
	Total Iter Time	585,0558253	636,2222970	1148,7272777	1573,9477310	2953,8590282	959,5629777	320,4762307
25	Pr1	0,0948134109	0,0596211256	0,2666441996	0,1966467378	0,1701888032	0,2245967716	0,1771288236
	Pr2	0,1017000359	0,0093514840	0,0212525270	0,0284621849	0,1528877793	0,1181256243	0,0361069301
	AS	51,6025573127	48,2108047009	38,0358126116	23,4010129179	52,0579935098	33,2488247266	50,4052165461
	Ep	3,5539673740	1,3696070453	9,4453527886	8,4807077662	10,9585575983	8,5330794749	6,0584071610
	Es	1,9110853448	2,2226798157	5,2054177414	24,4354141712	1,6666712939	7,5236565774	1,4554924932
	Et	0,0729452694	0,0850164352	0,1175301674	0,0838014325	0,0623978817	0,0522130450	0,0824674847
	Total Iter Time	583,8005445	632,4018260	825,4331076	1700,5690899	3731,0826947	1094,3049925	320,6292265
30	Pr1	0,0411372442	0,0514494478	0,1563796663	0,2487828526	0,1907146256	0,1756235735	0,1868355394
	Pr2	0,0412137438	0,0025963466	0,1064111606	0,0910056709	0,1749532563	0,0400919159	0,0213999405
	AS	49,7768308453	49,5106217299	24,7181545258	21,0697535023	35,4347131094	26,5297297272	32,4847624768
	Ep	1,6055146206	0,8594248735	8,5254196845	16,3285063100	14,4331364449	15,4863211510	4,2613872952
	Es	1,5935396278	1,5637156082	14,5932232155	31,9192644490	4,6517984840	14,9935958425	5,4057150421
	Et	0,0718046040	0,0844653825	0,0834938979	0,0879216954	0,0396341486	0,0698273400	0,0995580105
	Total Iter Time	584,4548374	600,0177770	661,7768563	1056,0331673	4211,5440303	1098,5108274	320,8809111

Tablo 16. En İyi Sonuçlar

5. Derece	PBMax Ripple	SSA
	PBMin Ripple	0
	AS	BWO
	PB Error	ABC
	SB Error	SSA
	TB Error	SSA
	Total Iter Time	HA
10. Derece	PBMax Ripple	DE
	PBMin Ripple	ABC
	AS	DE
	PB Error	ABC
	SB Error	GA
	TB Error	BWO
	Total Iter Time	HA
15. Derece	PBMax Ripple	GA
	PBMin Ripple	ABC
	AS	PSO
	PB Error	GA
	SB Error	BWO
	TB Error	BWO
	Total Iter Time	HA
20. Derece	PBMax Ripple	BWO
	PBMin Ripple	GA
	AS	DE
	PB Error	ABC
	SB Error	PSO
	TB Error	DE
	Total Iter Time	HA
25. Derece	PBMax Ripple	PSO
	PBMin Ripple	PSO
	AS	BWO
	PB Error	PSO
	SB Error	HA
	TB Error	SSA
	Total Iter Time	HA
30. Derece	PBMax Ripple	GA
	PBMin Ripple	PSO
	AS	GA
	PB Error	PSO
	SB Error	PSO
	TB Error	BWO
	Total Iter Time	HA

Tablo 17. En Kötü Sonuçlar

5. Derece	PBMax Ripple	ABC
	PBMin Ripple	0
	AS	SSA
	PB Error	SSA
	SB Error	ABC
	TB Error	BWO
	Total Iter Time	BWO
10. Derece	PBMax Ripple	HA
	PBMin Ripple	BWO
	AS	ABC
	PB Error	BWO
	SB Error	SSA
	TB Error	ABC
	Total Iter Time	BWO
15. Derece	PBMax Ripple	DE
	PBMin Ripple	BWO
	AS	GA
	PB Error	BWO
	SB Error	GA
	TB Error	PSO
	Total Iter Time	BWO
20. Derece	PBMax Ripple	SSA
	PBMin Ripple	BWO
	AS	ABC
	PB Error	SSA
	SB Error	ABC
	TB Error	ABC
	Total Iter Time	BWO
25. Derece	PBMax Ripple	DE
	PBMin Ripple	BWO
	AS	ABC
	PB Error	BWO
	SB Error	ABC
	TB Error	DE
	Total Iter Time	BWO
30. Derece	PBMax Ripple	ABC
	PBMin Ripple	BWO
	AS	ABC
	PB Error	ABC
	SB Error	ABC
	TB Error	HA
	Total Iter Time	BWO

4. Filtre Uygulaması

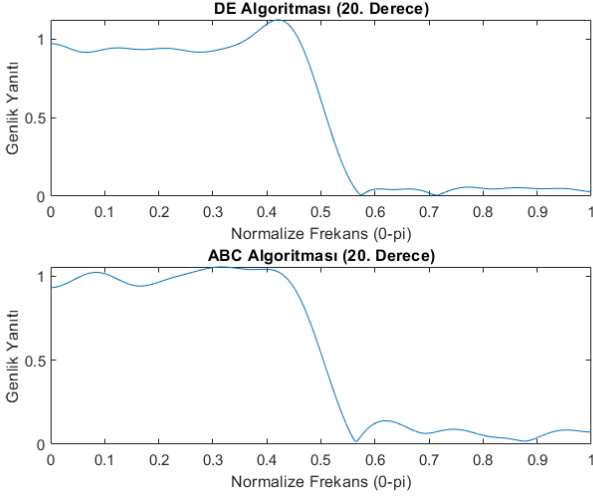
Literatürde yaygın olarak 20. dereceden FIR filtreler kullanılarak performansları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada da 20. dereceden normalize geçirme bandı frekansı 0.49 pi, normalize durdurma bandı frekansı 0.51 pi olan yukarıda bahsi geçen algoritmalarda en iyi ve en kötü durdurma bandı bastırma oranına sahip olan sırasıyla DE ve ABC algoritmaları kullanılarak filtre tasarlanmış ve sentetik sinyal üzerine uygulanmıştır. Sentetik sinyal 100,300 ve 450 hertz bileşenlerinden oluşmakta olup aşağıdaki kod bloğu kullanılarak tasarlanmıştır.

$F_s = 1000;$ % Örnekleme Frekansı
 $T = 1/F_s;$ % Örnekleme Periyodu
 $t=0:1/F_s:0.25;$ % Sinyal Uzunluğu
 $f_1 = 100;$ % 1. Sinyal İçin Frekans
 $f_2 = 300;$ % 2. Sinyal İçin Frekans
 $f_3 = 450;$ % 3. Sinyal İçin Frekans

$data1 = \sin(2*\pi*f_1*t);$ % 1. Sinyal
 $data2 = \sin(2*\pi*f_2*t);$ % 2. Sinyal
 $data3 = \sin(2*\pi*f_3*t);$ % 3. Sinyal

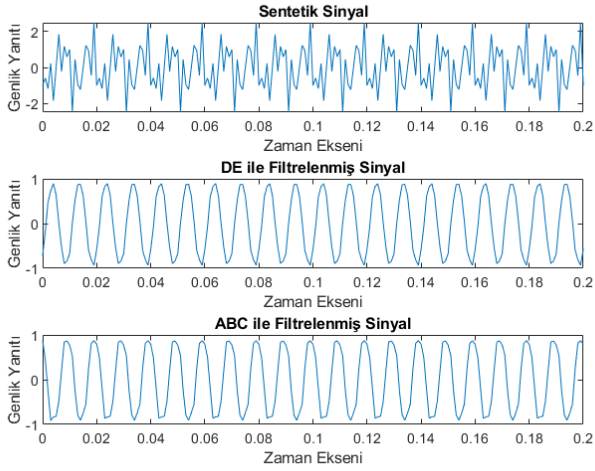
data=data1+data2+data3; % Sentetik Sinyal

20. dereceden normalize geçirme bandı frekansı 0.49π , normalize durdurma bandı frekansı 0.51π olan DE ve ABC algoritmaları ile elde edilen filtrelerin frekans yanıtları Şekil-9’da verilmiştir.



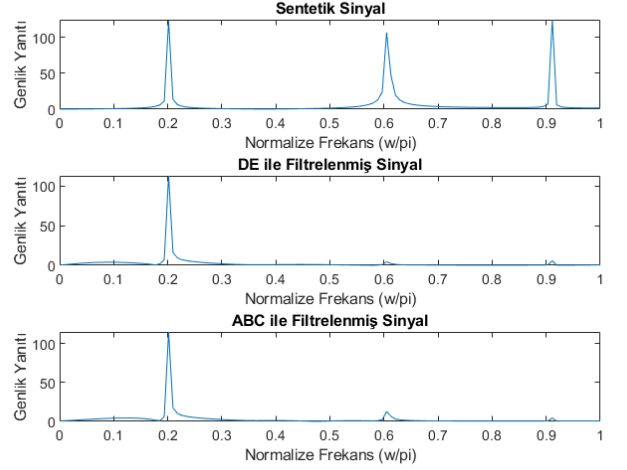
Şekil 9 20. Dereceden Filtre Frekans Yanıtı

Sentetik sinyalin DE ve ABC algoritması ile filtrelenmiş hallerinin genlik zaman grafiği Şekil-10’da verildiği üzeredir.



Şekil 10 DE ile Filtrelenmiş Sinyal

Bu sinyallere ait Hızlı Fourier Dönüşümü yapılarak elde edilen frekans-genlik spektrumu Şekil-11’de verilmiştir.



Şekil 11 DE ile Filtrelenmiş Sinyalin Fourier Dönüşümü

Şekil-11 görsel olarak incelendiğinde tasarımı yapılmış filtreye göre düşük frekans bileşenlerini geçirip, yüksek frekans bileşenlerini durdurması gereken filtrelerde durdurma bandı bastırma oranı “57,2047510794” olan DE algoritması daha iyi sonuç verirken durdurma bandı bastırma oranı “39,3834183136” olan ABC algoritması daha kötü sonuç vermiştir. Bu sonuçları değerlendirmeye yönelik sayısal performans analizi için aşağıda verilen kod bloğu ile sentetik sinyal ve filtrelenmiş sinyal durdurma bandı güç oranları, hesaplanarak Tablo-19’da verilmiştir.

```

y1=fft(data);
% Sentetik Sinyal FFT
y2=fft(filtered);
% Filtrelenmiş Sinyal FFT
p1=abs(y1(1:length(data)/2));
% Sentetik Sinyal durdurma bandı
p2=abs(y2(1:length(data)/2));
% Filtrelenmiş Sinyal durdurma bandı
p11=sum(p1(length(p1)/2:end).^2)/(length(p1)/2);
% Sentetik Sinyal durdurma bandı
p21=sum(p2(length(p2)/2:end).^2)/(length(p2)/2);
% Filtrelenmiş Sinyal durdurma bandı
Oran=20*log10(p11/p21);
% Durdurma bandı sinyal-gürültü oranı
    
```

Tablo 18 Performans Karşılaştırması

	DE	ABC
Sinyal-Gürültü Oranı	53.2203634514597	41.3640199537679

5. Tartışma

Bu çalışmada FIR filtre tasarımına yönelik metasezgisel algoritmalar kullanan bir yaklaşım önerilmiştir. Bu amaç doğrultusunda önerilen sistemin performansı PSO, DE, ABC, GA, HA, BWO, SSA algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Performans parametreleri olarak geçirme bandı maksimum dalgalanma miktarı, durdurma bandı minimum dalgalanma miktarı, desibel cinsinden durdurma bandı zayıflaması, geçirme bandı toplam hatası, durdurma bandı toplam hatası, geçiş bandı toplam hatası, toplam iterasyon süresi kullanılmıştır. Filtre derecesi 5’ten 30’a kadar değişen

derecelerde metasezgisel algoritmalarla gerçekleştirilen filtreler karşılaştırıldığında dereceye göre ve performans parametrelerine göre algoritmaların başarısının değiştiği Tablo-17 ve Tablo-18'den de görülmektedir. Bu nedenle önerilen yaklaşımla en iyi filtre tasarımına ait metasezgisel algoritmanın hangisinin en iyi olduğunu söylemek mümkün değildir. Çalışmanın ikinci aşamasında örnek olarak tasarlanan 20. dereceden filtrelerin performansı sentetik bir sinyal üzerinde analiz edilmiştir. En iyi ve en kötü duruma göre karşılaştırılma yapıldığında başarılı bir filtre tasarımında Tablo-19'da görüldüğü gibi SNR oranında önemli farklılıklar bulunmaktadır.

İleriki çalışmalarda ortaya konan bu filtre tasarımına ait yöntem ile iki boyutlu filtrelerin tasarımı planlanmaktadır. Önerilen yaklaşımın farklı sinyal uygulamalarında ve görüntü analizinde kullanılabileceği görülmektedir.

Kaynakça

- Aggarwal, A., Rawat, T. K. & Upadhyay, D. K. (2016). Design of optimal digital FIR filters using evolutionary and swarm optimization techniques. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 70(4), 373–385. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2015.12.012>
- Bose, D., Biswas, S., Vasilakos, A. V. & Laha, S. (2014). Optimal filter design using an improved artificial bee colony algorithm. *Information Sciences*, 281, 443–461. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.05.033>
- Chen, S. & Luk, B. L. (2010). Digital IIR filter design using particle swarm optimisation. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 9(4), 327–335.
- Clerc, M. & Kennedy, J. (2002). The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(1), 58–73.
- Geem, Z. W., Kim, J. H. & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 76(2), 60–68.
- Gupta, L. & Mehra, R. (2011). Modified PSO based Adaptive IIR Filter Design for System Identification on FPGA. *International Journal of Computer Applications*, 22(5), 1–7. <https://doi.org/10.5120/2583-3569>
- Hayyolalam, V. & Pourhaji Kazem, A. A. (2020). Black Widow Optimization Algorithm: A novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87(July 2019), 103249. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103249>
- Holland, J. H. & others. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
- Jain, M., Singh, V. & Rani, A. (2019). A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 44(November 2017), 148–175. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.02.013>
- Jarraya, B. & Bouri, A. (2012). Metaheuristic Optimization Backgrounds: A Literature Review. *International Journal of Contemporary Business Studies*, 3(12), 2156–2506. <http://www.akpinsight.webs.com>
- Karaboga, D. (2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*.
- Karaboga, N. (2005). Digital IIR filter design using differential evolution algorithm. *Eurasip Journal on Applied Signal Processing*, 2005(8), 1269–1276. <https://doi.org/10.1155/ASP.2005.1269>
- Karaboga, N. (2009). A new design method based on artificial bee colony algorithm for digital IIR filters. *Journal of the Franklin Institute*, 346(4), 328–348. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2008.11.003>
- Karaboga, N. & Cetinkaya, B. (2004). Design of minimum phase digital IIR filters by using genetic algorithm. *Report - Helsinki University of Technology, Signal Processing Laboratory*, 46, 29–32.
- Karaboga, N. & Cetinkaya, B. (2006). Design of digital FIR filters using differential evolution algorithm. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 25(5), 649–660. <https://doi.org/10.1007/s00034-005-0721-7>
- Karaboğa, N. & Çetinkaya, M. B. (2011). A novel and efficient algorithm for adaptive filtering: Artificial bee colony algorithm. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 19(1), 175–190. <https://doi.org/10.3906/elk-0912-344>
- Karakaş, M. F. & Latifoğlu, F. (2020). Finite Impulse Response Filter Design Using Squirrel Search Algorithm. *2020 Medical Technologies Congress (TIPTEKNO)*, 1–4.
- Kaya, T. & İnce, M. C. (2011). *Genetik Algoritma Yardımıyla Elde Edilen Yüksek Performanslı Pencere Fonksiyonlarının Yinelemesiz Sayısal Filtre Tasarımında Kullanımı*. May, 16–18.
- Kumar, A., Subhojit, D. & Londhe, N. D. (2017). Low-Power FIR Filter Design Using Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm with Experimental Validation Over FPGA. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 36(1), 156–180. <https://doi.org/10.1007/s00034-016-0297-4>
- Kumar, S. & others. (2021). Review And Analysis Of Optimization Algorithms For Digital Filter Design. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12(7), 1798–1806.
- Latifoğlu, F. (2020). A novel singular spectrum analysis-based multi-objective approach for optimal FIR filter design using artificial bee colony algorithm. *Neural Computing and Applications*, 32(17), 13323–13341. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04680-1>
- Latifoğlu, F. (2013). A novel approach to speckle noise filtering based on Artificial Bee Colony algorithm: An ultrasound image application. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 111(3), 561–569. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.05.009>
- Litwin, L. (2000). FIR and IIR digital filters. *IEEE Potentials*, 19(4), 28–31.
- Manuel, M. & Elias, E. (2012). Design of Sharp 2D Multiplier-Less Circularly Symmetric FIR Filter Using Harmony Search Algorithm and Frequency Transformation. *Journal of Signal and Information Processing*, 03(03), 344–351. <https://doi.org/10.4236/jsip.2012.33044>
- Nagasirisha, B. & Prasad, V. (2020). Noise Removal from EMG Signal Using Adaptive Enhanced Squirrel Search Algorithm. *Fluctuation and Noise Letters*, 19(04), 2050039.
- Najjarzadeh, M. & Ayatollahi, A. (2008). A comparison between genetic algorithm and PSO for linear phase fir digital filter design. *International Conference on Signal Processing Proceedings, ICSP*, 2134–2137.

- <https://doi.org/10.1109/ICOSP.2008.4697568>
- Oppenheim, A. V. (1999). *Discrete-time signal processing*. Pearson Education India.
- Parks, T. W. & Burrus, C. S. (1987). *Digital filter design*. Wiley-Interscience.
- Proakis, J. G. (2001). *Digital signal processing: principles algorithms and applications*. Pearson Education India.
- Reddy, K. S. & Sahoo, S. K. (2015). An approach for FIR filter coefficient optimization using differential evolution algorithm. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 69(1), 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2014.07.019>
- Saha, S. K., Dutta, R., Choudhury, R., Kar, R., Mandal, D. & Ghoshal, S. P. (2013). Efficient and accurate optimal linear phase FIR filter design using opposition-based harmony search algorithm. *The Scientific World Journal*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/320489>
- Saha, S. K., Kar, R., Mandal, D. & Ghoshal, S. P. (2014). Harmony search algorithm for infinite impulse response system identification. *Computers and Electrical Engineering*, 40(4), 1265–1285. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.12.016>
- Saranghi, S. K., Panda, R. & Abraham, A. (2020). Design of optimal low-pass filter by a new Levy swallow swarm algorithm. *Soft Computing*, 24(23), 18113–18128. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05065-6>
- Shao, P., Wu, Z., Zhou, X. & Tran, D. C. (2017). FIR digital filter design using improved particle swarm optimization based on refraction principle. In *Soft Computing* (Vol. 21, Issue 10, pp. 2631–2642). <https://doi.org/10.1007/s00500-015-1963-3>
- Storn, R. & Price, K. (1997). Differential evolution--a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359.
- Zhang, G., Gu, Y., Hu, L. & Jin, W. (2003). A novel genetic algorithm and its application to digital filter design. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 2, 1600–1605. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2003.1252754>