



FIR Filter System Modeling Using Metaheuristic Approaches: Applications of PSO, ABC, qABC, and MA

İlayda Elik^{1,a,*}, Serdar Koçkanat^{2,b}

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Sivas, 58140 Türkiye

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Sivas, 58140

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 08/05/2025

Accepted: 13/05/2025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

Süreç

Geliş: 08/05/2025

Kabul: 13/05/2025

ABSTRACT

This study addresses the modeling of high-order FIR (Finite Impulse Response) systems using lower-order FIR filters, which is a significant challenge in digital filter design and system identification. The primary objective is to approximate the amplitude frequency response of a fifth-order FIR system with a fourth-order FIR model while minimizing the modeling error. To achieve this, four metaheuristic optimization algorithms—Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Bee Colony (ABC), Quick ABC (qABC), and Memetic Algorithm (MA)—are employed. Each algorithm is executed in 30 independent trials to assess its robustness and performance.

The modeling task is formulated as an optimization problem where the mean squared error (MSE) between the reference system's frequency response and the approximated model's response is minimized. The performance of each algorithm is evaluated not only by their convergence behavior over iterations but also by detailed frequency-domain analyses, including both amplitude response and power spectrum comparisons. Furthermore, the statistical properties of each algorithm's output—such as mean, standard deviation, minimum and maximum MSE values—are used to evaluate consistency and accuracy.

The results show that the ABC algorithm achieves the best overall balance, providing the lowest average MSE and smallest variance, indicating strong stability and accuracy. The MA algorithm, while achieving the lowest minimum MSE in some runs, exhibits higher variability, suggesting less consistency. The qABC algorithm demonstrates fast convergence and high potential for accurate modeling, but its relatively high standard deviation points to a lack of solution stability. The PSO algorithm, although able to reach low error values in some runs, generally produces more dispersed and inconsistent solutions due to its broader error range.

In conclusion, this work presents a comprehensive comparative evaluation of metaheuristic algorithms for low-order FIR filter modeling. The findings highlight the superiority of ABC and MA algorithms in terms of accuracy and stability, and point toward the potential of hybrid or adaptive versions of these algorithms for future filter design and system identification problems.

Keywords: FIR filter, system modeling, PSO, ABC, Quick ABC, MA.

Meta-Sezgisel Yaklaşımlar ile FIR Süzgeç Sistem Modellemesi: PSO, ABC, qABC ve MA Uygulamaları

Öz

Bu çalışma, sayısal filtre tasarımı ve sistem modelleme alanında önemli bir problem olan düşük dereceli FIR (Finite Impulse Response) filtreler ile yüksek dereceli FIR sistemlerin yaklaşık modellenmesini ele almaktadır. Çalışmanın temel amacı, beşinci dereceden bir FIR filtresinin genlik frekans yanıtını, dördüncü dereceden bir FIR filtre ile olabildiğince düşük hata ile modelleyebilmektir. Bu bağlamda, meta-sezgisel optimizasyon yaklaşımlarından Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC), Hızlandırılmış ABC (qABC) ve Memetik Algoritma (MA) yöntemleri uygulanmış ve her algoritma için 30 bağımsız çalışma gerçekleştirilmiştir.

Modelleme problemi, referans sistem ile elde edilen genlik cevabı ile yaklaşık modelin cevabı arasındaki ortalama kare hata (MSE) fonksiyonunun minimize edilmesi şeklinde tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, hem zamana bağlı yakınsama davranışları hem de frekans alanı analizleri (genlik ve güç spektrumları) ile değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, her algoritma için elde edilen MSE dağılımları; ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum değerler üzerinden istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Sonuçlara göre, ABC algoritması, hem en düşük ortalama MSE hem de en küçük hata varyansı ile en dengeli ve tutarlı sonuçları vermiştir. MA algoritması, en düşük minimum MSE değerini elde ederek bazı çalıştırmalarda yüksek doğruluk sağlamış; ancak maksimum hata değerinin görece yüksek oluşu, algoritmanın kararlılığını sınırlamıştır. qABC, hızlı yakınsama ve düşük hata potansiyeline sahip olmakla birlikte, yüksek standart sapması nedeniyle çözüm stabilitesi açısından sınırlı kalmıştır. PSO algoritması ise yer yer düşük hata değerlerine ulaşabilmesine rağmen, geniş varyans aralığı nedeniyle genelde daha dalgalı ve kararsız çözümler üretmiştir.

Bu yönleriyle çalışma, düşük dereceli FIR sistem modellemesinde meta-sezgisel algoritmaların başarımını karşılaştırmalı olarak ortaya koymakta; özellikle ABC ve MA algoritmalarının, doğruluk ve kararlılık açısından öne çıktığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, gelecekte bu algoritmaların hibrit versiyonlarıyla daha gelişmiş filtre modelleme ve sistem indirgeme uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: FIR filtre, sistem modelleme, PSO, ABC, Quick ABC, MA

^a ikip0858@gmail.com

^b 0009-0008-0136-0055

skockanat@cumhuriyet.edu.tr

0000-0001-6415-0241

How to Cite: Elik İ, Koçkanat S (2025) FIR Filter System Modeling Using Metaheuristic Approaches: Applications of PSO, ABC, qABC, and MA, Journal of Engineering Faculty, 3(1): 74-81.

Giriş

FIR (Finite Impulse Response) filtreler, dijital sinyal işleme alanında en yaygın kullanılan süzgeç türlerinden biridir. FIR filtreler, sonlu uzunlukta bir dürtü yanıtına sahip olmaları ile karakterize edilir ve bu özellikleri sayesinde birçok uygulamada kararlılık ve öngörülebilirlik açısından avantaj sağlar [1]. FIR filtrelerin matematiksel yapısı, yalnızca giriş sinyallerinin ağırlıklı toplamından oluşur; geçmiş çıkış örneklerine bağlı geri besleme içermez. Bu özellik, FIR filtrelerin daima kararlı olmasını garanti eder [2].

FIR filtrelerin temel transfer fonksiyonu, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} b[n]z^{-n}$$

Burada $b[n]$ filtre katsayılarını, N ise filtre derecesini temsil etmektedir. Bu yapı, giriş sinyalinin gecikmeli örnekleri ile katsayıların çarpılıp toplanması yoluyla çıkış sinyalinin oluşturulmasına dayanır. FIR filtrelerin lineer faz karakteristiği sağlayabilmesi, özellikle görüntü işleme ve iletişim sistemleri gibi uygulamalarda önemli bir avantaj sunar [3].

FIR filtreler genellikle aşağıdaki temel avantajlara sahiptir:

- **Kararlılık:** FIR filtreler iç yapılarında geri besleme kullanmadıkları için, sistem parametreleri nasıl seçilirse seçilsin kararlı kalırlar [4].
- **Doğrusal Faz Özelliği:** Özellikle ses ve görüntü işleme gibi alanlarda faz bozulmasının kritik olduğu durumlarda, FIR filtreler doğrusal faz sağlama yetenekleri ile tercih edilir [5].
- **Kolay Tasarım:** İstenen frekans yanıtına sahip FIR filtrelerin tasarımı, çeşitli pencereleme yöntemleri (Hamming, Hanning, Blackman gibi) ve optimizasyon teknikleri kullanılarak kolaylıkla gerçekleştirilebilir [6].

Bununla birlikte, FIR filtrelerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. İstenilen dar geçiş bantları ve yüksek zayıflama değerlerine ulaşmak için yüksek dereceli filtre tasarımı gerekebilir. Bu durum, işlemci yükünü ve bellek ihtiyacını artırabilir [7]. Özellikle düşük gecikmenin kritik olduğu gerçek zamanlı uygulamalarda, FIR filtrelerin bu dezavantajı göz önünde bulundurulmalıdır.

FIR filtrelerin kullanım alanları oldukça geniştir. Haberleşme sistemlerinde kanal eşitleyici tasarımı, görüntü işleme uygulamalarında kenar belirleme ve bulanıklaştırma gibi işlemlerde, biyomedikal sinyal işleme alanında gürültü azaltımı ve sinyal iyileştirme amaçlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [8]. Ayrıca ses işleme alanında yankı giderme ve dijital ses efektleri oluşturma gibi görevlerde de FIR filtreler tercih edilmektedir.

FIR ve IIR filtreler arasındaki temel farklardan biri, sistem yapılarında geri besleme kullanılıp kullanılmamasıdır. FIR filtreler yalnızca giriş sinyalinin gecikmeli örneklerine dayanırken, IIR filtreler hem giriş hem de geçmiş çıkış örneklerini kullanır. Bu nedenle, IIR filtreler daha düşük derecelerle benzer frekans tepkileri elde edebilse de, kararlılık ve doğrusal faz sağlama açısından FIR filtreler daha

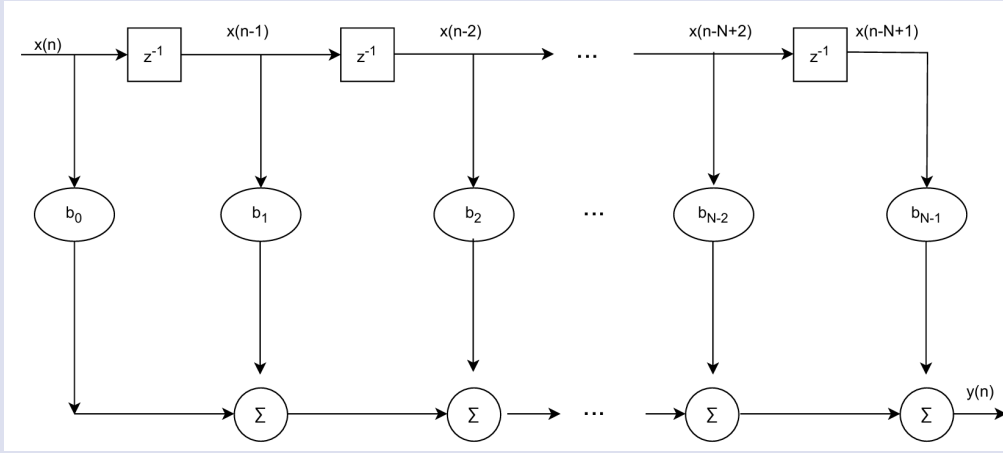
avantajlıdır [9]. Ayrıca FIR filtrelerin optimizasyonu genellikle daha kolaydır çünkü hata yüzeyleri tek modludur; bu, global minimuma ulaşmayı kolaylaştırır [10].

Son yıllarda FIR filtre tasarımı optimizasyon tekniklerinin kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Özellikle yüksek mertebeli FIR filtrelerde, istenilen frekans yanıtını elde etmek için klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda, sezgisel ve metasezgisel optimizasyon algoritmaları (örneğin, Yapay Arı Kolonisi, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu gibi) kullanılmaktadır [11]. Bu yaklaşımlar, filtre katsayılarının optimum değerlerini bulmada önemli başarılar elde etmektedir.

Sistem modelleme, bir fiziksel sistemin ya da sürecin matematiksel bir temsilinin oluşturulması sürecidir. Sayısal sinyal işleme bağlamında sistem modelleme, bir sistemin giriş-çıkış davranışının belirli parametreler ve matematiksel fonksiyonlar aracılığıyla ifade edilmesi anlamına gelir [12]. Sistem modellemenin temel amacı, karmaşık bir yapının daha sade, analizi ve kontrolü kolay bir temsilini oluşturmaktır. FIR filtreler gibi doğrusal ve zamana bağlı sistemlerin modellenmesinde, sistemin dürtü yanıtı doğrudan filtre katsayıları ile ilişkilendirilir. Bu bağlamda, FIR filtrelerde sistem modelleme, hedeflenen sistem davranışının uygun bir FIR yapısı ile temsil edilmesi sürecini içerir [13]. Bu süreçte modelin doğruluğunu artırmak için parametre optimizasyon tekniklerinden yararlanılır ve sistemin giriş-çıkış verileri kullanılarak en iyi uyumu sağlayacak katsayılar belirlenir [14]. Sistem modelleme, özellikle adaptif filtreleme, ses işleme ve kontrol sistemleri gibi uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır.

FIR filtrelerde sistem modellemede kullanılan optimizasyon teknikleri, model doğruluğunu artırmak ve sistemin istenen performans kriterlerini karşılamasını sağlamak amacıyla uygulanır. Geleneksel optimizasyon yöntemleri (örneğin en küçük kareler yöntemi) belirli durumlarda etkili olsa da, karmaşık sistemler için sezgisel ve metasezgisel yaklaşımlar daha başarılı sonuçlar vermektedir [15]. Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması, filtre katsayılarını optimize etmek için etkili bir yöntem olarak kullanılmıştır ve özellikle geniş arama alanlarında küresel çözümler sunabilmektedir [16]. Bunun yanında Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) algoritması, FIR filtre modellemesinde hızlı yakınsama ve yüksek doğruluk oranı sağlaması nedeniyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir [17]. Diferansiyel Evrim (DE) ve Genetik Algoritmalar (GA) gibi yöntemler de FIR filtre modellemede katsayı optimizasyonu için başarıyla uygulanmıştır [18]. Bu teknikler sayesinde, düşük mertebeli fakat yüksek doğruluk sağlayan filtre modelleri elde etmek mümkün hale gelmiştir.

Sonuç olarak, FIR filtrelerin sistem modellemede kullanılması, kararlı ve doğrusal fazlı yapıları sayesinde birçok alanda güvenilir ve etkili çözümler sunmaktadır. Modelleme sürecinde kullanılan tekniklerin doğruluğu ve etkinliği, elde edilecek performansı doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, sistem modelleme çalışmaları, yalnızca filtre tasarımı değil, aynı zamanda geniş bir mühendislik uygulama alanı için temel bir yapı taşıdır.



Resim 1. FIR Filtre Temel Blok Diyagramı [22]

Figure 1. FIR Filter Basic Block Diagram [22]

FIR Süzgeçlerde Sistem Modellemede Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları

FIR süzgeçlerde sistem modelleme amacıyla optimizasyon tekniklerinin kullanımı, model doğruluğunu artırmak ve sistem performansını iyileştirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda özellikle sezgisel ve metasezgisel optimizasyon algoritmaları, klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda etkili çözümler sunmaktadır. Son yıllarda FIR süzgeç modellemesinde sıkça kullanılan algoritmalar arasında ABC, Hızlı Yapay Arı Kolonisi (q-ABC), Memetik Algoritmalar ve Adaptive PSO önemli bir yer tutmaktadır.

Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması

ABC algoritması, Karaboga (2005) tarafından doğadaki arıların yiyecek arama davranışından esinlenerek geliştirilmiştir [19]. ABC algoritması, çalışan arılar, gözlemci arılar ve keşifçi arılar olmak üzere üç farklı arı grubunun etkileşimiyle çözüm uzayında arama yapar. Çalışan arılar mevcut çözümleri geliştirirken, gözlemci arılar daha iyi çözümleri seçer ve keşifçi arılar yeni çözüm noktaları oluşturur. FIR süzgeçlerde sistem modelleme problemi, arıların aradığı en iyi yiyecek kaynağına benzer şekilde, minimum hata ile modeli temsil eden optimum katsayı vektörünü bulma problemine benzetilebilir. Literatürde ABC algoritması, yüksek doğrulukta sistem modellemesi sağladığı ve küresel optimum çözüme ulaşmada etkin olduğu için FIR filtre tasarımında başarıyla uygulanmıştır [20].

Hızlı Yapay Arı Kolonisi (q-ABC) Algoritması

Standart ABC algoritmasının yerel arama kabiliyetinin sınırlı olması, özellikle karmaşık ve çok boyutlu problemlerde küresel optimuma ulaşma sürecini yavaşlatabilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla Karaboğa ve Görkemli (2014), qABC algoritmasını önermiştir. qABC algoritması, özellikle gözcü arıların arama davranışını yeniden modelleyerek yerel arama yeteneğini artırmayı hedeflemektedir [31].

qABC algoritmasında, standart ABC'de kullanılan komşu çözüm üretme formülüne ek olarak, çözüm uzayındaki benzer çözümler arasından en iyi olanın seçilmesi esas alınır. Bu amaçla, çözüm uzayında belirli bir komşuluk yarıçapı (neighbourhood radius) içerisinde yer alan çözümler değerlendirilerek, gözcü arıların sadece rastgele değil, fitlik değeri en yüksek olan çözüme yönelmesi sağlanır. Bu yaklaşım, hem yakınsama hızını hem de optimizasyon başarımını önemli ölçüde artırmakta, aynı zamanda algoritmanın yerel minimumlarda takılma riskini azaltmaktadır.

qABC'nin hem daha hızlı yakınsadığını hem de daha küçük standart sapma değerleriyle daha kararlı çözümler ürettiğini göstermiştir [30]. Ayrıca 2014 yılında yapılan daha geniş kapsamlı çalışmada, farklı komşuluk yarıçapları için qABC algoritmasının başarımı analiz edilmiş ve $r = 1.5$ civarında optimal sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir [31].

Bu bağlamda qABC algoritması, özellikle sayısal optimizasyon, FIR süzgeç tasarımı, sinyal işleme ve mühendislikteki çeşitli parametrik iyileştirme problemleri için umut vadeden bir metasezgisel yöntem olarak literatürdeki yerini almıştır.

Memetik Algoritmalar

Memetik Algoritmalar (MA), genetik algoritmalar gibi evrimsel yöntemlerin yerel arama stratejileriyle birleştirilmesiyle oluşturulmuş hibrit optimizasyon teknikleridir [24]. Bu yaklaşım, küresel arama yeteneklerini yerel ince ayar mekanizmalarıyla destekleyerek daha hızlı ve kaliteli çözümler üretmeyi amaçlar. FIR süzgeç sistem modellemede MA başlangıçta küresel bir çözüm alanı araştırması yapıp ardından seçilen çözümler üzerinde yerel iyileştirmeler uygulayarak daha düşük hata oranlarına ulaşmaktadır. Literatürde MA'ların FIR filtre tasarımında yüksek doğruluk ve düşük işlem maliyeti sağladığı, klasik genetik algoritmalar ve diferansiyel evrim yöntemlerine göre daha üstün sonuçlar elde ettiği bildirilmektedir [25].

Uyarlamalı Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Adaptive PSO)

PSO, Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilen bir optimizasyon algoritmasıdır [26]. Adaptive PSO ise klasik PSO'nun parametrelerinin (atalet katsayısı, bilişsel ve sosyal katsayılar gibi) adaptif olarak güncellenmesiyle oluşturulmuş daha gelişmiş bir sürümdür [27]. Adaptive PSO, dinamik olarak değişen sistemlerde daha iyi performans göstererek,

özellikle optimizasyon sürecinde erken yakınsamayı önleyip çözüm kalitesini artırmaktadır. FIR filtre sistem modellemede Adaptive PSO algoritması, hem hız hem de doğruluk açısından klasik PSO'ya kıyasla daha başarılı sonuçlar vermektedir [28]. Yapılan son çalışmalar, Adaptive PSO'nun FIR süzgeç katsayılarının optimize edilmesinde güçlü bir yöntem olduğunu ve model hata oranını önemli ölçüde düşürdüğünü ortaya koymuştur [29].

Tablo 1.1 Optimizasyon algoritmalarının karşılaştırılması.

Table 1.1 Comparison of optimization algorithms.

Algoritma	Avantajları	Dezavantajları	Kullanım Alanı
ABC	Basit yapı, iyi keşif yeteneği	Erken yakınsama riski	FIR filtre katsayı optimizasyonu
q-ABC	Geniş çözüm arama, daha iyi çeşitlilik	Karmaşık uygulama	Yüksek boyutlu FIR sistemler
MA	Küresel + yerel arama, hızlı yakınsama	Yüksek işlem maliyeti	Karmaşık sistem modelleme
Adaptive PSO	Hızlı optimizasyon, adaptif kontrol	Parametre ayarı hassasiyeti	Dinamik sistem modelleme

FIR Filtrelerin Sistem Modelleme ile Tasarımı

Sistem modelleme uygulaması tasarlanırken iki farklı yol izlenebilir. Bunlar; modellenecek olan dinamik sistem ile bu sistemi modelleyecek olan filtrenin aynı derecen olması veya yüksek dereceli bir dinamik sistemin daha düşük dereceli bir filtre ile modellenmesidir (order reduction). Tercih edilen ve genellikle daha zor olan ikinci yaklaşımdır.

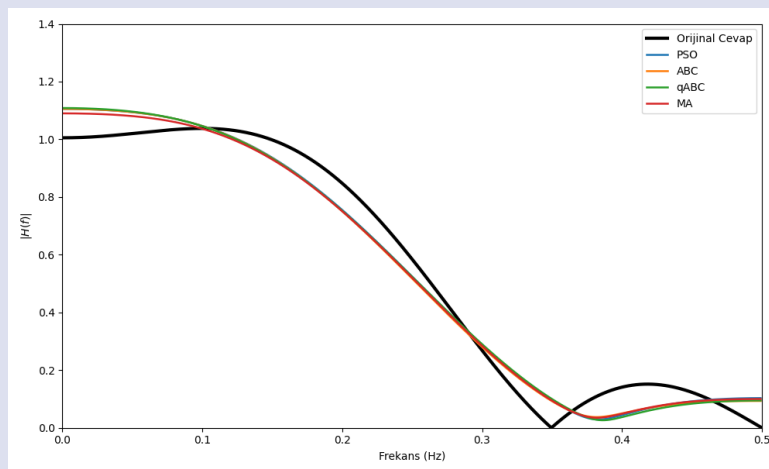
Bu çalışmada doğrusal zamanla değişmeyen FIR filtrelerin daha düşük derecen transfer fonksiyonu kullanılarak sistem modelleme ile tasarımı için deneysel bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada örnekleme sayısı, $N = 1000$ ve örnekleme frekansı $f_s = 1\text{Hz}$ olarak kullanılmıştır. Deneysel uygulama senaryosu için PSO, ABC, Q-ABC ve MA optimizasyon algoritmaları kullanılarak elde edilen düşük dereceli FIR filtre tasarımlarının deneysel sonuçları sunulmuş ve analiz edilmiştir. Öncelikle modelleme yapılan dinamik sistem tanıtılmış, ardından optimizasyon algoritmaları ile 30 farklı koşu çalıştırılarak elde edilen filtrelerin performansları genlik cevabı, güç spektrumu, yakınsama eğrisi, istatistiksel performans olarak ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum hata değerleri değerlendirilmiştir.

Uygulama 3.1 Modellenecek olan dinamik sistem 5. derecen bir FIR filtre olarak alınmış ve bu sistem 4. derecen bir FIR filtre ile modellenmiştir. Modellenecek olan dinamik sistemin transfer fonksiyonu $H_D(z)$ ve bu dinamik sistemi modelleyecek olan FIR filtrenin transfer fonksiyonu $H(z)$ aşağıdaki gibi verilmektedir;

$$H_D(z) = -0.0972 + 0.1419z^{-1} + 0.4579z^{-2} + 0.4579z^{-3} + 0.1419z^{-4} - 0.0972z^{-5} \quad (3.1)$$

$$H(z) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4} \quad (3.2)$$

Uygulama 3.1 için modelleme sırasında sisteme harici bir gürültü sinyali eklenmeden tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu sisteme giriş işareti olarak normal dağılımlı beyaz Gauss gürültüsü uygulanmıştır. En düşük hata değerlerinin elde edildiği koşullarda algoritmalar tarafından tasarlanan FIR filtreler için genlik cevabı ve güç spektrum grafikleri Şekil 3.1/2 ile verilmiştir.



Resim 3.1 Genlik Cevapları
Figure 3.1. Amplitude Response

Şekil 3.1’de sunulan genlik frekans cevabı eğrileri, referans filtre ile optimize edilen düşük dereceli FIR filtrelerin frekans düzlemindeki benzeşimini ortaya koymaktadır. Siyah kalın çizgi, orijinal sistemin yanıtını temsil ederken, renkli çizgiler ilgili algoritmalarla elde edilen filtre modellerini göstermektedir.

Genel olarak, tüm algoritmaların 0–0.25 Hz arasındaki geçiş bandı içerisinde referans filtreye oldukça yakın sonuçlar ürettiği gözlemlenmektedir. Bu durum, genlik karakteristiğinin düşük frekanslarda benzeşim başarısını göstermektedir. Ancak, 0.25 Hz sonrasındaki yüksek frekans bileşenlerinde, özellikle referans filtre tarafından oluşturulan derin zayıflama bölgesi (notch) civarında, düşük dereceli modellerin bu davranışı tam olarak temsil edemediği görülmektedir. Bu bölgede:

- qABC algoritması, yüksek frekanslardaki genlik karakteristiklerine en iyi şekilde uyum sağlamış; orijinal filtrenin eğrisine yakın seyreden yapısıyla, keşif-sömürü dengesini etkin biçimde gerçekleştirmiştir.
- MA, lokal arama kabiliyetinin avantajıyla geçiş bandında yüksek doğruluk sergilemiş; ancak yüksek frekanstaki detaylı yapıları qABC kadar hassas şekilde taklit edememiştir.
- Klasik ABC ve PSO, genel eğilim açısından kabul edilebilir düzeyde performans sergilemekle birlikte, özellikle frekans spektrumunun üst bölgesinde belirgin sapmalar göstermiştir.

Bu bulgular, genlik frekans cevabı üzerinden yapılan değerlendirmede qABC algoritmasının, orijinal sistemin davranışını en iyi şekilde taklit eden modeli elde ettiğini göstermektedir.

Şekil 3.2’de ise sistemlerin frekans spektrumlarını logaritmik ölçekte (desibel) sunmakta ve özellikle

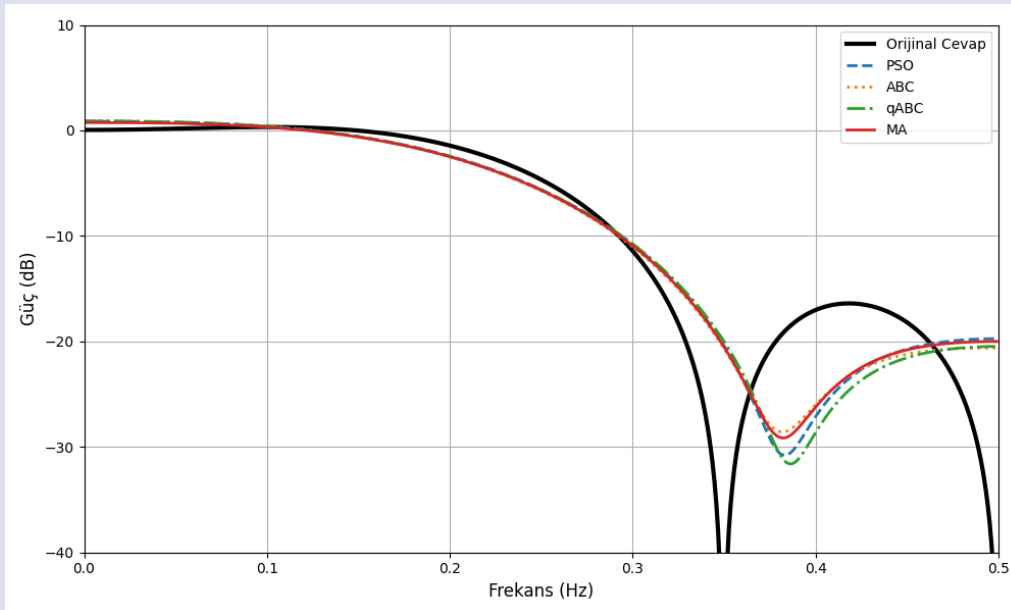
zayıflama bölgelerinin ayrıntılı değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. dB ölçeğinde yapılan bu analiz, filtrelerin enerji bastırma kapasitelerini ve yan bant zayıflama performanslarını daha hassas bir şekilde ortaya koymaktadır.

Referans FIR sisteminin yaklaşık 0.38–0.43 Hz aralığında oluşturduğu belirgin zayıflama (yaklaşık -35 dB) optimize edilen modeller açısından oldukça kritik bir bölgedir. Bu bölgede:

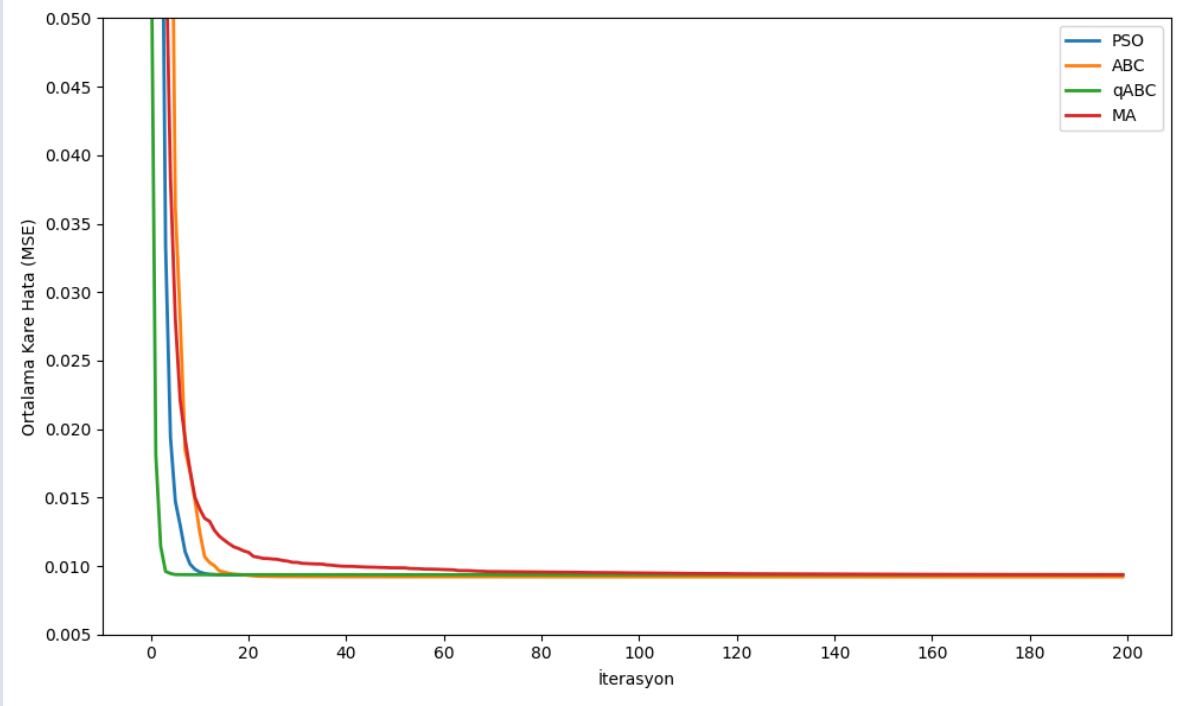
- qABC algoritması, yaklaşık -33 dB’ye ulaşan bir bastırma sağlayarak, referans filtreye en yakın sonucu üretmiştir.
- MA algoritması, -30 dB civarında bir performansla, qABC’ye yakın fakat daha az baskılayıcı bir davranış sergilemiştir.
- PSO ve ABC, yaklaşık -25 ila -27 dB aralığında kalan daha sınırlı bir zayıflama üretmiş ve bu yönüyle daha yüksek hata düzeyine sahip olmuştur.

Bu sonuçlar, qABC ve MA algoritmalarının, güç spektrumunda düşük enerjili bileşenleri bastırma açısından daha başarılı çözümler üretebildiğini göstermektedir. Özellikle qABC algoritmasının, sadece genlik eğrisinde değil aynı zamanda logaritmik ölçekte güç spektrumunda da referans modele en yakın karakteristiği sunduğu görülmektedir.

Aşağıdaki şekilde sunulan eğriler, farklı optimizasyon algoritmalarının 30 bağımsız çalıştırma sonucunda elde edilen ortalama kare hata (MSE) değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimini göstermektedir. Bu grafik, algoritmaların yakınsama hızı, başlangıç evresindeki öğrenme eğilimi, erken doygunluk seviyesi ve nihai çözüm kalitesi gibi önemli performans göstergelerini karşılaştırmalı olarak analiz etmeye imkân tanımaktadır.



Resim 3.2. Güç Spektrumları
Figure 3.2. Power Spectrums



Resim 3.3. PSO, ABC, qABC ve MA Yakınsama Eğrileri
Figure 3.3. Convergence Curves of PSO, ABC, qABC and MA

PSO, ABC, qABC ve MA yöntemlerinin MSE değerlerinin iterasyona bağlı değişimini göstermektedir. Tüm algoritmalar ilk 20 iterasyonda hızlı bir hata azalımı gerçekleştirmiştir. qABC algoritması, en hızlı yakınsamayı göstererek erken iterasyonlarda düşük hata değerine ulaşmış ve genel olarak en iyi performansı sergilemiştir. MA ise daha yavaş bir yakınsama eğilimi göstermiş, ancak uzun vadede oldukça düşük MSE değerlerine ulaşarak yüksek doğruluk sağlamıştır. PSO ve ABC ise başlangıçta hızlı bir düşüş yaşamış, ancak erken doygunluğa ulaşarak daha yüksek hata seviyelerinde sabitlenmiştir. Bu durum, qABC'nin keşif-sömürü dengesini etkin yönettiğini, MA'nın ise güçlü yerel arama yetenekleriyle doğruluk avantajı sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, qABC zaman açısından avantajlı iken, MA doğruluk açısından öne çıkmaktadır.

Minimum hata değerlerinin elde edildiği koşma değerlerinde tasarlanan doğrusal zamanla değişmeyen FIR filtreler için 4. dereceden transfer fonksiyon katsayı değerleri Tablo 3.1 ile verilmiştir.

Optimizasyon algoritmalarının düşük dereceden FIR süzgeç tasarımıdaki performanslarını değerlendirmek amacıyla her algoritma için 30 bağımsız çalıştırma (run) gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar üzerinden MSE, SD, en küçük hata ve en büyük hata değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.2'de sunulmuştur.

MSE değeri bir algoritmanın doğruluğunu ölçerken, SD değeri algoritmanın çözüm kararlılığını ölçer. Düşük MSE ve düşük SD birlikte sağlandığında hem yüksek doğruluk hem de yüksek güvenilirlik elde edilmiş olur.

Gerçekleştirilen 30 bağımsız çalıştırma sonucuna göre, en düşük ortalama MSE değeri ABC algoritmasına (0.009211603) aittir ve bu durum, genel doğruluk açısından ABC'nin en başarılı algoritma olduğunu göstermektedir. Ayrıca en düşük standart sapma değeri (0.000325110) yine ABC'ye ait olup, bu algoritmanın çözüm kararlılığının da yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, MA algoritması, en düşük minimum MSE değerine (8.4115×10^{-3}) ulaşarak bazı çalışmalarda daha doğru çözümler elde etmiş, ancak görece yüksek maksimum hata ve standart sapma değerleri nedeniyle çözüm tutarlılığı açısından zayıf kalmıştır. qABC, ortalama doğrulukta PSO'ya benzer performans göstermiş olsa da, en yüksek standart sapma değeriyle sonuçlarının daha dalgalı olduğunu ortaya koymuştur. PSO algoritması ise en düşük minimum MSE değerine sahip olmasına rağmen yüksek maksimum hata değeriyle istikrarsız bir çözüm dağılımı sergilemiştir. Bu sonuçlar, özellikle doğruluk ve kararlılık birlikte değerlendirildiğinde, ABC algoritmasının modelleme problemi için en dengeli algoritma olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3.1 Uygulama 3.1 için elde edilen katsayı değerleri.

Table 3.1 Coefficient values obtained for Application 3.1.

	PSO	ABC	qABC	MA
b0	-0.0986	-0.0991	-0.0940	-0.1019
b1	0.1428	0.1418	0.1415	0.1386
b2	0.4587	0.4570	0.4610	0.4534
b3	0.4614	0.4585	0.4601	0.4564
b4	0.1410	0.1482	0.1398	0.1434

Tablo 3.2 Uygulamalarda optimizasyon algoritmaları için 30 koşma sonucu elde edilen istatistiksel MSE değerleri.

Table 3.2 Statistical MSE values obtained from 30 runs for optimization algorithms in applications.

		PSO	ABC	qABC	MA
Uygulama 3.1	MSE	0.009346250	0.009211603	0.009371881	0.009371139
	SD	0.000444878	0.000325110	0.000500186	0.000460820
	MSE _{Min}	8.3787e-03	8.4793e-03	8.4399e-03	8.4115e-03
	MSE _{Max}	1.0518e-02	9.8259e-03	1.0713e-02	1.0728e-02

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, bir FIR sistemin düşük dereceli bir model ile yaklaşık olarak temsil edilmesi amacıyla, dört farklı meta-sezgisel optimizasyon algoritması PSO, ABC, qABC ve MA kullanılarak FIR filtre sistem modelleme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde, beşinci dereceden bir FIR filtre sisteminin genlik frekans yanıtı referans alınarak, dördüncü dereceden bir FIR filtre ile MSE temelinde yaklaşık model elde edilmesi hedeflenmiştir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, frekans yanıtı analizleri ve dB ölçeğindeki güç spektrumları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. qABC algoritması, yüksek çözüm doğruluğu ve hızlı yakınsama kabiliyeti ile özellikle geçiş bandı ve zayıflama bölgelerinde orijinal sistemle en yakın eşleşmeyi sağlamıştır. MA algoritması ise daha yavaş konverjans eğilimine karşın, güçlü yerel arama özelliği sayesinde yüksek doğruluk seviyesine ulaşarak dB bazlı bastırma performansında istikrarlı sonuçlar üretmiştir.

İstatistiksel analiz sonuçları değerlendirildiğinde, en düşük ortalama MSE ve en düşük standart sapma değeri ABC algoritmasına ait olup, bu algoritma hem doğruluk hem de çözüm kararlılığı açısından en dengeli performansı sergilemiştir. MA algoritması, en düşük minimum hata değerini üretmiş ancak maksimum hata değerinin yüksek olması nedeniyle sonuç dağılımı bakımından daha dalgalı bir yapı ortaya koymuştur. qABC, genellikle yüksek doğruluk seviyelerinde çalışsa da yüksek standart sapma değeri nedeniyle tutarlılık açısından sınırlı kalmıştır. PSO, bazı durumlarda oldukça düşük hata değerleri üretmiş olsa da, geniş hata aralığı ve göreceli yüksek standart sapma nedeniyle çözüm güvenilirliği açısından en zayıf algoritma olarak değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda aşağıdaki öneriler çalışmanın bulgularına dayalı olarak sunulmaktadır:

- Model doğruluğu ve çözüm kararlılığı birlikte önem arz ettiğinde, klasik ABC algoritması tercih edilmelidir. Özellikle gömülü sistemler gibi sınırlı kaynaklarda çalışan uygulamalar için güvenilir ve istikrarlı yapısı avantaj sağlamaktadır.

- Yüksek çözüm doğruluğu gerektiren uygulamalarda, MA, lokal arama kapasitesi sayesinde başarılı çözümler sunmakta olup, doğruluğun kritik olduğu durumlarda güçlü bir alternatiftir.
- qABC algoritması, hızlı yakınsama ve güçlü keşif kapasitesiyle özellikle iterasyon sayısının kısıtlı olduğu gerçek zamanlı uygulamalar için uygundur. Ancak parametre ayarlarının dikkatle optimize edilmesi önerilir.
- PSO algoritması, bazı çalışmalarda başarılı sonuçlar üretmiş olsa da genel çözüm istikrarı düşük olduğundan, özellikle bu tür sistem modelleme problemleri için tek başına yeterli bir çözüm yöntemi olarak önerilmemektedir. Bunun yerine hibrid yapılar içinde değerlendirilmesi daha uygun olacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma FIR sistemlerin düşük dereceli modelleme süreçlerinde optimizasyon tabanlı çözüm yöntemlerinin başarımını kapsamlı biçimde ortaya koymuş; özellikle ABC ve MA algoritmalarının bu bağlamda öne çıktığını göstermiştir. Gelecek çalışmalarda, bu algoritmaların hibrit versiyonlarının geliştirilmesi, çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarının entegre edilmesi ve yüksek dereceli sistemlerin model indirgeme problemlerine uygulanması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesinde, İlayda Elik tarafından yürütülmekte olan yüksek lisans tezi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın tüm aşamalarında sağladığı bilimsel katkı, akademik rehberlik ve değerli yönlendirmelerinden dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Serdar Koçkanat'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

- [1] Ifeachor, E. C., & Jervis, B. W. (2002). Digital Signal Processing: A Practical Approach. Pearson.
- [2] Mitra, S. K. (2006). Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach. McGraw-Hill.

- [3] Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). Discrete-Time Signal Processing. Prentice Hall.
- [4] Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2007). Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications. Prentice Hall.
- [5] Antoniou, A. (2006). Digital Signal Processing: Signals, Systems, and Filters. McGraw-Hill.
- [6] Rabiner, L. R., & Gold, B. (1975). Theory and Application of Digital Signal Processing. Prentice Hall.
- [7] Tan, L., & Jiang, J. (2013). Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications. Academic Press.
- [8] Rangayyan, R. M. (2002). Biomedical Signal Analysis: A Case-Study Approach. IEEE Press.
- [9] Lyons, R. G. (2011). Understanding Digital Signal Processing. Prentice Hall.
- [10] Hayes, M. H. (1996). Statistical Digital Signal Processing and Modeling. John Wiley & Sons.
- [11] Karaboga, D. (2005). An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. Technical Report-TR06, Erciyes University.
- [12] Ljung, L. (1999). System Identification: Theory for the User. Prentice Hall.
- [13] Nelles, O. (2001). Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models. Springer.
- [14] Söderström, T., & Stoica, P. (1989). System Identification. Prentice Hall.
- [15] Sayed, A. H. (2003). Fundamentals of Adaptive Filtering. Wiley.
- [16] Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. Journal of Global Optimization.
- [17] Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks.
- [18] Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. Journal of Global Optimization.
- [19] Karaboga, D. (2005). An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. Technical Report-TR06, Erciyes University.
- [20] Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. Journal of Global Optimization.
- [21] Han, K. H., & Kim, J. H. (2002). Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation.
- [22] Gao, W., Liu, S., & Huang, L. (2021). An Improved Quantum-inspired Artificial Bee Colony Algorithm and its Application in Filter Design. Applied Soft Computing.
- [23] Wang, Y., et al. (2023). Hybrid Quantum Artificial Bee Colony Algorithm for Complex System Identification. IEEE Access.
- [24] Moscato, P. (1989). On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts: Towards Memetic Algorithms. Caltech Concurrent Computation Program.
- [25] Zhao, X., et al. (2022). Memetic Algorithm Based FIR Filter Design Optimization. Signal Processing.
- [26] Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks.
- [27] Shi, Y., & Eberhart, R. (1998). A modified particle swarm optimizer. IEEE International Conference on Evolutionary Computation.
- [28] Alatas, B., Akin, E., & Ozer, A. B. (2009). Chaos Embedded Particle Swarm Optimization Algorithms. Chaos, Solitons & Fractals.
- [29] Wang, J., et al. (2021). Adaptive PSO for Robust Digital Filter Design. Digital Signal Processing.
- [30] Karaboga, D., & Gorkemli, B. (2012). A quick artificial bee colony (qABC) algorithm and its performance on optimization problems. In *Proceedings of the 2012 International Conference on Artificial Intelligence (ICAI 2012)* (pp. 1–7). CSREA Press.
- [31] Karaboga, D., & Gorkemli, B. (2014). A Quick Artificial Bee Colony (qABC) Algorithm for Optimization Problems. *Information Sciences*, 270, 153–185.