

The Design of Bessel Type High-Pass Active Filter with Charged System Search Algorithm

Fırat Ertaç Durak^a, Bahadır Hiçdurmaz^a, Serdar Özyön^{a,1}

^a Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 43100, Kütahya, Türkiye

Abstract

Filtering is an important process used in many electronic circuit applications such as signal processing, communication and control. Electronic filter circuits that are used for filtering can be designed for many different purposes such as limiting band, passing band or stopping band for a specific frequency area. In this study, of a 10th degree Sallen-Key structure design of a Bessel Type high-pass active filter whose debilitation is much more than the other filter types in the passing band. The optimum values of the designed filter's circuit elements have been defined for the continuous case by using charged system search algorithm (CSS). The total error has been minimized by accepting the component values as unlimited for the continuous case. The obtained optimum values together with the quality factors (Q) have been presented for each layer separately and the results have been discussed.

Keywords: "Active filters, high-pass filter, Bessel Type, 10th degree filter design, Charged system search algorithm"

1. Giriş

Günümüzde aktif filtreler, özellikle alçak frekans bölgesindeki ses sinyallerinin işleminde ve biyomedikal sinyallerin analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan aktif filtre devreleri, çeşitli frekans seçici özelliklere sahip (alçak/yüksek/band geçiren gibi) filtre işlevini sağlamak adına op-amp komponenti kullanırlar. Aktif filtreler farklı yapıda mimarilere sahip olmakla beraber en yaygın kullanılan topolojisi R. Sallen ve E.L. Key tarafından sunulan Sallen-Key filtre modelidir. Bu mimaride, kararlılık yüksek olup giriş empedansı düşüktür. Bu yapıda, dört veya daha fazla kutbu olan filtreler için kaskat bağlantılar kolaylıkla oluşturulabilmektedir. [1,2].

Literatürde sıklıkla kullanılan dört klasik aktif filtre tipinden biri olan Bessel filtresi, diğer filtre türlerine göre zayıflatması geçirme bandında çok fazladır. Bununla beraber, düzgün gecikme ve lineer bir faz cevabı karakteristiğine sahip olduğundan dolayı bu çalışmada Bessel filtre tasarımına odaklanılmıştır [3].

Aktif filtre tasarımda aşılması gereken, en büyük zorluk, pasif elemanların en uygun değerlerle seçilmesi işlemidir. Bu seçim neticesinde arzu edilen genlik ve faz tepkisini elde etmek önemlidir. Tasarlanmak istenen filtrenin derecesi belirlenirken kesim frekansı ve belirtilen frekansta ne kadar sönüm olması gerektiği gibi kriterler göz önüne alınır [4,5]. Bu nedenlerden dolayı literatürde yapılan birçok çalışmada araştırmacılar, optimum değerli analog filtre bileşen değerlerinin nasıl belirleneceği üzerine araştırmalar yapmaktadır. Bu çalışmalar göstermektedir ki farklı filtre yapıları ve tipleri için birçok sezgisel algoritma kullanılarak parametre değerleri optimize edilmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, geri-izleme arama [1], yüklü sistem arama [5], gri-kurt arama [6], diferansiyel gelişim [7], armoni arama [8], klon seçim [9], genetik [10], tabu arama [11], girdap arama [12], yapay arı koloni [13], bakteri yiyecek optimizasyonu [14] ve parçacık sürü optimizasyonu [15,16], algoritmaları, belirlenen probleme başarıyla uygulanmıştır.

Bu çalışmada ise 10. dereceden Sallen-Key yapıda Bessel tip yüksek geçiren (SK-B-AGF) bir filtrenin komponent değerleri, birçok mühendislik probleminin çözümüne başarıyla uygulanmış yüklü sistem arama algoritması (CSS) ile belirlenmiştir. Algoritma ile ağırlıklı toplam metodu (ATM) ile birleştirilen filtrenin her bir katına ait frekans ölçeklendirme faktörleri (FSF) ve kalite faktörlerinden (Q) oluşan toplam hata oranı (amaç fonksiyonu) minimize edilmiştir. Amaç fonksiyonu, CSS ile 30 kez çözülmüş ve bu çözümlerden elde edilen değerler tartışılmıştır.

¹ Sorumlu Yazar. Tel.: +90-274-265-2031; fax: +90-274-265-2013.

E-posta adresi: serdar.ozyon@dpu.edu.tr

2. Yüklü Sistem Arama Algoritması (CSS)

Yüklü sistem arama algoritması (CSS), Kaveh ve Talatahari tarafından tasarlanmıştır. Bu algoritma fiziğin Coulomb ve Newton yasaları ile Newton mekaniğinin hareket yasası üzerine kuruludur. Bu yaklaşımda, bazı karar değişkenlerinden oluşan her bir çözüm adayı, yüklü bir parçacık (CP) olarak kabul edilir. Her bir yüklü parçacık diğer parçacıkların elektrik alanının etkisi altındadır. Bu parçacığa uygulanan kuvvetin büyüklüğü ve hareket durumu sırasıyla elektrik ve Newton mekaniği kanunları kullanılarak yorumlanır. Bu parçacık hareketinin temeli, iyi sonuçlara sahip bir parçacığın, daha kötü bir parçacıktan daha büyük bir kuvvet uygulamak zorunda olmasıdır. Bu algoritmanın adımları aşağıda kısaca açıklanmıştır [17,18].

1. Adım. Başlatma: Parçacıkların ilk konumları aşağıdaki formül kullanılarak arama alanında rasgele bir şekilde oluşturulur [17,18].

$$x_{i,j}^{(0)} = x_{i,\min} + rand_{ij} \cdot (x_{i,\max} - x_{i,\min}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

Burada $x_{i,j}^{(0)}$, j . parçacık için i . değişkenin ilk değeridir. $x_{i,\min}$ ve $x_{i,\max}$ sırasıyla i . değişkenin izin verilen minimum ve maksimum değerleridir. $rand_{ij}$, $[0,1]$ aralığında bir rastgele sayıdır. Ayrıca, yüklü parçacıkların ilk hızları sıfırdır.

$$v_{i,j}^{(0)} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

2. Adım. Parçacıkların yükünün hesaplanması: Üretilen her bir parçacık q_i yüküne sahiptir ve etrafında bir elektrik alan meydana getirir. Bu yükün miktarı (q_i) parçacıkların uygunluk değerine ve kalitesine göre aşağıdaki ifade ile hesaplanır [17,18].

$$q_i = \frac{fit(i) - fitworst}{fitbest - fitworst}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

Burada $fit(i)$, i . parçacığın amaç fonksiyonunun değerine eşittir. $fitbest$ ve $fitworst$, mevcut iterasyondan bu yana tüm parçacıkların amaç fonksiyonunun sırasıyla en iyi ve en kötü değerleridir. N , tüm yüklü parçacıkların sayısıdır.

3. Adım. Parçacıkları sıralama: Bu aşamada, amaç fonksiyonuna göre minimizasyon problemleri durumunda parçacıklar artan sırada sıralanırlar. Problem maksimizasyon problemi ise azalan sırada, sıralama yapılır [17,18].

4. Adım. Hafızada kaydetme: En iyi CP'lerin konumunu ve onların ilgili amaç fonksiyon değerlerini saklamak için bir hafıza düşünülür. Diğer CP'leri şimdiye kadar oluşan en iyi CP'lere yönlendirerek, hesaplama süresinde bir artış olmadan, algoritmanın performansında bir artışa neden olur [17,18].

5. Adım. Parçacıklara uygulanan elektrik kuvvetlerinin hesaplanması: Bu algoritmada her bir CP'nin, yükün üzerinde düzgün bir şekilde yayıldığı a yarıçapına sahip bir küre olduğu kabul edilir. Yarıçapın değeri, arama alanının boyutlarına göre aşağıdaki denklem ile elde edilebilir veya 1 olarak kabul edilir [17,18].

$$a = 0,01 \times \max(\{x_{i,\max} - x_{i,\min} \mid i = 1, 2, \dots, N\}) \quad (4)$$

İki yüklü parçacık arasındaki mesafe (r_{ij}) aşağıdaki denklem (5) ile hesaplanır [17,18].

$$r_{ij} = \frac{\|X_i - X_j\|}{\|(X_i + X_j) / 2 - X_{eniye}\| + \varepsilon} \quad (5)$$

Burada X_i ve X_j sırasıyla i . ve j . parçacığın konumlarıdır. X_{eniye} , popülasyondaki en iyi parçacığın konumudur. ε , küçük bir pozitif sayıdır. Herbir CP'yi diğerlerine doğru çekme olasılığı (p_{ij}) aşağıdaki formülle verilir.

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \frac{fit(i) - fitbest}{fit(j) - fit(i)} > rand \vee fit(j) > fit(i) \\ 0, & \text{değilse} \end{cases} \quad (6)$$

Son olarak her bir CP'ye uygulanan sonuç kuvveti aşağıdaki formülle hesaplanır [17,18].

$$F_j = q_j \sum_{i,i \neq j} \left(\frac{q_i}{a^3} r_{ij} i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}^2} i_2 \right) p_{ij} (X_i - X_j) \begin{cases} j = 1, 2, \dots, N \\ i_1 = 1, i_2 = 0 \Leftrightarrow r_{ij} < a \\ i_1 = 0, i_2 = 1 \Leftrightarrow r_{ij} > a \end{cases} \quad (7)$$

Burada F_j , j . parçacığa uygulanan toplam kuvvete eşittir.

6. Adım. *Parçacıkların konumlarını ve hızlarını güncelleme:* Elektrik kuvvetleri uygulandıktan sonra her bir CP 'nin yeni konumu ve hızı sırasıyla denklem (8) ve (9)'a göre elde edilir [17,18].

$$X_{j,yeni} = rand_{j1} \cdot k_a \cdot \frac{F_j}{m_j} \cdot \Delta t^2 + rand_{j2} \cdot k_v \cdot V_{j,eski} \cdot \Delta t + X_{j,eski} \quad (8)$$

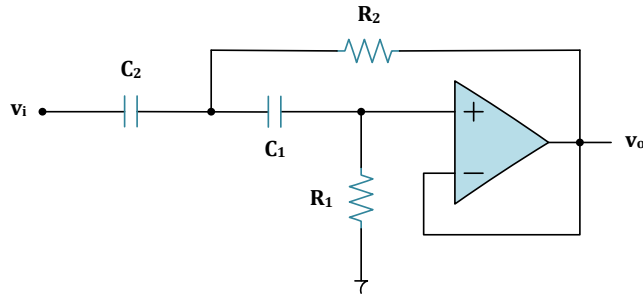
$$V_{j,yeni} = \frac{X_{j,yeni} - X_{j,eski}}{\Delta t} \quad (9)$$

Burada k_a , ivmelenme katsayısı ve k_v , hız katsayısıdır. $rand_{j1}$ ve $rand_{j2}$, [0,1] arasında düzgün bir şekilde dağılan iki rastgele sayıdır. m_j , q_j 'ye eşit j . parçacığın kütlesidir. Δt , zaman adımdır ve 1 olarak kabul edilir. k_a ve k_v katsayıları sırasıyla bir önceki hız etkilerini ve bir parçacığa uygulanan toplam gücün etkilerini kontrol ederler.

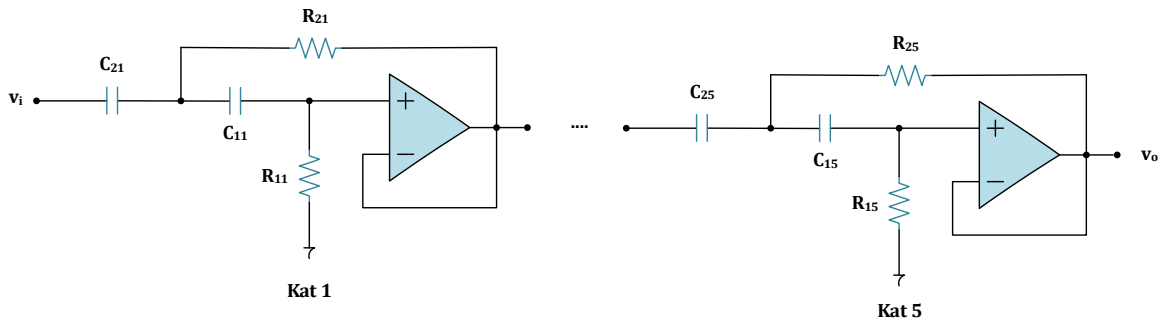
7. Adım. *Aramanın sonlanması:* CSS algoritmasında arama işlemi 2. adımdan itibaren bir sonlandırma kriteri yani önceden belirlenen iterasyon sayısı sağlanana kadar tekrarlanır [17,18].

3. Sallen-Key Yapıda Bessel Tip Alçak Geçiren Filtre Tanımı (SK-B-AGF)

Belli bir frekans değeri üzerinde kalan bileşenlerin geçişine izin veren, altındaki bileşenlerin geçişini engelleyen elektronik cihazlar yüksek geçiren aktif filtre olarak tanımlanır. Bu filtreler literatürde farklı yapılarda tasarlanırlar. Bu çalışmada ele alınan Sallen-Key yapıda 2. dereceden yüksek geçiren aktif filtrenin devre şeması Şekil 1'de verilmiştir. 10. dereceden bir yüksek geçiren aktif filtre tasarımı ise beş adet 2. dereceden devrenin art arda bağlanması ile oluşturulur ve 10. dereceden yüksek geçiren aktif filtrenin devre şeması ise Şekil 2'de verilmiştir [1-4,19].

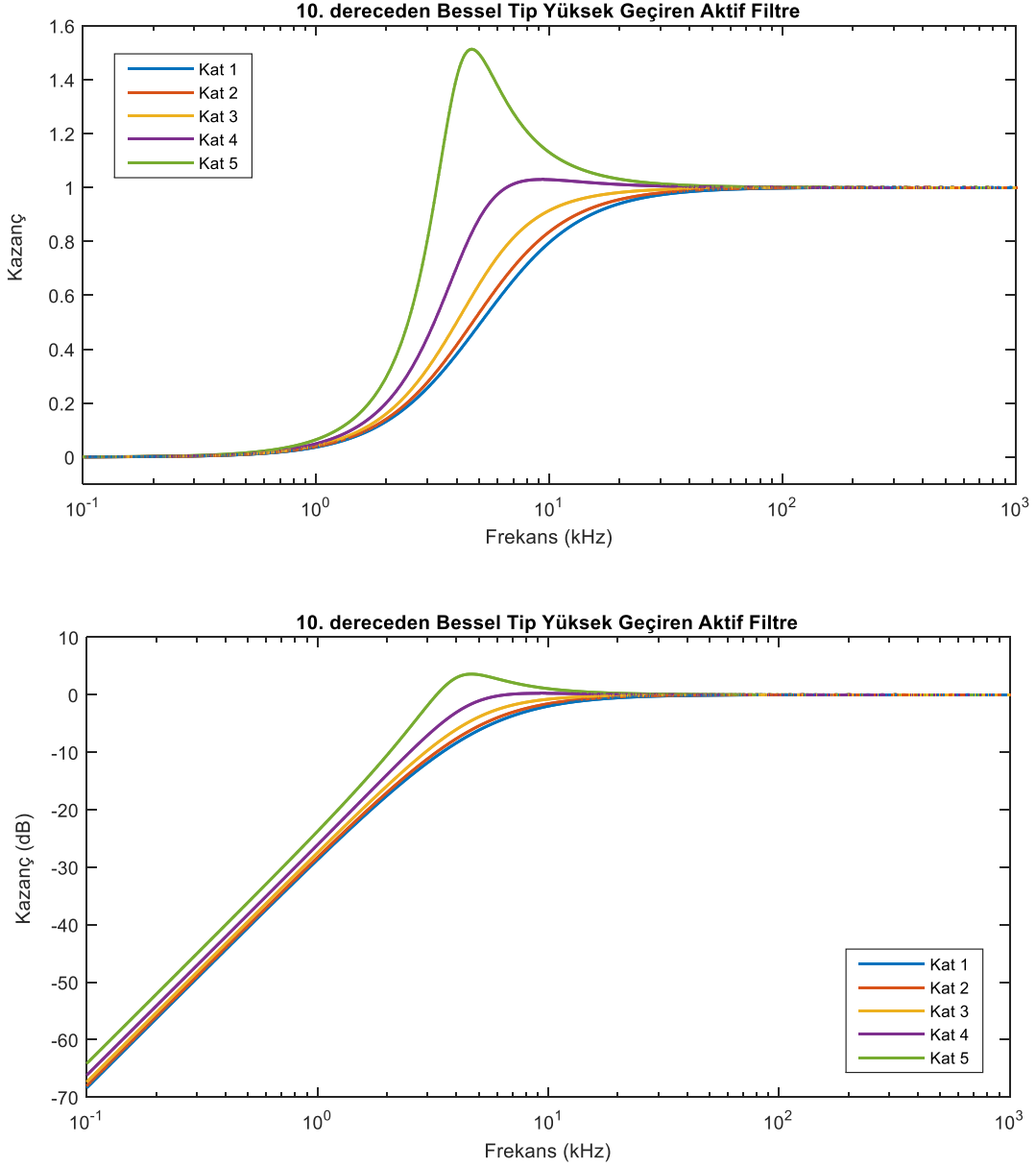


Şekil 1. 2. dereceden Sallen-Key yapıda YGF devre şeması



Şekil 2. 10. dereceden Sallen-Key yapıda YGF devre şeması

Yüksek geçiren aktif filtreler farklı amaçlara uygun şekilde farklı tiplerde dizayn edilebilirler. Bu çalışmada Bessel tip bir yüksek geçiren filtre tasarımı ele alınmıştır. Bu filtre tasarımında her kata ait 10 kHz kesim frekansı için kazanç eğrileri Şekil 3'de verilmiştir [1-4,19-20].



Şekil 3. 10. dereceden Bessel tip YGF kazanç eğrileri

Şekil 2'de verilen devrenin transfer fonksiyonu denklem (12)'de verilmiştir [1].

$$H_{YGF}(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + \frac{C_1 + C_2}{sR_1C_1C_2} + \frac{1}{s^2R_1R_2C_1C_2}}, \quad s = j2\pi f$$

$$H_{YGF}(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{2\pi f \sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \right)^2 - j \frac{C_1 + C_2}{2\pi f R_1C_1C_2}} \quad (10)$$

Transfer fonksiyonunun standart formu denklem (13)'te tanımlanmıştır [1].

$$H_{YGF}(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f_c}{FSF \cdot f}\right)^2 - j \frac{f_c}{Q \cdot FSF \cdot f}} \quad (11)$$

$$FSF = 2\pi f_c \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}; \quad Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{R_2 (C_1 + C_2)}$$

Denklemden f_c kesim frekansını, FSF frekans ölçeklendirme faktörünü ve Q kalite faktörünü göstermektedir. Tasarlanan filtrenin genlik tepkisi ise denklem (14)'de tanımlanmıştır. 10. dereceden Bessel tip bir filtre tasarlamak için her kattaki FSF ve Q değerleri Tablo 1'de verilmiştir [1-4,19].

$$|H_{YGF}(f)| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f_c}{FSF \times f}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{f_c}{Q \times FSF \times f}\right)^2}} \quad (12)$$

Tablo 1. 10. dereceden Bessel tip filtre için FSF ve Q değerleri

Filtre Derecesi	Kat 1		Kat 2		Kat 3		Kat 4		Kat 5	
	FSF	Q	FSF	Q	FSF	Q	FSF	Q	FSF	Q
10	1,9490	0,5040	1,9870	0,5380	2,0680	0,6200	2,2110	0,8100	2,4850	1,4150

CSS algoritması ile Şekil 3'de verilen devre şemasının her bir kata ait her bir pasif bileşeni, Tablo 2'de gösterildiği gibi dizi formunda kodlanmıştır. Bu durumda, filtrenin bileşen değeri, hata en aza indirilinceye kadar art arda CSS tarafından ayarlanır. Filtrenin tasarım hatası, FSF ve Q 'nun maliyet fonksiyon hatalarının toplamıdır ve denklem (26)'da verilmiştir. Denklemden yer alan $FSF_{t,i}$ hedeflenen FSF değeri, $Q_{t,i}$ ise hedeflenen Q değeridir. Burada amaç toplam hatayı minimize etmektir. FSF ve Q iki farklı amaç değeri olduğu için bu değerler literatürde birçok uygulaması olan ağırlıklı toplam metodu ile tek bir amaç fonksiyonuna dönüştürülmüştür ($Hata_{toplam}$) [1].

$$Hata_1 = \sum_{i=1}^5 \frac{|FSF_{t,i} - FSF_i|}{FSF_{t,i}}, \quad Hata_2 = \sum_{i=1}^5 \frac{|Q_{t,i} - Q_i|}{Q_{t,i}} \quad (13)$$

$$Hata_{toplam} = 0.5 \times Hata_1 + 0.5 \times Hata_2$$

Tablo 2. Komponent değerlerinin algoritmada dizi biçiminde temsili

Kat 1				...	Kat 5			
R ₁₁	C ₁₁	R ₂₁	C ₂₁	...	R ₁₅	C ₁₅	R ₂₅	C ₂₅

Problemin çözümünde kullanılan CSS algoritmasına ait parametre değerleri iterasyon sayısı 1000, popülasyondaki parçacık sayısı 40, boyut (bilinmeyen sayısı) 20, başlangıç k_v 0,8, bitiş k_v 0,2, başlangıç k_a 0,8, bitiş k_a 0,2 ve ε 1e-6 olarak alınmıştır. Problem bu parametrelerle CSS algoritması ile 30 kez çözülmüştür. Tasarlanan filtre için CSS tarafından bulunan komponent değerleri Tablo 3'de, tasarlanan filtre için bulunan bu komponent değerleriyle bütün katmanlar için hesaplanan FSF ve Q değerleri Tablo 4'de ve 30 çözümden en iyi hata değerinin elde edildiği çözüme ait istatistikî değerler ise Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 3. CSS tarafından eniyi çözümde belirlenen komponent değerleri

	Komponent	Kat 1	Kat 2	Kat 3	Kat 4	Kat 5
CSS	R_1 (k Ω)	9,473162	13,410382	8,254952	6,157426	12,297382
	R_2 (k Ω)	7,544728	8,531661	5,365314	2,345978	1,535464
	C_1 (nF)	5,860265	1,676790	5,071842	9,164595	9,108934
	C_2 (nF)	2,297249	5,212939	4,822429	9,353655	9,094385

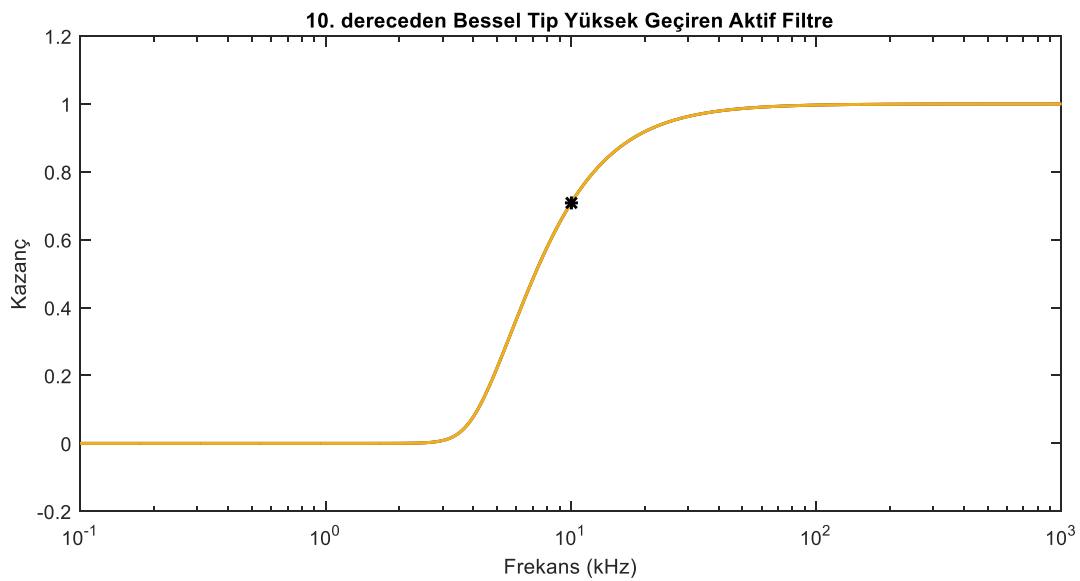
Tablo 4. CSS tarafından eniyi çözümde belirlenen FSF ve Q değerleri

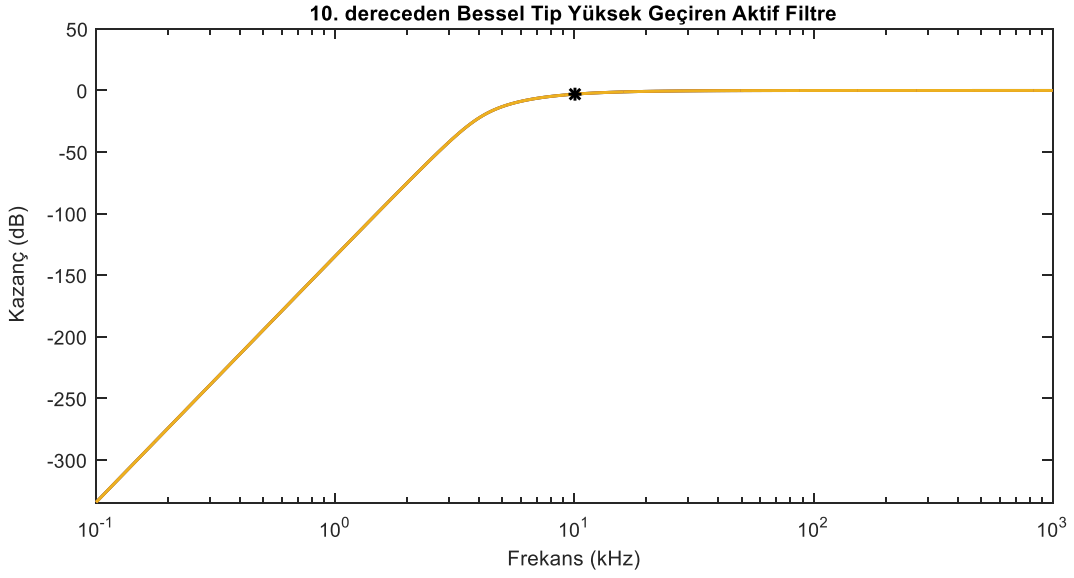
	Kat 1		Kat 2		Kat 3		Kat 4		Kat 5	
	FSF	Q	FSF	Q	FSF	Q	FSF	Q	FSF	Q
Hedef	1,9490	0,5040	1,9870	0,5380	2,0680	0,6200	2,2110	0,8100	2,4850	1,4150
CSS	1,9490	0,5040	1,9870	0,5380	2,0680	0,6200	2,2110	0,8100	2,4850	1,4150

Tablo 5. 30 çalışmada elde edilen değerler

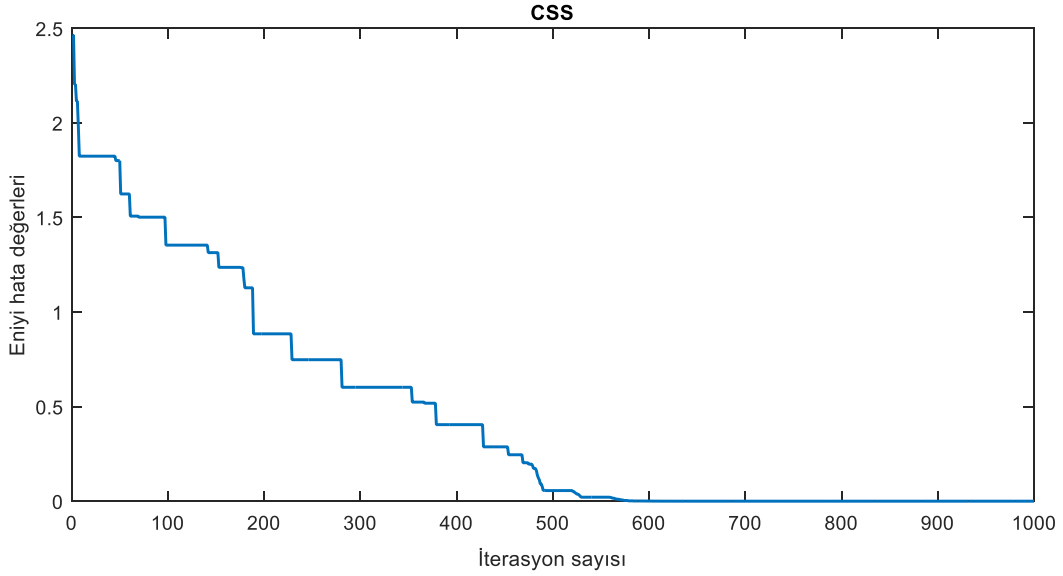
	Eniyi Hata	Ortalama Hata	Enkötü Hata	Std Sapma	Süre (sn)
CSS	9,212219e-10	2,613652e-02	1,877708e-01	5,188897e-02	7,86165

Tasarlanan filtrenin CSS algoritmasıyla çözümünde elde edilen kazanç eğrileri Şekil 4'de verilmiştir. Algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değerine ait yakınsama eğrisi ise Şekil 5'de görülmektedir.





Şekil 4. CSS ile elde edilen 10. dereceden Bessel tip YGF kazanç eğrileri



Şekil 5. CSS ile elde edilen iterasyon sayısına göre yakınsama eğrileri

4. Sonuçlar

Çalışmada 10. dereceden Sallen-Key yapıda Bessel tip yüksek geçiren bir filtrenin tasarımı yapılmıştır. Tasarımda filtre devre elemanları yüklü sistem arama algoritması ile sürekli durum için belirlenmiş ve bu değerlerle FSF ve Q faktörleri hesaplanmıştır. Belirlenen amaç fonksiyonu CSS algoritması ile 30 kez çözülmüştür. Bu çözümlerde CSS algoritması devre elemanlarının değerlerini başarıyla belirlemiştir. Algoritmanın probleme uygulanmasında, artarda bağlanan beş adet 2. dereceden aktif filtrenin yirmi adet komponenti, teorik olarak Bessel tip filtreye ait olan FSF ve Q değerlerini minimum hata ile yakalamak üzerine belirlenmiştir. CSS algoritması ile yapılan 30 ayrı aramada elde edilen hata değerlerine bakıldığında, başarı oranı oldukça yüksektir. En iyi çözüm değeri incelendiğinde algoritma yaklaşık 580. İterasyonda en iyi hata değerini yakalamıştır. Sonraki yapılacak çalışmalarda farklı yapı, tip ve dereceden aktif filtrenin tasarlanması planlanmaktadır. Bunun yanında ileride yapılacak araştırmalarda bu çalışmada ele alınmayan komponent değerlerinin belirli bir üretim serisinden seçilmesi durumuna farklı meta-sezgisel algoritmalarla çözüm aranacaktır.

Bilgilendirmeler

Bu çalışma Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi ve İstanbul Gedik Üniversitesi destekleriyle Ankara’da düzenlenen 4. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi-Mühendislik (4.Bilmes-En 2019) sempozyumunda özet metin bildiri olarak sözlü sunulmuştur.

5. Referanslar

- [1] B. Durmuş, B. Hiçdurmaz, H. Temurtaş, S. Özyön, “Defining the Parameters of the High Pass Active Filter by Using Backtracking Search Algorithm” Proceedings of 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences 9 (2016) 2429-2435.
- [2] R.P. Sallen, E.L. Key, “A practical method of designing RC active filters” IRE Transactions on Circuit Theory 2(1) (1955) 74-85.
- [3] https://tr.qwertyu.wiki/wiki/Bessel_filter
- [4] R. Mancini, “Op Amps for Everyone - Design References” Texas Instruments 2002.
- [5] B. Durmuş, H. Temurtaş, S. Özyön, “Optimizasyon algoritmalarının ile çoklu geri-beslemeli yüksek geçiren aktif filtre tasarımı” Mühendislik Alanında Araştırma ve Değerlendirmeler, Editör: Dr. Mahmut TURAN, p.123-147, Gece Akademi, 2019, Ankara. ISBN: 978-605-7852-96-0.
- [6] G.G. Bulut, H. Güler, M.T. Özdemir, “Optimal selection of components in a sixthorder Butterworth low-pass filter with using grey wolf algorithm” International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication 5(10) (2017) 1-4.
- [7] A.F. Sheta, “Analogue filter design using differential evolution,” International Journal of Bio-Inspired Computation 2(3) (2010) 233-241.
- [8] R.A. Vural, U. Bozkurt, T. Yildirim, “Analog active filter component selection with nature inspired metaheuristics” AEÜ - International Journal of Electronics and Communications 67(3) (2013) 197-205.
- [9] M. Jiang, Z. Yang, Z. Gan, “Optimal components selection for analog active filters using clonal selection algorithm” Proceedings of International Conference on Intelligent Computing (2007) 950-959.
- [10] D.H. Horrocks, M.C. Spittle, “Component value selection for active filters using genetic algorithms” Proceedings IEEE Workshop on Natural Algorithms in Signal Processing 1(13) (1993) 1-6.
- [11] A. Kalinli, “Component value selection for active filters using parallel tabu search algorithm” AEÜ - International Journal of Electronics and Communications 60 (2006) 85-92.
- [12] B. Doğan, T. Ölmez, “Vortex search algorithm for the analog active filter component selection problem” AEÜ - International Journal of Electronics and Communications 69(9) (2015) 1243-1253.
- [13] D. Bose, S. Biswas, A.V. Vasilakos, S. Laha, “Optimal filter design using an improved artificial bee colony algorithm” Information Sciences 281 (2014) 443-461.
- [14] S. Gholami-Boroujeny, M. Eshghi, “Non-linear active noise cancellation using a bacterial foraging optimisation algorithm” IET Signal Processing 6 (2012) 364-373.
- [15] B. Nayak, T.R. Choudhury, B. Misra, “Component value selection for active filters based on minimization of GSP and E12 compatible using Grey Wolf and Particle Swarm Optimization” AEÜ - International Journal of Electronics and Communications 87 (2018) 48-53.
- [16] B.P. De, R. Kar, D. Mandal, S.P. Ghoshal, “Optimal selection of components value for analog active filter design using simplex particle swarm optimization” International Journal of Machine Learning and Cybernetics 6(4) (2015) 621-636.
- [17] A. Kaveh, S. Talahatari, “A novel heuristic optimization method: charged system search” Acta Mechanica 213(3-4) 2010 267-289.

[18] A. Kaveh, M. Khanzadi, M.R. Moghaddam, M. Rezazadeh, "Charged system search and magnetic charged system search algorithms for construction site layout planning optimization" *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 62(4) 2018 841-850.

[19] J. Karki, "Active low-pass filter design" Texas Instruments, Dallas-Texas, Application Rep. SLOA049B, 2002.

[20] U. Demiroğlu and B. Şenol, "Analytical Design of PI Controllers for First Order plus Time Delay Systems," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS Journal)*, 2(2):40-47, 2018