

Özyinelemeli Oustaloup Filtre Yaklaşımını Kullanan Kesir Dereceli PID Kontrolcüsünde Bulunan N Değerinin Sistem Performansına Etkisi

Effect of N Value on System Performance in Fractional Order PID Controller Using Recursive Oustaloup Filter Approach

Ebubekir Kökçam¹, Nusret TAN²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bingöl Üniversitesi, Bingöl
ekokcam@bingol.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İnönü Üniversitesi, Malatya
nusret.tan@inonu.edu.tr

Özetçe

Özyinelemeli Oustaloup Filtre yaklaşımı kesir dereceli integral/türev yaklaşık olarak oransal transfer fonksiyonuna dönüştürmesine sağlayan bir metottur. Bu yöntem N değerine bağlı olarak sistemin veya kontrolcünün kompleksliğini ve derecesini değiştirmektedir. Bu çalışmada farklı N değerlerine sahip, kesir dereceli PID kontrolcüler tasarlanılmış ve farklı sistemler üzerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kesir dereceli PID ve PID kontrolcülerin parametrelerinin bulunması için sezgisel algoritmalarından biri olan ateş böceği algoritması kullanılmıştır.

Abstract

The Recursive Oustaloup Filter approach is a method that allows it to transform a fractional integrator/derivative into an approximate rational transfer function. This method changes the complexity and degree of the system or controller depending on the N value. In this study, fractional order PID controllers with different N values were designed and applied on different systems and the results were compared. The Firefly algorithm, which is one of the heuristic algorithms, is used to find the parameters of fractional order PID and PID controllers.

1. Giriş

Literatürde pek çok kontrolcü bulunmasına rağmen, PID kontrolcü basit yapısı, kullanımın kolaylığı ve anlaşılmasının kolay olması ve onlarca farklı şekilde parametre değerlerinin hesaplanabilmesinden dolayı en yaygın olarak kullanılan kontrolcüdür [1], [2]. Kontrol edilen sistemin performansını ve gürbüzlüğünü iyileştirmek için çok farklı kontrolcüler geliştirilmiştir ve bunlardan biri de kesir dereceli PID kontrolcüdür.

Kesir dereceli kontrolcüler aslında sonsuz dereceli kontrolcülerdir ve bundan dolayı doğrudan uygulanamazlar [3]. Bunların sürekli zamanlı kontrolcü olarak uygulanabilmesi için, kesir dereceli PID yapısının, tam sayı dereceli transfer fonksiyonuna dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu durumu gerçekleştirmek için Oustaloup, Charef, ve Matsuda metotları geliştirmiştir [4]–[6].

PID kontrolcüler veya kesir dereceli PID kontrolcülerin parametreleri yüksek dereceli sistemleri kontrol etmek için kullanıldığında, kontrol edilen sistem genellikle zaman gecikmeli olan ikinci dereceli veya birinci derece olan sistemlere indirilirler. İndirilen sistem kullanılarak kontrolcü parametreleri çeşitli yöntemlerle elde edilebilir [7]–[9]. Bu yöntemin performansı genellikle model indirgenme metodunun isabetine bağlıdır [8]. Bunun dışında, kontrolcü parametrelerini bulmak için karınca koloni algoritması (KKA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), yapay arı kolonisi (YAK), genetik algoritma (GA) ve ateş böceği algoritması (ABA) gibi sezgisel algoritmalar da kullanılmaktadır [10]–[14].

Jie ve ark. yaptığı çalışmada kesir dereceli PD+I algoritmasının Modifiye edilmiş Özyinelemeli Oustaloup Filtre yaklaşımında N=1 olarak oransal transfer fonksiyonunu dönüştürmüşler ve bu kontrolcünün klasik kesir dereceli PID ile karşılaştırarak daha hızlı bir şekilde hesaplandığını, uygulanabilirliğinin daha kolay olduğu ve kapalı çevrim sisteminin performansının tatmin edici olduğunu göstermişlerdir. Kontrolcü parametreleri bulmak için GA kullanılmıştır [15].

Bu çalışmada Oustaloup özyinelemeli filtre yapısı kullanılarak kesir dereceli PID kontrolcü tam dereceli bir transfer fonksiyonuna dönüştürülmüş, parametreleri ateş böceği algoritması kullanılarak hesaplanmış ve kontrolcünün derecesinin sistem performansı üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu benzetim çalışmaları ile incelenmiştir. Farklı N değerlerine sahip kesir dereceli PID kontrolcüler karşılaştırılmıştır. Kontrol edilen sistemlerin tümü yüksek dereceli transfer fonksiyonlarıdır.

Birinci kısım giriş kısmıdır. İkinci kısım Özyineleme Oustaloup yapısı hakkında bilgi verilmiştir, üçüncü kısımda kesir dereceli PID hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde ateş böceği algoritması anlatılmıştır. Beşinci bölümde benzetim çalışmaları yapılmış ve altıncı bölümde sonuçlandırılmıştır.

2. Oustaloup Özyinelemeli Metodu

Oustaloup özyinelemeli filtresi, kesir dereceli sonsuz derecedeki yapıyı sonlu dereceli transfer fonksiyonuna dönüştürmek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir [6], [16] Bu yöntemin formülasyonu denklem (1)'de verilmiştir.

$$s^\alpha = G(s) = \sum_{k=-N}^{k=N} K \frac{s + \hat{w}_k}{s + w_k}, K = w_h^\alpha, \quad (1)$$

$$\hat{w}_k = w_l \left(\frac{w_h}{w_l} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1-\alpha)}{2N+1}},$$

$$w_k = w_l \left(\frac{w_h}{w_l} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1+\alpha)}{2N+1}}$$

Burada w_h ve w_l sırasıyla üst ve alt frekans sınırları göstermekte, $2N+1$ ise kesirli ifadenin kaçınıcı dereceden temsil edeceğini gösterir ve α ise kesir derecesinin değerini temsil etmektedir. Bu çalışmada alt ve üst frekanslar sırasıyla [0.001,1000] olarak seçilmiştir.

3. Kesir Dereceli PID

PID yöntemine göre 2 ekstra parametreye sahip olduğu için genellikle daha iyi performansla sahip olan kesir dereceli PID, denklem (2) de verilmiştir.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (2)$$

Burada K_p , K_i , K_d , λ , μ sırasıyla oransal katsayısı, integral alıcı katsayısı, türev alıcı katsayısı, integral alıcı derecesini ve türev alıcı derecesini göstermektedir. Kesir dereceleri $0 < \lambda < 2$ ve $0 < \mu < 2$ bu aralıkta seçilmektedir. Bu yapı Oustaloup metodu ile transfer fonksiyonuna dönüştürülürse, sistemin tipi 0 ve $\lambda < 1$ ise sistemde kararlı durum hatası oluşacağı söylenebilir. Bu ifade Oustaloup yaklaşımı için geçerliyse, FOMCON kütüphanesinde bulunan oustapid fonksiyonu ve NINTEGER kütüphanesinde bulunan nipid fonksiyonunda geçerli olmayabilir. Bunun nedeni ise her iki fonksiyonda integral alıcı kısım denklem (3)'deki gibi hesaplanmıştır [17], [18].

$$\frac{1}{s^\alpha} = \frac{1}{s} s^{(1-\alpha)}, \alpha < 1 \quad (3)$$

3. Ateş Böceği Algoritması

Ateş böceği algoritması, nüfus tabanlı, Xin-She Yang tarafından 2007'de geliştirilmiş sezgisel bir algoritmadır [19]. Bu yöntem üç temel kurala bağlı olarak geliştirilmiştir. (1) Bütün ateşböcekleri tek cinsiyetlidir yani cinsiyetsizdir ve daha parlak ve çekim gücü yüksek olanlara doğru hareket ederler. (2) ateş böceğindeki çekim gücü, parlaklıkla doğru,

mesafe ile ters orantılıdır. (3) Popülasyondaki bir ateş böceğinde kendisinden daha parlak bir ateş böceği yoksa rasgele olarak hareket eder. Ateş böceğinin çekim fonksiyonu denklem (4)'teki gibi verilebilir [19].

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m} m \geq 1 \quad (4)$$

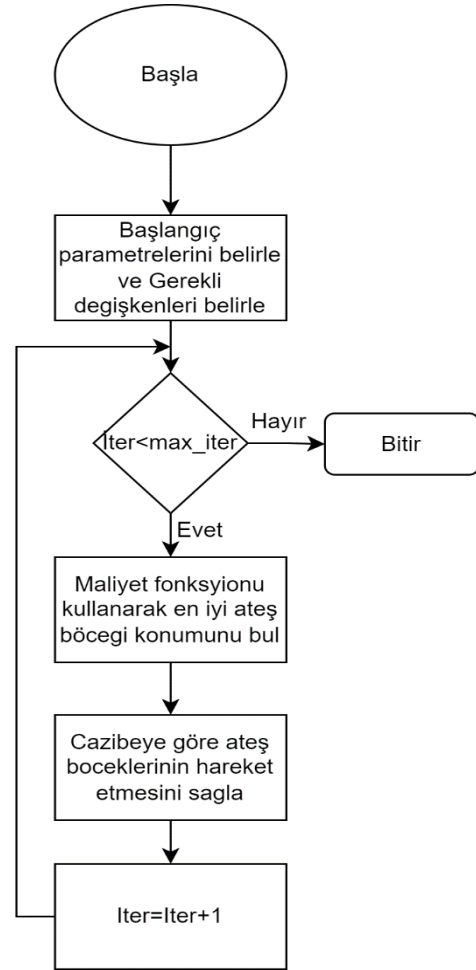
Burada r iki ateşböceği arasındaki mesafeyi, β_0 ise $r=0$ için ateş böceğinin başlangıç çekim değerini, γ ise emilim katsayısını gösterir. Popülasyonda bulunan i ve j inci ateş böceği arasındaki mesafe ölçümü denklem (5)'te verilmiştir [19].

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=0}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (5)$$

Burada d boyutu göstermektedir ve Kartezyen düzlemde mesafe ölçüldüğü için 2 olarak belirlenebilir. i 'inci ateş böceği daha parlak ateş böceğine doğru (j inci ateşböceğine) hareketi denklem (6)'da verilmiştir.

$$x_{i+1} = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i \quad (6)$$

Bu i 'deki ateş böceğinin konumunun nasıl değişeceğini ifade etmektedir. $\alpha \in (0,1)$ parametresi rastgele seçilen bir parametre ve ε_i sayısı ise Gauss veya düzgün dağılıma bağlı olarak seçilen bir sayıyı göstermektedir. Yakınsama hızı γ ile ilgilidir ve genellikle 0.1 ile 10 arasında seçilir [19].



Şekil 1: Ateş Böceği Algoritmasının akış diyagramı

4. Amaç Fonksiyonu

Sistemin performansı için optimal parametreleri bulmak için kullanılan bir değerlendirme fonksiyondur. Bu değer soruya bağlı olarak fonksiyonu minimize veya maksimize etmek için kullanılır. Kontrol sistemlerinde en çok kullanılan maliyet fonksiyonlarının bazıları denklem (7)'de verilmiştir.

$$IAE = \int_0^T |e(t)|$$

$$ITAE = \int_0^T |e(t)|t$$

$$ISE = \int_0^T e(t)^2$$

$$ITSE = \int_0^T e(t)^2t$$
(7)

IAE, ITAE, ISE, ITSE sırasıyla mutlak hatanın toplamı, zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı, hatanın karesinin toplamı, zaman ağırlıklı hatanın karesinin toplamını ifade etmektedir. $e(t)$, t anındaki hata değerini t ise o andaki zaman değerini gösterirken, T simülasyon süresini gösterir. Bu çalışma için seçilen maliyet fonksiyonu denklem (8)'de verilmiştir.

$$J = w_1 * ITAE + w_2 * Ts + w_3 * M_p$$
(8)

Burada w_1 , w_2 , w_3 pozitif ağırlıklandırma katsayılarını, Ts yerleşme süresini, M_p ise aşım değerinin yüzdesini gösterir. Bu çalışmada, bütün örneklerde, $w_1=1$, $w_2=100$ ve $w_3=30$ olarak seçilmiştir.

5. Numerik Çalışmalar ve Değerlendirme

Ateş böceği algoritmasının parametreleri $\gamma = 1$, $m = 2$, $\beta_0 = 2$, $\alpha = 0.2$ olarak seçilmiştir. Maksimum iterasyon olarak 50 ve popülasyon olarak 200 seçilmiştir. Seçilen sistemlerdeki benzetim çalışmalarında kontrol edilecek bütün sistemlerin şu şartları sağlaması gerekmektedir. Bütün sistemlerde kazanç marjininin 9.99dB den büyük ve faz marjininin 45 dereceden büyük olması istenmektedir. Kesir dereceli PID kontrolcüsündeki arama uzayındaki sınırlar sırasıyla $[K_p, K_i, K_d, \lambda, \mu]$ parametrelerinin sınırlarını göstermek için kullanılacaktır.

Örnek-1: Kontrol edilecek sistemin transfer fonksiyonu denklem (9)'da verilmiştir.

$$P_1(s) = \frac{1}{s(s+1)^3}$$
(9)

Birinci örnek için PID arama uzayı üst sınır= [2 2 2], alt sınır= [0 0 0], FOPID kontrolcüsü arama uzayı üst sınır= [2 2 2 2 2] ve alt sınır = [0 0 0 0 0] olarak seçilmiştir. Birinci örnek için ateş böceği optimizasyonla elde edilen parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen kontrolcü parametreleri kullanılarak benzetim çalışması yapıldığında, Tablo 2'deki ve Şekil 2'deki sonuçlar elde edilmiştir.

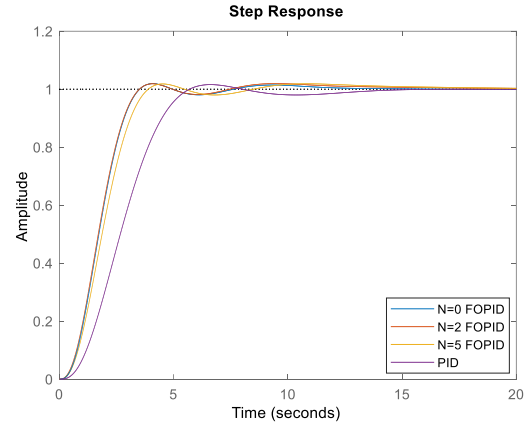
Tablo 1: Birinci örneğin kontrolcü parametreleri

Kontrolcü	N	K _p	K _i	K _d	λ	μ
FOPID	5	0.56	0	1.5	0.74	1.187
FOPID	2	0.623	0	1.76	1.75	1.216
FOPID	0	0.577	0	1.72	2	1.05
PID	-	0.355	0	0.743	-	-

Tablo 2: Birinci örneğin performans sonuçları

Kontrolcü	N	T _s	M _p (%)	G _m	P _m	E _{ss}
FOPID	5	3.63	1.96	15.7	68.6	0
FOPID	2	3.29	1.92	15	68.6	0
FOPID	0	3.3	1.92	14.1	68.1	0
PID	-	5.3	1.58	15.6	66.8	0

Tablo 2'de verilen M_p aşım yüzdesini, G_m kazanç marjini, P_m faz marjini, T_s yerleşme süresini ve E_{ss} ise kalıcı durum hatasını göstermektedir.



Şekil 2: Birinci örnekteki sistemlerin birim basamak cevabı

Örnek 1'de verilen sistemin tipi 1 olduğu için kalıcı durum hatası bulunmamaktadır. Verilen arama uzayı içinde ateş böceği optimizasyonu kullanıldığında $K_i=0$ olarak bulunmuştur.

Örnek 2: ikinci örnek için verilen transfer fonksiyonu denklem (10)'da gösterilmektedir.

$$P_2(s) = \frac{1}{(s+1)^5}$$
(10)

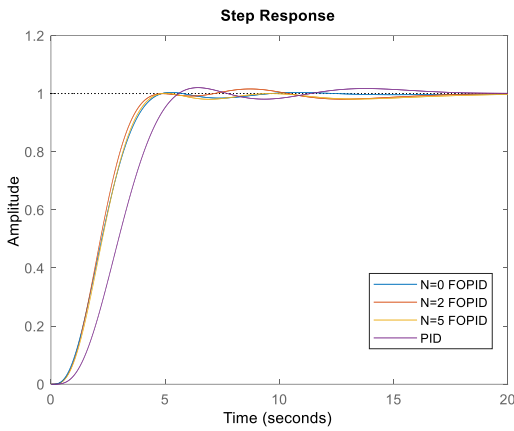
İkinci örnek için PID arama uzayı üst sınır= [5 5 5], alt sınır= [0 0 0], FOPID kontrolcüsü arama uzayı üst sınır= [5 5 5 2 2] ve alt sınır = [0 0 0 0.5 0.5] olarak seçilmiştir. İkinci örnek için ateş böceği optimizasyonla elde edilen parametreleri Tablo 3'de verilmiştir. Tablo 3'de verilen parametreler kullanılarak benzetim çalışması yapıldığında, Tablo 4'deki ve Şekil 3'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3: İkinci örneğin kontrolcü parametreleri

Kontrolcü	N	Kp	Ki	Kd	λ	μ
FOPID	5	2.024	0.383	3.124	1.016	1.288
FOPID	2	2.073	0.416	3.395	1.013	1.283
FOPID	0	2.53	0.197	3.06	1.112	1.198
PID	-	1.192	0.34	1.64	-	-

Tablo 4: İkinci örneğin performans sonuçları

Kontrolcü	N	Ts	Mp(%)	Gm	Pm	E_{ss}
FOPID	5	4.28	0.1360	11.2	65.2	0
FOPID	2	4.15	1.61	10.9	63.7	0
FOPID	0	4.37	0.426	12.9	67.1	0
PID	-	5.29	1.9	10.5	66.5	0



Şekil 3: İkinci örnekteki sistemlerin birim basamak cevabı

Örnek 3: Üçüncü örnek için verilen transfer fonksiyonu denklem (11)'de verilmiştir.

$$P_3 = \frac{1}{(s+1)^7} \quad (11)$$

Üçüncü örnek için PID arama uzayı üst sınır= [5 5 5], alt sınır= [0 0 0], FOPID kontrolcüsü için arama uzayı üst sınır= [2 2 2 1.5 1.5] ve alt sınır= [0 0 0 0.5 0.5] olarak seçilmiştir. Üçüncü örnek için ateş böceği optimizasyonla elde edilen parametreler Tablo 5'de verilmiştir. Tablo 5'de verilen parametreler kullanılarak benzetim çalışması yapıldığında, Tablo 6'daki ve Şekil 4'teki sonuçlar elde edilmiştir.

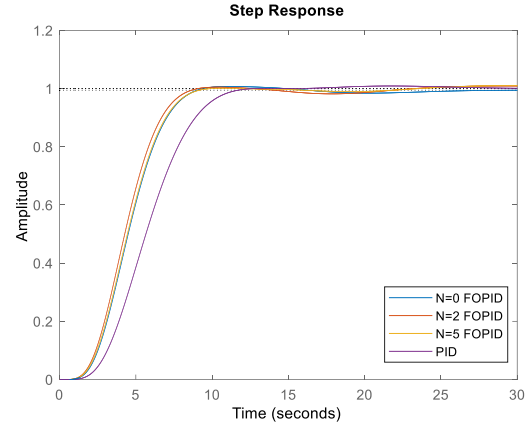
Tablo 5: Üçüncü örneğin kontrolcü parametreleri

Kontrolcü	N	Kp	Ki	Kd	λ	μ
FOPID	5	1.323	0.176	2.667	1.06	1.318
FOPID	2	1.379	0.19	3.026	1.046	1.326
FOPID	0	1.108	0.214	2.619	0.977	1.082
PID	-	0.745	0.173	1.16	-	-

Tablo 6: Üçüncü örneğin performans sonuçları

Kontrolcü	N	Ts	Mp(%)	Gm	Pm	E_{ss}
FOPID	5	8.43	1.11	10	65.1	0
FOPID	2	8.04	0.907	10.1	64.8	0
FOPID	0	8.28	1.29	10	63.7	0.005
PID	-	10.8	0.904	10	64.6	0

N=0 olan FOPID kontrolcüsünde kararlı durum hatası bulunmaktadır.



Şekil 4: Üçüncü örnekteki sistemlerin birim basamak cevabı

Örnek 4: Dördüncü örnek için verilen transfer fonksiyonu denklem (12)'de verilmiştir.

$$P_4 = \frac{1-2s}{(s+1)^3} \quad (12)$$

Dördüncü örnek için PID arama uzayı üst sınır= [2 2 2], alt sınır= [0 0 0], FOPID kontrolcüsü arama uzayı üst sınır= [2 2 2 1.5 1.5] ve alt sınır= [0 0 0 0.5 0.5] olarak seçilmiştir. Dördüncü örnek için ateş böceği optimizasyonla elde edilen parametreler Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'de verilen parametreler kullanılarak benzetim çalışması yapıldığında, Tablo 8'deki ve Şekil 5'teki sonuçlar elde edilmiştir.

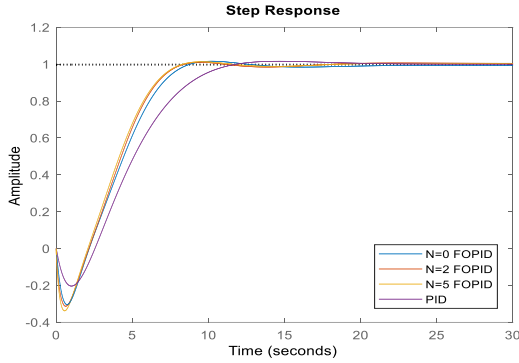
Tablo 7: Dördüncü örneğin kontrolcü parametreleri

Kontrolcü	N	Kp	Ki	Kd	λ	μ
FOPID	5	0.588	0.197	0.422	1.018	1.287
FOPID	2	0.588	0.197	0.395	1.018	1.267
FOPID	0	0.495	0.199	0.374	0.955	1.093
PID	-	0.36	0.173	0.242	-	-

Tablo 8: Dördüncü örneğin performans sonuçları

Kontrolcü	N	Ts	Mp(%)	Gm	Pm	E_{ss}
FOPID	5	7.57	1.32	10.1	59.5	0
FOPID	2	7.28	1.45	10.2	59.8	0
FOPID	0	7.94	2.3	10.4	59.5	0.007
PID	-	10.6	1.58	10	61.1	0

N=0 olan FOPID kontrolcüsünde kararlı durum hatası bulunmaktadır.



Şekil 5: Dördüncü örnekteki sistemlerin birim basamak cevabı

Örnek 5: Beşinci örnek için verilen transfer fonksiyonu denklem (13)'de verilmiştir.

$$P_5 = \frac{e^{-s}}{(s+1)^3} \quad (13)$$

Beşinci örnek için PID arama uzayı üst sınır= [2 2 2], alt sınır= [0 0 0], FOPID kontrolcüsü arama uzayı üst sınır= [2 2 2 1.5 1.5] ve alt sınır = [0 0 0 0.5 0.5] olarak seçilmiştir. Beşinci örnek için ateş böceği optimizasyonu kullanılarak elde edilen parametreler Tablo 9'da verilmiştir. Tablo 9 verilen parametreler kullanılarak benzetim çalışması yapıldığında, Tablo 10 ve Şekil 6'daki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 9: Beşinci örneğin kontrolcü parametreleri

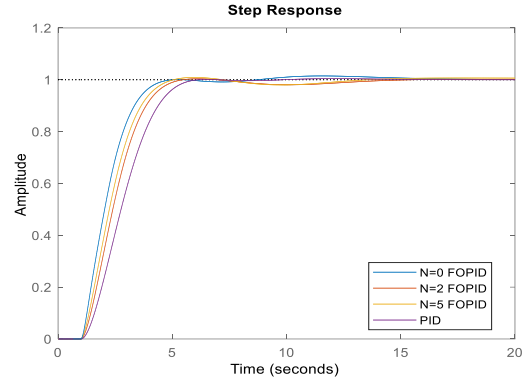
Kontrolcü	N	Kp	Ki	Kd	λ	μ
FOPID	5	1.485	0.358	1.276	1.047	1.279
FOPID	2	1.267	0.366	1.111	1.014	1.172
FOPID	0	2.0	0.235	1.48	1.101	1.19
PID	-	0.94	0.348	0.795	-	-

Tablo 10: Beşinci örneğin performans sonuçları

Kontrolcü	N	Ts	Mp(%)	Gm(db)	Pm	E_{ss}
FOPID	5	4.5	0.91	10.04	63.8	0
FOPID	2	4.75	0.383	10	64.4	0
FOPID	0	4.2	1.5	10	66.8	0
PID	-	5.3	0.45	10	64.9	0

Tek dikkat çekici sonuç N=0 kesir dereceli PID kontrolcüye sahip sistemlerin örnek 3'te ve örnek 4'de kalıcı durum hatası bulunmasıdır. Bunun nedeni ise λ değeri birden küçük ise kontrolcüde klasik bir integral alıcı kısmı

bulunmasıdır. Bu sorunu çözmek için, sistemin tipi sıfır ise sezgisel algoritmadaki arama uzayındaki λ değerinin alt sınırının en az 1 seçilerek kalıcı durum hatası engellenebilir.



Şekil 6: Beşinci örnekteki sistemlerin birim basamak cevabı

. Beşinci örneğin FOPID yapısında Oustaloup özyineleme filtre yapısına N=5 verildiğinde ise elde edilen sıfır kutup yapısı denklem (14)'te verilmiştir.

$$\frac{8.767(s+549.6)(s+549.7)(s+434.8)(s+156.5)(s+156.5)}{s(s+654.9)(s+549.7)(s+518.1)(s+186.5)(s+156.5)} \times \frac{(s+123.8)(s+44.58)(s+44.57)(s+35.16)(s+12.7)}{(s+53.12)(s+44.58)(s+42.03)(s+15.13)(s+12.7)} \times \frac{(s+12.67)(s+9.881)(s+3.616)(s+3.582)(s+2.581)}{(s+11.97)(s+147.6)(s+4.309)(s+3.616)(s+3.409)} \times \frac{(s+1.03)(s+0.9913)(s+0.4528)(s+0.2933)(s+0.09849)}{(s+1.227)(s+1.03)(s+0.9709)(s+0.3495)(s+0.2933)} \times \frac{(s+0.08591)(s+0.08354)(s+0.02834)(s+0.02392)(s+0.02379)}{(s+0.2765)(s+0.09954)(s+0.08354)(s+0.07875)(s+0.02835)} \times \frac{(s+0.008074)(s+0.006785)(s+0.006776)(s+0.001931)}{(s+0.02379)(s+0.02243)(s+0.008074)(s+0.006776)} \times \frac{(s+0.00193)(s^2+0.5452s+0.07677)(s^2+1.283s+0.961)}{(s+0.006388)(s+0.0023)(s+0.00193)} \times (s+0.0023) / (s+0.001819) \quad (14)$$

Beşinci örneğin FOPID yapısında Oustaloup özyineleme filtre yapısına N=2 verildiğinde ise elde edilen sıfır kutup yapısı denklem (15)'de verilmiştir.

$$\frac{3.6451(s+256.1)(s+256.1)(s+194.1)(s+16.16)}{s(s+324.8)(s+256.1)(s+246.4)(s+20.49)} \times \frac{(s+16.14)(s+11.93)(s+1.02)(s+0.9943)(s+0.3799)}{(s+16.16)(s+15.55)(s+1.293)(s+1.02)(s+0.9808)} \times \frac{(s+0.08088)(s+0.06503)(s+0.06433)(s+0.005147)}{(s+0.08158)(s+0.06433)(s+0.06189)} \times \frac{(s+0.004061)(s+0.004059)(s^2+1.283s+0.9132)}{(s+0.005148)(s+0.004059)(s+0.003905)} \quad (15)$$

Beşinci örneğin FOPID yapısında Oustaloup özyineleme filtre yapısına N=0 verildiğinde ise elde edilen sıfır kutup yapısı denklem (16)'da verilmiştir.

$$\frac{5.4987(s + 2.009)(s^2 + 0.7049s + 0.1842)(s^2 + 1.802s + 1.732)}{s(s + 7.464)(s + 2.009)(s + 0.4977)}$$

(16)

Kesir dereceli PID kontrolcüsü için $N=0$ seçildiğinde kontrolcünün derecesi 4, $N=2$ seçildiğinde FOPID için kontrolcünün derecesi 16 ve $N=5$ seçildiğinde kontrolcünün derecesi 34 olmaktadır. (FOPID kontrolcüsündeki parametre değerleri hepsi sıfırdan farklı ve $\lambda > 1$ olması durumunda) N değerini büyütmek kontrolcünün derecesinin ve karmaşıklığının artması anlamına gelir. Yapılan bütün çalışmalarda N değeri ne olursa olsun, FOPID kontrolcünün PID kontrolcüden daha düşük yerleşme süresine sahip olduğu sonuçlar elde edilmiştir. Yalnızca performans açısından bakılırsa N değerini artırmak yani kontrolcünün kompleksliğini artırmak sistemin yerleşme süresinin azalttığı veya aşımı azalttığı söylenemez. Örnek 5 hariç en iyi yerleşme süreleri $N=2$ olduğu durumda bulunmuştur. Gelecekteki çalışmalarda, sistemdeki belirsizliğin veya gürültünün sistemi nasıl etkilediği N değerine bağlı olarak nasıl değiştiği incelenebilir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada Outstaloup metodu ile kesir dereceli PID kontrolcüsü, tam sayılı transfer fonksiyonuna çevrilmiştir. Outstaloup üzerindeki N derecesinin sistemin performansını nasıl etkilediği, yüksek dereceli kararlı, zaman gecikmeli kararlı ve minimum faz olmayan kararlı sistemler üzerinde incelenmiştir. Yapılan çalışmalara göre N değerini artırmanın FOPID kontrolcüye sahip sistemlerde geçici durum performansını iyileştirmesi arasında net bir ilişki bulunamamıştır. Seçilen sistemlerde FOPID kontrolcüsünün, kontrol parametreleri uygun bir şekilde seçildiğinde N değeri ne olursa olsun PID kontrolcüden daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir. Son olarak N değerini düşük tutmak sistemin karmaşıklığını ve uygulama için gerekli hesaplama maliyetinin azaltılmasını sağlayabilir.

Kaynakça

- [1] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar, and S. N. Pawar, "A review of PID control, tuning methods and applications," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 9, no. 5, pp. 818–827, 2021. doi: 10.1007/s40435-020-00665-4.
- [2] K. J. Åström and T. Hägglund, "The future of PID control," *Control Eng Pract*, vol. 9, no. 11, pp. 1163–1175, 2001.
- [3] J. Sabatier, "Fractional order models are doubly infinite dimensional models and thus of infinite memory: Consequences on initialization and some solutions," *Symmetry*, vol. 13, no. 6, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/sym13061099.
- [4] A. Charef, H. H. Sun, Y. Y. Tsao, and Onaral B., "Fractal system as represented by singularity function," *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 37, no. 9, pp. 1465–1470, 1992.
- [5] B. M. Vinagre, V. Feliu, B. M. Vinagre, I. Podlubny, A. Hernández, and V. Feliu, "Some approximations of fractional order operators used in control theory and applications," *Fract Calc Appl Anal*, vol. 3, no. 3, pp. 231–248, 2000,

- [6] A. Oustaloup, F. Levron, B. Mathieu, and F. M. Nanot, "Frequency-Band Complex Noninteger Differentiator: Characterization and Synthesis," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 47, no. 1, pp. 25–39, 2000.
- [7] S. Das, S. Saha, S. Das, and A. Gupta, "On the selection of tuning methodology of FOPID controllers for the control of higher order processes," *ISA Trans.*, vol. 50, no. 3, pp. 376–388, 2011.
- [8] Antonio. Visioli, *Practical PID control*. Springer, 2006.
- [9] R. W. Jones and M. T. Tham, "PID design approaches for higher-order plants," in *2007 European Control Conference (ECC)*, 2007, pp. 5858–5865.
- [10] A. Bagis and H. Senberber, "ABC algorithm based PID controller design for higher order oscillatory systems," *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 23, no. 6, pp. 3–9, 2017, doi: 10.5755/j01.eie.23.6.19688.
- [11] D. K. Sambariya, R. Prasad, and D. Birla, "Design and performance analysis of PID based controller for SMIB power system using Firefly algorithm," in *2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*, 2015, pp. 1–8.
- [12] B. Nagaraj and N. Muruganath, "A comparative study of PID controller tuning using GA, EP, PSO and ACO," in *2010 International Conference On Communication Control And Computing Technologies*, IEEE, 2010, pp. 305–313.
- [13] Z. Bingul and O. Karahan, "Comparison of PID and FOPID controllers tuned by PSO and ABC algorithms for unstable and integrating systems with time delay," *Optim Control Appl Methods*, vol. 39, no. 4, pp. 1431–1450, Jul. 2018,
- [14] A. G. S. Babu and B. T. Chiranjeevi, "Implementation of fractional order PID controller for an AVR system using GA and ACO optimization techniques," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 1, pp. 456–461, 2016.
- [15] J. Li, Y. Liu, C. Shan, and C. Dai, "Implementation of Simplified Fractional-Order PID Controller Based on Modified Oustaloup's Recursive Filter," *J Shanghai Jiaotong Univ Sci*, vol. 25, no. 1, pp. 44–50, Feb. 2020.
- [16] D. Xue, C. Zhao, and Y. Chen, "A Modified Approximation Method of Fractional Order System," in *2006 International Conference on Mechatronics and Automation*, 2006, pp. 1043–1048.
- [17] A. Tepljakov, "FOMCON Toolbox for MATLAB (<https://github.com/extall/fomcon-matlab/releases/tag/v1.50.4>)," *GitHub*, erişim: 13-07-2023, 2023.
- [18] D. Valério, "ninteger (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8312-ninteger>)," *MATLAB Central File Exchange.*, erişim:13-07-2023, 2023.
- [19] X.-S. Yang, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, 2nd Edition. Luniver Press, 2010.