



SMDO algoritması ile iki serbestlik dereceli FOPID kontrol çevrimi tasarımı Two degrees of freedom FOPID control loop design via SMDO algorithm

Abdullah ATEŞ^{1*}, Celaledin YEROĞLU¹

¹İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye
abdullah.ates@inonu.edu.tr, celaledin.yeroglu@inonu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 26.02.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 27.05.2016

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.89090

Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Bu yayın, kesir dereceli PID kontrolörlü iki serbestlik dereceli kontrol yapısında, olasılıksal çok parametrelili sapma optimizasyon algoritmasını kullanan bir tasarım yöntemi sunmaktadır. Bu kontrol yapısı, feedback (geribesleme), feed-forward (ileri besleme) ve component separated (bileşenlerine ayrılmış) tipi iki serbestlik dereceli kontrol çevrimleri için uygulanmış ve kontrolör parametreleri optimizasyon algoritması ile elde edilmiştir. Daha sonra bu üç kontrol çevriminin performansları karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kesir dereceli PID, İki serbestlik dereceli kontrol, Optimizasyon

Abstract

This paper presents a design method for Two Degrees of Freedom control structure with Fractional Order PID controller using stochastic multi parameter divergence optimization algorithm. This control structure is applied to feedback, feed-forward and component separated type control loops and controller parameters are obtained with the optimization algorithm. Then, the performance of the three various control loops are compared.

Keywords: Fractional order PID, Two degrees of freedom control, Optimization

1 Giriş

Horowitz 1948'de iki serbestlik dereceli (2DOF) kontrol yapısının tek serbestlik dereceli (1DOF) kontrol yapısına göre avantajlarını göstermiştir [1]. Klasik PID kontrolör ile 2DOF kontrol yapısının üstünlüğü [2] ve [3]'te rapor edilmiştir. Araki ve Taguchi 2DOF PID kontrol yapısının önemli sonuçlarını çeşitli açıklamaları ile birlikte öğretimi amaçlı sunmuşlardır [3]. Daha sonra 2DOF PID kontrol yapısının tasarımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, Nagashio ve diğ., "satellite-VIII spacecraft" test aracı için dayanıklı 2DOF pozisyon kontrolör tasarımı önermişlerdir [4]. Yeşil ve diğ., 1DOF ve 2DOF kontrol yapısında gerçek zamanlı ayarlanmış ayar-noktası düzenleyici sisteminin avantajlarını tartışmışlardır [5]. 2DOF kontrol döngüsü çift kademeli sabit disk yapısı için [6]'da tasarlanmıştır. Rout ve Mittal, 2DOF R-R düzlemsel manipulatörün optimize edilmiş parametrik tasarımını ve performans ölçümünü sunmuşlardır [7]. 2DOF yapısının servo-kontrol performansı üzerine etkisi [8]'de tartışılmıştır. Feng ve diğ., 2DOF PID yapısına göre, kesir dereceli PID "Fractional Order PID (FOPID)" kontrolörlü 2DOF yapısının avantajlı yönlerini tartışmışlardır [9]. Literatürde bulunan tam sayı dereceli 2DOF PID yapılarının kesir dereceli olarak yorumlanmış versiyonları ve gerçek zamanlı sistem üzerinde uygulanmaları [10]'da sunulmuştur. Kesir dereceli PID kontrolörlü 2DOF yapısının kesir dereceli integral ve türev operatörlerinin kontrolör parametrelerinde daha hassas ayar yapma olasılığını artırdığı birçok çalışmada rapor edilmiştir [11]-[14].

Bu çalışmalardan yola çıkılarak FOPID kullanımı 2DOF kontrol yapısının performansını artıracığı öngörülebilir. Podlubny'nin önerdiği Denklem 1'deki FOPID, kesir dereceli kontrolör araştırmalarında bir dönüm noktası olmuştur [15],

$$C(s) = PI^\lambda D^\mu = k_p + \frac{k_i}{s^\lambda} + k_d s^\mu \quad (1)$$

burada, k_p oransal terimin katsayısı, k_i integral teriminin katsayısı, k_d türev teriminin katsayısı, λ kesir dereceli integral terimi, μ ise kesir dereceli türev terimidir. Daha sonraki çalışmalarda, $PI^\lambda D^\mu$ parametrelerinin elde edilmesi için birçok tasarım yöntemi önerilmiştir [16]-[18]. Ayrıca, literatürde FOPID kontrolör parametrelerini ayarlayan birçok nümerik yöntem bulunmaktadır. Örneğin, genetik algoritma [19], istenen faz ve kazanç payını sağlayan tasarım yöntemi [20], tipik bir ikinci derece sistem için kesir dereceli PD kontrolör parametrelerinin ayarlanması [21] ve FOPID tasarımı için tabu search algoritmasının kullanılması [22], bu yöntemler arasında sayılabilir. Literatürdeki yeni çalışmalar arasında önerdiğimiz olasılıksal çok parametrelili sapma optimizasyonu "stochastic multi-parameter divergence optimization (SMDO)" algoritması [23] FOPID kontrolör parametrelerinin ayarlanması için de etkin bir çözüm sunmaktadır [24],[25]. Dolayısı ile SMDO algoritması FOPID kontrolörlü 2DOF kontrol çevriminin performansını artırabilir.

Bu yayında, 2DOF PID yapısının yerine 2DOF FOPID kontrol yapısının kullanılmasının ve SMDO algoritması ile kontrol çevriminin parametrelerinin optimize edilmesinin kontrol çevriminin performansını artıracığı öngörüsü çalışmanın motivasyon unsuru olmuştur. Önerilen çalışmada, Feed-Back (FB) tipi, Feed-Forward (FF) tipi ve Component Separated (CS) tipi [3] kontrol çevrimindeki 2DOF kontrol yapısında klasik PID yerine FOPID kontrolör kullanılmış ve FOPID kontrolörün beş parametresi ile 2DOF kontrol yapısının iki parametresi SMDO algoritması ile optimize edilmiştir.

Yayının devamı şöyle düzenlenmiştir; Bölüm 2, 2DOF FOPID kontrol yapısını vermektedir. Bölüm 3, SMDO algoritmasını kısaca açıklamaktadır. Bölüm 4'te optimizasyon ve simülasyon

sonuçları yer almaktadır. Bölüm 5 ise sonuçlar ve önerileri sunmaktadır.

2 İki serbestlik dereceli FOPID kontrol yapısı

Literatürde, "feedforward (ileri besleme)", "feedback (geri besleme)", "set-point filter (ayar noktalı filtre)", "filter preceded-derivative (filtreleme öncesinden türevleme)" ve "component separated (bileşenlerine ayrılmış)" gibi farklı tiplerde 2DOF kontrol yapıları yer almaktadır [1],[3],[9]. Bu yayında, FF, FB ve CS tipi 2DOF kontrol yapıları kullanılmıştır. Şekil 1, FOPID kontrolör ile elde edilen FF tipi 2DOF yapısını göstermektedir. Bu yapı kullanılarak ileri yönlü yol için aşağıdaki geçiş fonksiyonu elde edilebilir,

$$C_f(s) = -k_p\alpha - \beta k_d s^\mu \quad (2)$$

burada, α oransal kazanç k_p 'nin katsayısı ($0 < \alpha < 1$), β ise türevsel kazanç k_d 'nin katsayısıdır ($0 < \beta < 1$). Şekil 1'deki $C(s)$ Denklem 1'de verilen FOPID kontrolörü, $G(s)$ ise kontrol edilen sistemi göstermektedir.

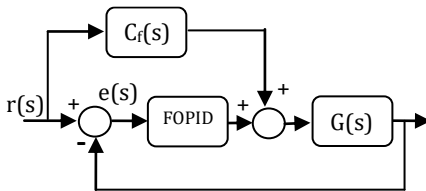
FB tipi 2DOF FOPID kontrol yapısı Şekil 2'de verilmektedir. Burada C_b geri besleme kompanzatorü olarak adlandırılır. Parametreleri FB tipi 2DOF yapısına göre düzenlenmiş FOPID kontrolör aşağıda verilmektedir.

$$\hat{C}(s) = (1 - \alpha)k_p + \frac{k_i}{s^\lambda} + (1 - \beta)k_d s^\mu \quad (3)$$

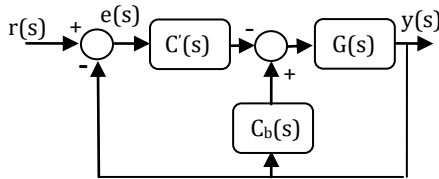
Geri besleme kompanzatorü C_b ise şöyle elde edilir.

$$C_b(s) = \alpha k_p + \beta k_d s^\mu \quad (4)$$

Araki ve Taguchi'nin önerdiği [3]'deki CS tipi 2DOF PID kontrol yapısı FOPID kontrolör için yeniden düzenlenerek Şekil 3'te verilen kontrol çevrimi elde edilmiştir.



Şekil 1. FF tipi 2DOF FOPID kontrol yapısı.



Şekil 2. FB tipi 2DOF FOPID kontrol yapısı.

Sırasıyla Şekil 1-3'te verilen FF, FB ve CS tipi 2DOF FOPID kontrol yapılarında en iyi performansın elde edilebilmesi için gerekli olan toplamda yedi parametrenin optimum değerlerinin hesaplanmasında SMDO algoritması etkin bir çözüm sunmaktadır.

3 SMDO algoritması ile 2DOF FOPID parametrelerinin elde edilmesi

SMDO algoritması [23]'de detaylı olarak açıklanmıştır. [24] ve [25]'te ise bu algoritma ile yapılan uygulamalar yer almaktadır. Bu bölümde SMDO algoritması, 2DOF FOPID kontrol yapısının

yedi parametresinin optimum değerlerinin hesaplanması için yeniden düzenlenmiştir.

2DOF FOPID kontrol yapısının parametreleri $t = nh$ anında X düzleminde $X^n = [k_p^n k_i^n k_d^n \lambda^n \mu^n \alpha^n \beta^n]$ ile verilmiş olsun. Burada h ayrık zaman örnekleme periyodunu, $n = 1, 2, 3, \dots$ ise ayrık zaman artışlarını göstermektedir. 2DOF FOPID kontrol yapısının tepkisinin iyileştirilmesi için X^n parametre vektörünün sürekli X^m vektörüne dönüşmesi ve aşağıdaki adaptasyon koşulunu sağlaması gerekir,

$$E(X^m) - E(X^n) < 0 \quad (5)$$

burada, E pozitif reel-değerli hata fonksiyonudur ve parametre optimizasyon sürecinin performansını değerlendirmek için kullanılır. SMDO algoritması, optimal parametre vektörüne ulaşmak için $t = nh$ anındaki $X^n \in S$ vektörünü Denklem (5)'teki koşula uyarak, $m - n > 0$, olması şartıyla $X^m \in S$ vektörüne dönüştürür. SMDO algoritmasının amacı, başlangıç X^0 parametre vektörünü sürekli dönüşümlerle X_{opt} optimal parametre vektörüne ulaştırmaktır. Parametre düzleminin tarama bölgesinde hata fonksiyonu aşağıdaki denklemle verilen minimuma ulaştığında optimizasyon sonlandırılır.

$$E(X_{opt}) = \min_{X^n \in X_s} \{E(X^n)\} \quad (6)$$

SMDO algoritması peş peşe çift yönlü olasılıksal uyarılama ve uygulama "Set and Trial (ST)" işlemi yapar. Bu amaçla parametre vektörü başlangıçta ileri yönlü rassal test edilir. Eğer Denklem (5)'teki koşula göre uygun bir sapma elde edilemezse bu durumda geri yönlü rassal test edilir. Eğer yine uygun bir sapma elde edilemezse bu ST işlemi için başlangıçtaki değerleri tutar. SMDO algoritması k-parametrelili bir sistemde test edilen sapma vektörü sayısı $2k$ olarak belirlenmiştir. Adaptasyon süreci boyunca 2DOF FOPID kontrol yapısının yedi parametresi sırasıyla test edilir ve sadece Denklem (5)'i sağlayan uygun sapmaların X^n vektörünü düzenlemesine izin verilir. 2DOF FOPID kontrol yapısı için SMDO sapma vektörü şöyle verilsin,

$$\Delta X^n = \phi_v^n [\Delta k_p^n \Delta k_i^n \Delta k_d^n \Delta \lambda^n \Delta \mu^n \Delta \alpha^n \Delta \beta^n] \quad (7)$$

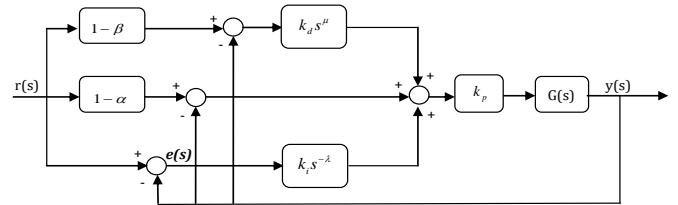
İleri yönlü sapma şöyle yazılır,

$$X^{n+1} = X^n + \phi_v^n [\Delta k_p^n \Delta k_i^n \Delta k_d^n \Delta \lambda^n \Delta \mu^n \Delta \alpha^n \Delta \beta^n] \quad (8)$$

Parametre düzleminde ileri yönlü uygun sapma testi şöyle yazılır,

$$E(X^n + \Delta X^n) - E(X^n) < 0 \quad (9)$$

burada, ϕ_v sapma oran vektörüdür.



Şekil 3. CS tipi 2DOF FOPID kontrol yapısı.

Benzer şekilde, geri yönlü sapma ve geri yönlü sapma testi sırasıyla şöyle ifade edilir,

$$X^{n+1} = X^n - \phi_v^n [\Delta k_p^n \Delta k_i^n \Delta k_d^n \Delta \lambda^n \Delta \mu^n \Delta \alpha^n \Delta \beta^n] \quad (10)$$

$$E(X^n - \Delta X^n) - E(X^n) < 0 \quad (11)$$

2DOF FOPID kontrol yapısına uygulanan SMDO yönteminde ϕ_p vektörü $v = \{1,2,3,4,5,6,7\}$ için sırasıyla $\{\eta 000000\}^T$, $\{0\eta 00000\}^T, \dots, \{000000\eta\}^T$ değerlerini alır. Buradaki η parametresinin değeri her adımda normal dağılım eğrisine göre $[0,1]$ aralığında rastgele sayı üreticiden alınır. Alt-indis v çift yönlü ST işleminde test edilen X vektörünün parametre bileşenini gösterir. Örneğin, ϕ_1 ifadesi $\{\eta 000000\}^T$ vektörünü gösterir ve 2DOF FOPID optimizasyonunda k_p^n bileşenidir. 2DOF FOPID kontrol yapısı için önerilen SMDO algoritmasının akış kodu (Draft Code) Şekil 4'te verilmiştir.

4 Simülasyon sonuçları

Bu bölümdeki simülasyon çalışmasında FF, FB ve CS tipi 2DOF FOPID kontrol yapıları, tipik bir servo kontrol sistemine uygulanmıştır. Bu üç kontrol yapısının performansları karşılaştırılmış ve sistem için en uygun 2DOF FOPID yapısı belirlenmiştir.

Aşağıdaki tipik birinci derece servo sistemi [26] ele alalım,

$$G_e(s) = \frac{k}{\tau s + 1} = \frac{0.55}{62s + 1} \quad (12)$$

Denklem (12)'deki sistem, Şekil 1'deki FF tipi 2DOF FOPID kontrol yapısında kullanılmıştır. Kesir dereceli integral ve türevi gerçeklemek için [27]'te önerilen "ninteger" blok tercih edilmiştir. FF tipi 2DOF FOPID kontrol yapısının yedi parametresi Şekil 4'te verilen SMDO algoritması ile optimize edilmiştir. Matlab Simulink'te oluşturulan optimizasyon modeli bütün iterasyonlarda "ode45 Solver with variable-steps [28] kullanılarak 15 saniye çalıştırılmıştır. SMDO algoritmasında Şekil 1-3'teki reel değerli hata fonksiyonu (E) için aşağıdaki maliyet fonksiyonu (cost function) kullanılmıştır,

$$J(\theta) = \min \frac{1}{N} \sum E^2 \quad (13)$$

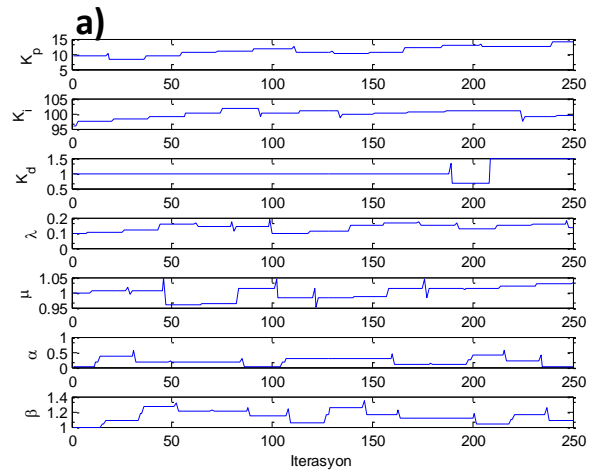
Bu optimizasyon algoritması ile elde edilen parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 5(a) ve 5(b) sırasıyla SMDO algoritmasının çalışması sürecinde parametre değişimini ve maliyet fonksiyonunu vermektedir. Şekil 5(c) de ise elde edilen kontrolörün kontrol sinyali verilmektedir.

İkinci olarak Şekil 2'deki FB tipi 2DOF FOPID kontrol yapısında Denklem (12)'de verilen aynı sistem kullanılarak önceki örneğe benzer şekilde simülasyon işlemi uygulanmıştır. SMDO ile elde edilen parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 6(a) ve 6(b) sırasıyla parametre değişimlerini ve maliyet fonksiyonunun değişimini vermektedir. Şekil 6(c) de ise elde edilen kontrolörün kontrol sinyali verilmektedir. Daha sonra, önceki iki örneğe benzer şekilde Şekil 3'te verilen CS tipi 2DOF FOPID kontrol yapısında Denklem (12)'deki sistem kullanılmış, SMDO algoritmasının ürettiği sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 7(a) ve 7(b)'de parametre değişimleri ve maliyet fonksiyonu verilmektedir. Şekil 7(c) de ise elde edilen kontrolörün kontrol sinyali verilmektedir.

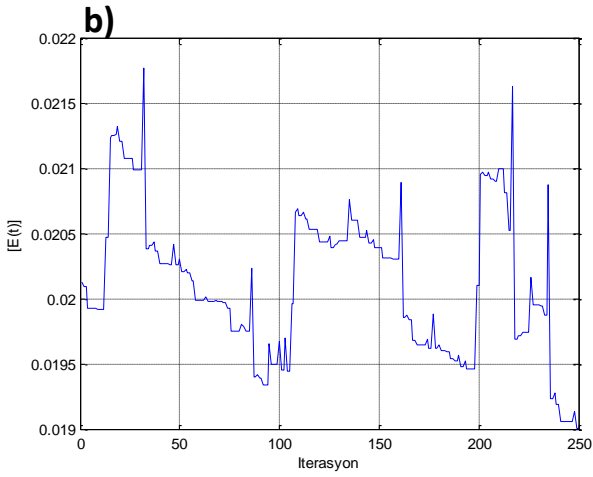
```

Başla
Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi
Başlangıç noktası:
If
     $E(X^n) > E_{min}$ 
Adaptasyon; Adapte olmuş duruma git
     $v = v + 1$ 
    if  $v > 7$ 
     $v = 0$ 
    end
     $\Delta X^n$  Oluştur
    İleri yönlü test:
    if
     $E(X^n + \Delta X^n) - E(X^n) < 0$ 
     $X^{n+1} = X^n + \Delta X^n$ 
    Başlangıç noktasına git
    end
    Geri yönlü test:
    if
     $E(X^n - \Delta X^n) - E(X^n) < 0$ 
     $X^{n+1} = X^n - \Delta X^n$ 
    Başlangıç noktasına git
    end
    Başlangıç noktasına git
Adapte olmuş durum
End
Son
    
```

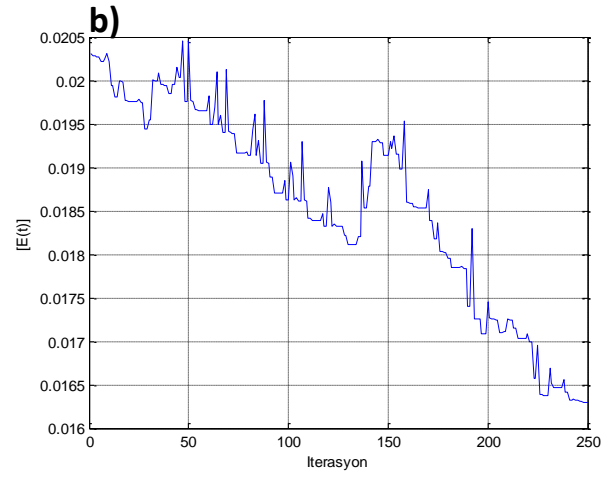
Şekil 4. 2DOF FOPID kontrol yapısı için SMDO algoritmasının akış kodu.



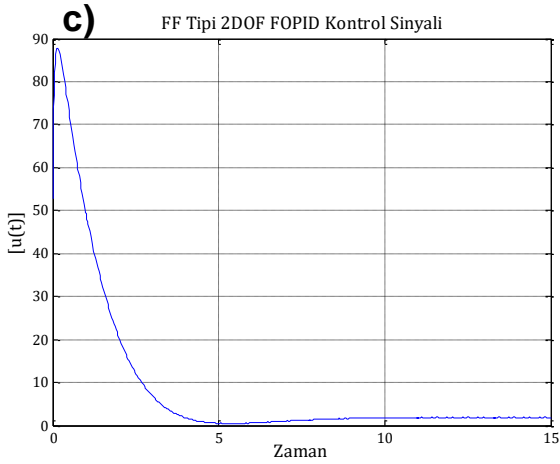
Şekil 5.a FF tipi 2DOF FOPID parametrelerinin değişimi.



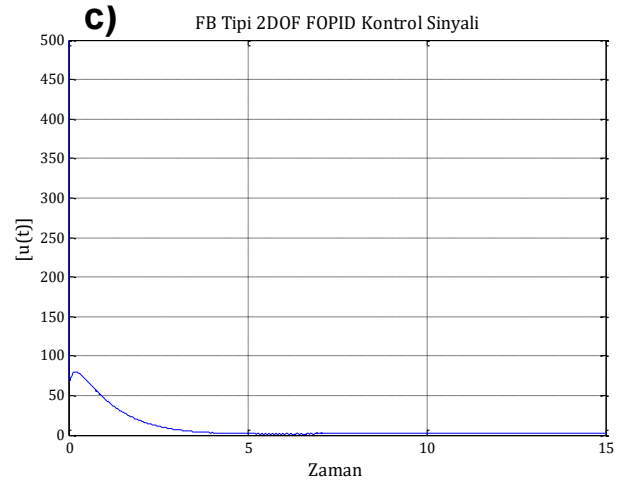
Şekil 5.b FF tipi 2DOF FOPID kontrol yapısında optimizasyon süresince hata fonksiyonunun değişimi.



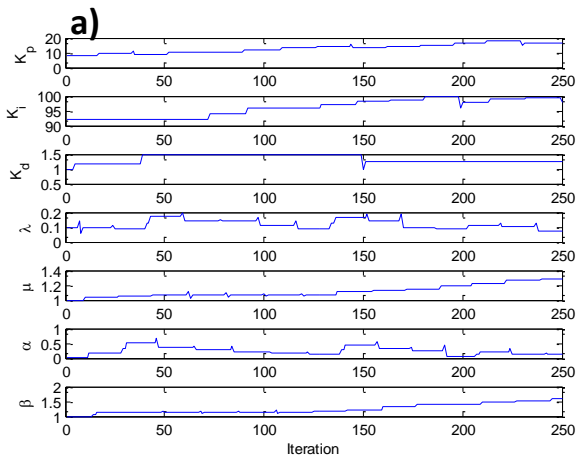
Şekil 6.b FB tipi 2DOF FOPID kontrol yapısında optimizasyon süresince hata fonksiyonunun değişimi.



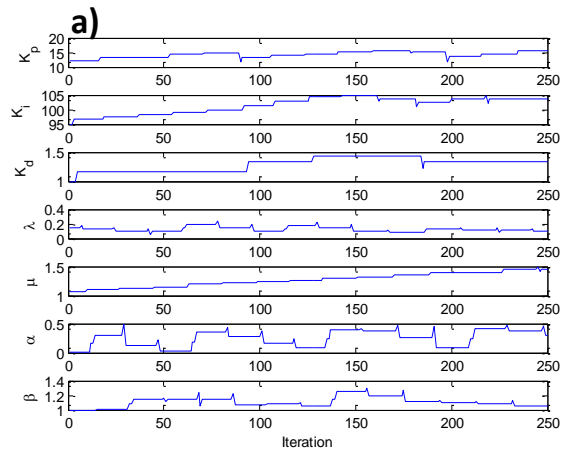
Şekil 5.c FF tipi 2DOF FOPID kontrol yapısında optimal parametrelerin türettiği kontrol sinyali.



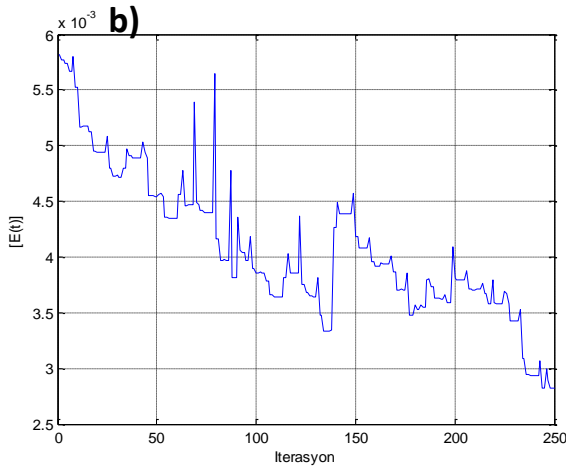
Şekil 6.c FB tipi 2DOF FOPID kontrol yapısında optimal parametrelerin türettiği kontrol sinyali.



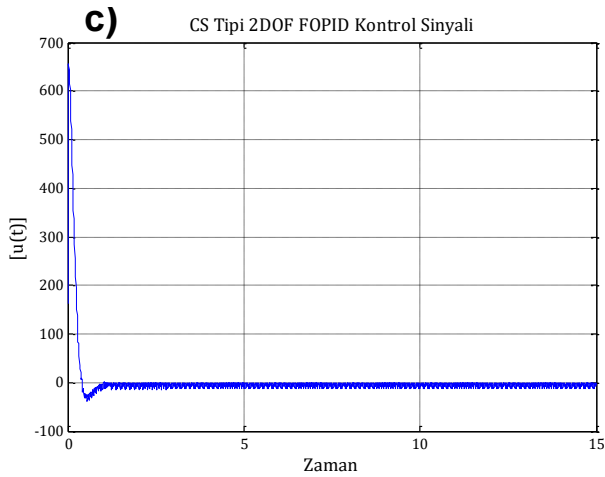
Şekil 6.a FB tipi 2DOF FOPID parametrelerinin değişimi.



Şekil 7.a CS tipi 2DOF FOPID parametrelerinin değişimi.



Şekil 7.b CS tipi 2DOF FOPID kontrol yapısında optimizasyon süresince hata fonksiyonunun değişimi.



Şekil 7.c CS tipi 2DOF FOPID kontrol yapısında optimal parametrelerin türettiği kontrol sinyali.

Şekil 5(b), 6(b) ve 7(b) deki maliyet fonksiyonu değişimlerinin optimizasyon sürecinde sürekli azalma eğiliminde olması kullanılan algoritmanın etkinliğini göstermektedir. Şekil 5(c), 6(c) ve 7(c) de verilen kontrol sinyallerinin uygun olduğu görülmektedir.

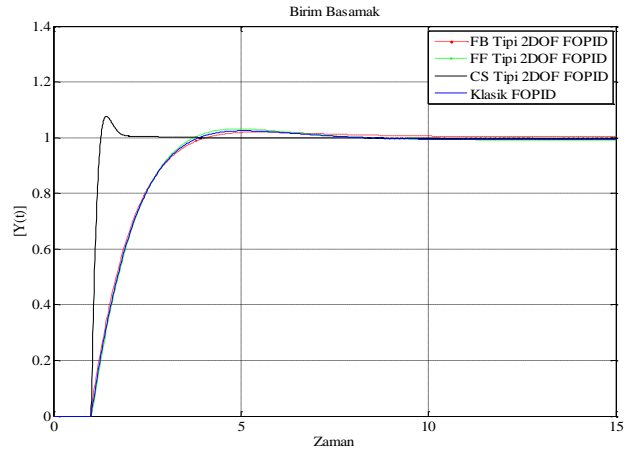
Denklem (12)'deki aynı sistem için [26]'da önerilen FOPID kontrolör aşağıda verilmektedir.

$$C_{FOPID}(s) = 15.2864 + \frac{98.1268}{s^{0.1178}} + 1.1625s^{1.0148} \quad (14)$$

Parametreleri önerilen SMDO yöntemi ile elde edilen FF, FB ve CS tipi 2DOF FOPID kontrol yapıları ile $C_{FOPID}(s)$ 'in birim basamak tepkileri Şekil 8'de veriliyor. Bu şekilden, SMDO algoritmasının 2DOF FOPID yapılarında etkili olduğu görülmektedir. Denklem (12)'deki sistem için en iyi tepki CS tipi 2DOF FOPID kontrol yapısından elde edildiği görülmüştür.

Tablo 1: Farklı 2DOF FOPID kontrol yapılarının SMDO ile elde edilen parametreleri

	FF tipi 2DOF FOPID	FB tipi 2DOF FOPID	CS tipi 2DOF FOPID
k_p	13.8772	16.7892	15.6297
k_i	99.2341	97.7912	103.5987
k_d	1.4732	1.2647	1.3335
λ	0.139	0.0736	0.0947
μ	1.0331	1.2872	1.4467
α	0.1814	0.1206	0.2983
β	1.077	1.6034	1.0517



Şekil 8. FF, FB ve CS tipi 2DOF FOPID kontrol yapılarının karşılaştırılması.

Tablo 2: Farklı 2DOF FOPID kontrol yapılarının performans parametreleri

	FF tipi 2DOF FOPID	FB tipi 2DOF FOPID	CS tipi 2DOF FOPID	Klasik FOPID
Yükselme zamanı	2,9 sn	2,93 sn	1,2 sn	2,92 sn
Yüzde Aşım	1.03	1.02	1.08	1.025
Oturma Zamanı %2	6,26 sn	5,6 sn	1,75	6 sn

Tablo 2'de, CS tipi kontrol yapısında % aşma biraz fazla olmakla birlikte, yükselme zamanı ve oturma zamanı parametreleri diğer kontrol tiplerine göre çok daha iyi olduğu görülmektedir.

5 Sonuçlar

Bu yayında FF, FB ve CS tipi 2DOF FOPID kontrol yapılarında SMDO algoritması ile uygun parametreler elde edilmiştir. 2DOF kontrol yapısı için optimizasyon yöntemleri genellikle iki adımda yapılır; Birinci adım, kontrolörün optimize edilmesi, ikinci adım ise elde edilen sabit kontrolör değerlerine göre 2DOF yapısının optimize edilmesi. Bu yayında kullanılan SMDO algoritmasında FOPID kontrolör parametreleri ve 2DOF yapısından gelen parametreler eşzamanlı optimize edilerek daha iyi kontrol performansına ulaşılması sağlanmıştır.

6 Kaynaklar

- [1] Horowitz IM. Synthesis of Feedback Systems, The University of Michigan Academic Press, New York, 1963.
- [2] Araki M. "PID control system with reference feed forward (PID-FF control systems)." *23rd Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference*, Tokyo; Japan, July 1984.

- [3] Araki M, Taguchi H. "Two-degree-of-freedom PID controllers". *International Journal of Control Automation and Systems*, 1, 401-411, 2003.
- [4] Nagashio T, Kida T, Hamada Y, Ohtani T. "Robust Two-Degrees-of-Freedom Attitude Controller Design and Flight Test Result for Engineering Test Satellite-VIII Spacecraft". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(1), 157-168, 2014.
- [5] Yesil E, Guzelkaya M, Eksin I, Tekin OA. "Online Tuning of Set-point Regulator with a Blending Mechanism Using PI Controller". *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 16(2), 143-157, 2008.
- [6] Sasaki M, Fujihara K, Yamada H, Nam Y, Ito S. "Two-degree-of-freedom control of a self-sensing micro-actuator for HDD". 22nd International Symposium on Intelligent Control, Singapore, 1-3 October 2007.
- [7] Rout BK, Mittal RK, "Parametric design optimization of 2-DOF R-R planar manipulator a design of experiment approach". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(2), 239-248, 2008.
- [8] Alfaro VM, Vilanova R, Arrieta O. "Considerations on set-point weight choice for 2-DoF PID controllers". *Advanced Control of Chemical Processes IFAC*, 7, 721-726, 2009.
- [9] Feng G, Xiao-ping Z. "Research on fractional order two-degrees-of-freedom flight control technology of unmanned air vehicle". *International Conference on Computer Science and Information Processing (CSIP)*, Xian, China, 24-26 August 2012.
- [10] Ates A, Yeroğlu C. "Online Tuning of Two Degrees of Freedom Fractional Order Control Loops", *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, 1(4), 5-11, 2016.
- [11] Gutierrez RE, Rosario JM, Machado JAT. "Fractional Order Calculus: Basic Concepts and Engineering Applications, Mathematical Problems in engineering," *Hindawi Publishing Corporation*, 2010, 1-9, 2010.
- [12] Podlubny I. *Fractional Differential Equations, Mathematics in Science and Engineering*. Academic Press, USA, 1999.
- [13] Ross B. *Fractional Calculus and its Applications*. Springer, Verlag-Berlin, New York, 1975.
- [14] Hamamci SE. "An algorithm for stabilization of fractional-order time delay systems using fractional-order PID controllers," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52, 10, 1964-1969, 2007.
- [15] Podlubny I. "Fractional order systems and $PI\lambda D\mu$ controller". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44, 208-214, 1999.
- [16] Yeroğlu C, Tan N. "Note on fractional-order proportional-integral-differential controller design". *IET Control Theory and Applications*, 5(17), 1978-1989, 2011.
- [17] Yeroğlu C, Tan N. "Classical controller design techniques for fractional order case". *ISA Transactions*, 50(3), 461-472, 2011.
- [18] Radek M, Prokop R, "Single-parameter tuning of PI controllers: theory and application". *Journal of The Franklin Institute*, 348, 2059-2071, 2011.
- [19] Aydoğdu Ö, Akkaya R, "An effective real coded GA based fuzzy controller for speed control of a BLDC motor without speed sensor". *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 19, 413-430, 2011.
- [20] El-Khazali R. "Fractional-order controller design". *Computers & Mathematics with Applications*, 66(5), 639-646, 2013.
- [21] HongSheng L, Luo Y, Chen YQ. "A fractional order proportional and derivative (FOPD) motion controller: tuning rule and experiments". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(2), 516-520, 2010.
- [22] Ates A, Yeroğlu C. "Tabu Search Algorithm for Fractional Order PID via Non-linear Multi Objective Function". *International Conference on Fractional Differentiation and Its Applications*, Catania, Italy 23-25 June 2014.
- [23] Yeroğlu C, Ates A. "A stochastic multi-parameters divergence method for online auto-tuning of fractional order PID controllers". *Journal of The Franklin Institute*, 351(5), 2411-2429, 2014.
- [24] Alagoz BB, Ates A, Yeroğlu C. "Auto-tuning of PID controller according to fractional order reference model approximation for DC rotor control". *Journal of the Mechatronics*, 23(7), 789-797, 2013.
- [25] Ates A, Yeroğlu C, Alagoz BB, Senol B. "Tuning of Fractional Order PID with Master Slave Stochastic Multi-Parameter Divergence Optimization Method". *International Conference on Fractional Differentiation and Its Applications*, Catania, Italy, 23-25 June 2014.
- [26] Monje CA, Vinagre BM, Chen YQ, Feliu V, Lanusse P, Sabatier J. "Proposals for fractional $PI\lambda D\mu$ tuning" *1st IFAC Symposium on Fractional Differentiation and its Applications*, Bordeaux, France, 19-21 July 2004.
- [27] Valerio D. "Ninteger v. 2.3 Fractional Control Toolbox for MATLAB," <http://web.ist.utl.pt/~duarte.valerio>, (10.10.2015).
- [28] Xie C, Mark AT, "Lane-based evacuation network optimization: An integrated Lagrangian relaxation and tabu search approach". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(1), 40-63, 2011.