

DC MOTORUN HIZ KONTROLÜ İÇİN KESİR DERECELİ PID KONTROLÖR TASARIMI VE DAYANIKLILIK ANALİZİ

Tufan DOĞRUER*

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tokat, 60250, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 02.08.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 04.04.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1152949

ÖZET

Kesir dereceli PID kontrolör çoğu kontrol sisteminde geleneksel PID kontrolöre göre daha başarılı bir kontrol performansı sunar. Bu çalışmada, DC motorun hız kontrolü için kesir dereceli PID kontrolörün kullanıldığı optimizasyon-tabanlı bir metot önerilmiştir. Önerilen yöntem, optimal kesir dereceli PID kontrolör parametrelerini belirlemek amacıyla yusufluk algoritması ve çok-ölçütlü bir amaç fonksiyonu kullanır. Kontrol sistemlerinde amaç fonksiyonu oluşturulurken hatayı esas alan ölçütler ya da zaman cevabı özelliklerini esas alan ölçütler kullanılır. Bu çalışmada hatayı esas alan integral performans ölçütleri ve zaman cevabı özelliklerinden yüzde aşma değeri birleştirilerek bir çok-ölçütlü amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek amacıyla zaman cevabı analizi ve dayanıklılık analizi yapılmıştır. Her iki analizde de güncel literatürden çalışmalarla karşılaştırmalar yapılarak, yöntemin başarısı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekiller ve çizelgelerle sunulmuş, önerilen yöntemin DC motorun hız kontrolü için başarılı bir kontrol gerçekleştirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kesir dereceli PID kontrolör, Yusufluk algoritması, DC motor hız kontrolü, Dayanıklılık analizi, Optimal kontrol

FRACTIONAL ORDER PID CONTROLLER DESIGN AND ROBUSTNESS ANALYSIS FOR SPEED CONTROL OF DC MOTOR

ABSTRACT

A fractional-order PID controller offers better control performance than a traditional PID controller in most control systems. In this study, an optimization-based method using a fractional-order PID controller is proposed for speed control of DC motor. The proposed method uses the dragonfly algorithm and a multi-criteria objective function to determine the optimal fractional-order PID controller parameters. In control systems, criteria based on error or based on time response specifications are used while creating the objective function. The study, a multi-criteria objective function is defined by combining the error-based integral performance index and the percent overshoot from the time response properties. Time response analysis and robustness analysis are performed to evaluate the performance of the proposed method. In both analyzes, the success of the method is tested by making comparisons with studies from the current literature. The obtained results are presented with figures and tables, and it is seen that the proposed method performs a successful control for the speed control of the DC motor.

Keywords: Fractional order PID controller, Dragonfly algorithm, DC motor speed control, Robustness analysis, Optimal control

1. Giriş

DC motorlar, günümüz dünyasının vazgeçilmez elemanlarından bir tanesidir ve kullanılmadığı endüstriyel bir uygulama hemen hemen yoktur [1]. Tercih edilmesinin ana sebepleri arasında düşük

¹e-posta: tufan.dogruer@gop.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0415-3042> (Sorumlu Yazar)

maliyetli olmaları, dayanıklılıklarının yüksek olması ve kontrollerinin kolay olması sayılabilir. DC motorların hız kontrol uygulamalarında ya alan sargısındaki akım sabit tutulurken, armatür sargısındaki akım değiştirilir ya da bunun tam tersi yapılarak hız kontrolü sağlanır [1]. DC motorların hız kontrolü ile ilgili birçok bilimsel çalışma yapılmış ve literatürde yerini almıştır. Yapılan çalışmalarda çeşitli kontrolör yapılarının kullanıldığı birçok yeni yöntem önerilmiştir.

Kontrol uygulamalarında faz ilerlemeli ve faz gerilemeli kontrolör, fuzzy kontrolör, kayan kipli kontrolör, PID (oransal-integral-türev) kontrolör gibi kontrolör yapıları kullanılmaktadır. Bunların içerisinde PID kontrolörler, yapısının basit olması, verimliliği, uygulama kolaylığı ve anlaşılmasının kolay olması gibi sebeplerden dolayı klasik kontrolde sıklıkla tercih edilirler. Kesir dereceli matematik ile ilgili gelişmeler bu alana olan ilgiyi üzerinde toplamış ve son otuz yıldır kontrol alanında da uygulamaları hızla çoğalmıştır. Kesir dereceli PID kontrolör (FOPID) yapısı bu duruma verilebilecek en iyi örneklerden birisidir. Geleneksel PID kontrolör yapısındaki integral ve türev derecelerinin kesir dereceli olması sonucu ortaya çıkan kesir dereceli PID kontrolörler, DC motor hız kontrolünde bazı avantajlar sağlamaktadır. İkinci ve arkadaşları [2] yaptıkları çalışmada, DC motorun hız kontrolünü kesir dereceli PID kontrolörle gerçekleştirmiş ve elde ettikleri sonuçları literatürden farklı yöntemlerle tasarlanan PID kontrolör ile gerçekleştirilmiş çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Kesir dereceli PID kontrolör ile yapılan hız kontrolünün, geleneksel PID kontrolöre göre yapılan hız kontrolünden daha iyi bir performans sağladığını vurgulamışlardır. Kesir dereceli PID kontrolör ile yapılan hız kontrolünde özellikle yerleşme zamanının ciddi derecede azaldığı açıktır. Benzer bir çalışmayı Agarwal ve arkadaşları [3] sunmuşlardır. DC motor hız kontrolünü kesir dereceli PID kontrolör kullanarak gerçekleştirmiş ve kontrolör parametrelerini optimizasyon yöntemi ile ayarlamışlardır. Çalışmalarında geleneksel PID kontrolör ve kesir dereceli PID kontrolör performanslarını da karşılaştırmış ve elde ettikleri sonuçları çizelge ve şekiller ile sunmuşlardır. Kesir dereceli PID kontrolör ile daha iyi bir performans sağlandığını görebileceğimiz bir başka çalışma Hekimoğlu [4] tarafından yapılmıştır. DC motorun hız kontrolünün kesir dereceli PID kontrolör ile yapıldığı çalışmaları çoğaltmak mümkündür [5-8]. DC motorun hız kontrolünün kesir dereceli PID kontrolör ile gerçekleştirilmesinde yeni bir yöntem ortaya koyan ve mevcut kontrol performansını ileriye taşıyan çalışmalar bu alana katkı sağlayacaktır.

İlk olarak PID kontrolör parametrelerini ayarlayan yöntem Ziegler ve Nichols (1942) [9] tarafından tanıtıldı, daha sonra birkaç farklı ayar kuralı önerildi. Åström ve Hägglund (1995) [10] tarafından önerilen yöntem bunlardan birisidir. Günümüzde, kontrolör parametrelerinin ayarlanmasında kullanılan çok sayıda teknik bulunmaktadır. Analitik metotlar, frekans cevabı yöntemleri, adaptif yöntemler ve optimizasyon yöntemleri bunlara örnek olarak sayılabilir [11]. Bunların içerisinde optimizasyon yöntemleri günümüzde bilgisayar işlem kapasitelerinin artmasıyla birlikte sıklıkla kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Genetik algoritma (GA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), balina optimizasyon algoritması (WOA), gri kurt optimizasyonu (GWO), yapay arı kolonisi algoritması (ABC), manta vatozu beslenme optimizasyonu (MRFO), yusufoçuk algoritması (DA) gibi sezgisel algoritma tabanlı optimizasyon algoritmaları kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde optimal çözümler sunmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar, sosyal hayvanların doğada sergiledikleri davranışlardan esinlenerek ortaya çıkan algoritmaların, optimizasyon problemlerinde klasik yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Sabir ve Khan [1] çalışmalarında sezgisel teknikleri kullanarak DC motor hız kontrolünü PID kontrolör ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, Ziegler-Nichols ve Cohen-Coon yöntemlerine göre belirledikleri PID kontrolör parametrelerine göre de kontrol gerçekleştirmişlerdir. GA ve PSO kullanarak yaptıkları tasarımların diğer klasik yöntemlere kıyasla oldukça başarılı sonuçlar sağladığını ifade etmişlerdir. Bir başka çalışmada DC motor hız kontrolü, Böbrek-ilhamlı Algoritma kullanılarak PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir [12]. Çalışmalarında, DC motorun hız kontrolü için tasarlanan PID kontrolörün kapalı çevrim sisteminin yüzde aşma, yükselme zamanı ve yerleşme zamanı gibi zaman cevabı karakteristiklerini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür.

Optimizasyon algoritmalarında en önemli konulardan bir tanesi amaç fonksiyonunun tanımlanmasıdır. Kontrol sistemlerinde oluşan hata, hatanın integrali (IE), hatanın karesinin ortalaması (MSE), hatanın mutlak değerinin integrali (IAE), hatanın karesinin integrali (ISE), hatanın zaman ağırlıklı mutlak değerinin integrali (ITAE) ve hatanın zaman ağırlıklı karesinin integrali (ITSE) gibi performans ölçütleri ile minimize edilir [11]. Bununla beraber, sistemin zaman cevabı karakteristikleri kullanılarak amaç fonksiyonu oluşturmak mümkündür. Sistemin isterleri (yerleşme zamanı ya da maksimum yüzde aşma değerleri gibi) göz önünde bulundurularak ve daha iyisi hedeflenerek amaç fonksiyonu tanımlanabilir.

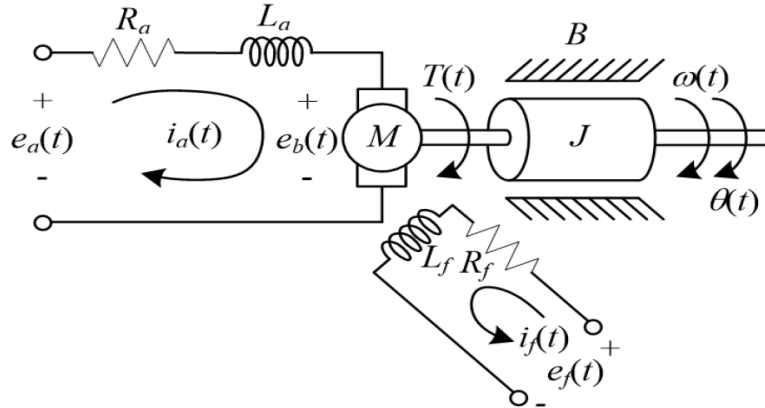
Bu makalede yapılan çalışma ve literatüre katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Bu çalışmada, DC motorun hız kontrolü, kesir dereceli PID kontrolör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrolör parametreleri yusufçuk algoritmasına dayalı bir optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışmada, hem integral performans ölçütleri hemde zaman cevabı özellikleri kullanılarak çok kriterli bir amaç fonksiyonu önerilmiştir.
- Çalışmada, DC motor hız kontrol sistemi için zaman cevabı ve dayanıklılık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürden önemli çalışmalarla karşılaştırılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır.

Makalenin geri kalanı aşağıdaki şekilde organize edilmiştir. Sonraki bölüm materyal ve metot bölümüdür. Bu bölümde DC motorun matematiksel modeli ve optimizasyon yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. 3. Bölüm simülasyon çalışmasını içerir. Bu bölümde kesir dereceli PID kontrolör tasarımları yer almaktadır. Kontrol edilen sistemin zaman cevabı performansı ve dayanıklılık analizi bu bölümde sunulmuştur. Son bölüm sonuçlar kısmını içerir.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde, DC motorun matematiksel modeli verilerek transfer fonksiyonu elde edilecektir. Ardından DC motorun hız kontrolünde kullanılacak olan yusufçuk algoritması hakkında bilgi verilecektir. Son olarak, kesir dereceli PID kontrolörün parametrelerinin ayarlanması ele alınacaktır.



Şekil 1. DC motor hız kontrolünün eşdeğer devresi [13]

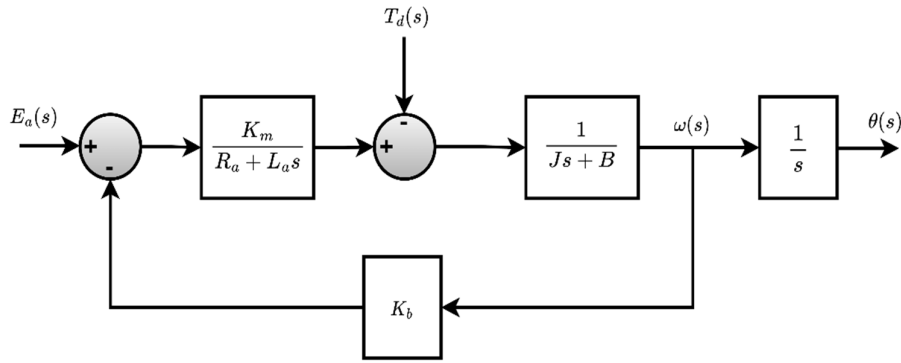
2.1. DC Motorun Matematiksel Modeli

DC motor doğru akım elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren eyleyici bir cihazdır. Motorun armatüründe (rotor) üretilen torkun büyük bir kısmı harici bir yükü sürmek için kullanılır. DC

motorun endüstride kullanılan başlıca iki tipi vardır. Bunlardan ilki sabit kutup yapısının alan bobini boyunca akım tarafından akının üretildiği geleneksel DC motordur. İkinci tip, sabit mıknatısın tel sargılı alan direkleri yerine gerekli hava aralığı akısını sağladığı fırçasız DC motordur (BLDC motor). BLDC motor, daha küçük hacim, yüksek tork ve basit yapısının avantajlarından dolayı, yüksek performanslı sürücü gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Şekil 1’de görülen bir DC motorun eşdeğer devresinde R_a ve L_a sırasıyla armatür direnci ve armatür endüktansını göstermektedir. Ayrıca, i_a armatür akımını, i_f alan akımını, e_a uygulanan armatür gerilimini, e_b ters elektromotor kuvvetini, T motor momentini, ω motor mili açısal hızını, J motorun eylemsizlik momentini, K_b elektromotor kuvveti sabitini, K_m motor momenti sabitini ve B motor sürtünme sabitini temsil etmektedir [13].

Bir DC motor modeline ait blok diyagram Şekil 2’de verilmiştir. Blok diyagrama göre DC motorun hız transfer fonksiyonu Denklem (1)’deki gibi ifade edilir.



Şekil 2. DC motor kontrol şeması

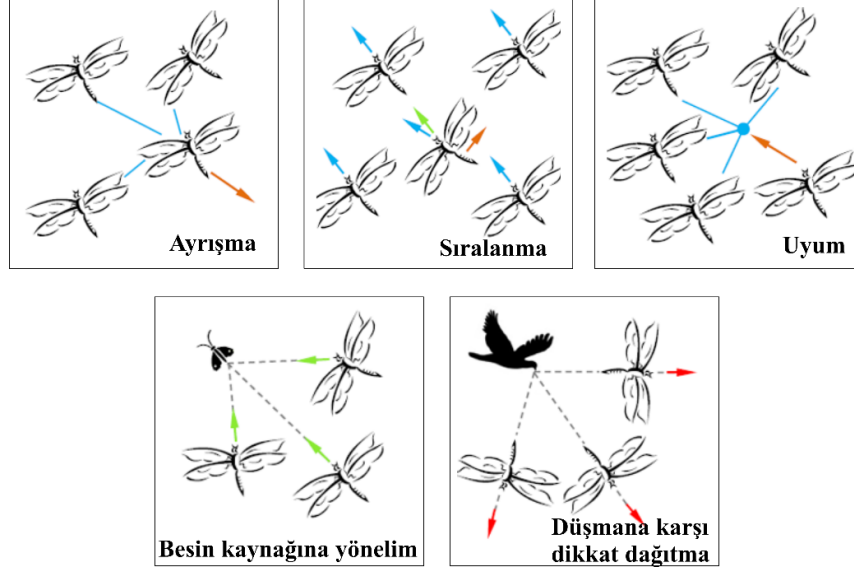
$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{[(R_a + L_a s)(J s + B) + K_b K_m]} \quad (1)$$

2.2. Yusufçuk Algoritması

Yusufçuk algoritması, sürü tabanlı bir algoritma olup, yusufçukların doğada sergiledikleri davranışlardan esinlenerek Seyedali Mirjalili [14] tarafından 2014 yılında geliştirilmiştir. Yusufçuklar, doğada bulunan küçük böceklerin birçoğunu avlayan küçük avcılar olarak bilinir [14]. Yusufçukların oğul verme davranışları ilginç ve benzersiz bir davranıştır. Yusufçuklar, avlanma ve göç olmak üzere sadece iki amaç için toplanır. Beslenen sürü statik, göç eden sürü dinamik sürü olarak kabul edilir. Statik sürüde, yusufçuklar küçük gruplar oluşturur ve kelebekler ve sivrisinekler gibi diğer uçan böcekleri avlamak için küçük bir alan üzerinde ileri geri uçar [15]. Yerel hareketler ve uçuş yolundaki ani değişiklikler, statik bir sürünün ana özellikleridir. Bununla birlikte, dinamik sürülerde, çok sayıda yusufçuk, sürüyü uzun mesafelerde tek yönde göç etmek için oluşturur [16]. Statik ve dinamik sürü davranışları yusufçuk algoritmasının temel esin kaynağıdır. Bu davranışlar, keşif ve sömürü olarak adlandırılan iki ana optimizasyon aşamasına çok benzer. Yusufçukların statik bir sürüde alt sürüler oluşturması ve farklı alanlar üzerinde uçması keşif aşamasının temel amacıdır. Bununla beraber, statik sürüde, yusufçuklar daha büyük sürüler halinde ve tek bir yön boyunca uçarlar, bu da kullanım aşamasında elverişlidir.

Reynolds'a göre, sürülerin davranışı üç ilkel ilkeyi takip eder [17]. Bunlardan ilki ayrışmadır ve bireylerin çevresindeki diğer bireylerden statik çarpışmadan kaçınmasını ifade eder. İkincisi sıralanma

ya da gruplaşma davranışdır ve bireylerin çevresindeki diğer bireylerle hız eşleşmesini gösterir. Son ilke, bireylerin sürü merkezine doğru eğilimini ifade eden uyum davranışdır. Yusufçuk algoritmasında, bu üç temel ilkeye besine yönelme ve düşmandan uzaklaşma şeklinde iki ilke daha eklenmiştir. Herhangi bir sürünün temel amacı hayatta kalmaktır, bu nedenle tüm bireyler yiyecek kaynaklarına yönelmeli ve düşmanlara dikkat etmelidir. Bu iki davranış göz önüne alındığında, Şekil 3'te gösterildiği gibi, sürüdeki bireylerin konum güncellemelerinde beş ana faktör vardır.



Şekil 3. Yusufçukların sürü içerisindeki temel davranışları [14]

Yusufçuk algoritmasında, bu davranışların her biri matematiksel olarak modellenmiştir. Ayrışma ya da ayrılma davranışını hesaplamak için kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$S_i = -\sum_{j=1}^N X - X_j \quad (2)$$

Burada, N komşu bireylerin sayısını gösterirken, X mevcut bireyin konumunu ve X_j komşu bireyin j . konumunu gösterir.

Sıralanma ya da gruplaşma davranışı Denklem (3) ile ifade edilir. Denklemde V_j komşu bireyin j . hızını temsil eder.

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^N V_j}{N} \quad (3)$$

Uyum davranışı Denklem (4) ile modellenir.

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} - X \quad (4)$$

Besin kaynağına doğru yönelim aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir. Denklemde X mevcut bireyin konumunu gösterirken, X^+ besin kaynağının konumunu gösterir.

$$F_i = X^+ - X \quad (5)$$

Bir düşmana karşı oyalama ya da dikkat dağıtma davranışı aşağıdaki eşitlikle modellenir. Denklemde X mevcut bireyin konumunu gösterirken, X^- düşmanın konumunu temsil eder.

$$E_i = X^- + X \quad (6)$$

Yusuflukların davranışlarının yukarıda verilen beş matematiksel modelin birleşiminin olduğu kabul edilir. Bir arama uzayındaki yapay yusuflukların konumunu güncellemek ve hareketlerini simüle etmek için adım (DX) ve konum (X) vektörleri dikkate alınır. Adım vektörü, PSO'daki hız vektörüne benzerdir ve yusufluk algoritması, PSO algoritmasının çerçevesine dayalı olarak geliştirilmiştir. Adım vektörü Denklem (7)'deki gibi tanımlanır ve yusuflukların hareket yönünü gösterir.

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\Delta X_t \quad (7)$$

Denklem (7)'de, s ayırma ağırlık katsayısı iken S_i i . bireyin ayrılmasını temsil eder. a sıralanma ağırlık katsayısıdır, A_i i . bireyin sıralanmasıdır. c uyum ağırlığını, C_i i . bireyin uyumudur. f besin faktörünü temsil ederken F_i i . bireyinin besin kaynağını temsil eder. e düşman faktördür ve E_i i . bireyin düşmanının konumunu gösterir. Ayrıca w ve t sırasıyla eylemsizlik ağırlığı ve iterasyon sayısını gösterir.

Konum vektörü ise aşağıdaki gibi hesaplanır. Denklemde t mevcut iterasyondur.

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_{t+1} \quad (8)$$

Yapay yusuflukların rastgeleliğini, stokastik davranışını ve keşfini geliştirmek için, komşu çözümler olmadığında rastgele bir yürüyüş (Le'vy uçuşu) kullanarak arama alanı çevresinde uçmaları gerekir. Bu durumda, yusufluk konumlarını güncellemek için Denklem (9) ve Denklem (10) kullanılır.

$$X_{t+1} = X_t + Le'vy(d) \times X_t \quad (9)$$

$$Le'vy(x) = 0.01 \times \frac{r_1 \times \sigma}{|r_2|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (10)$$

Denklem 9'da t geçerli iterasyon ve d ise konum vektörlerinin boyutudur. Denklem 10'da r_1 ve r_2 $[0, 1]$ aralığında rasgele sayılardır. Aynı denklemde β ise sabit bir değerdir [14].

Yusufluk algoritması sözde kodu Şekil 4'te verilmiştir.

```

Yusufluk popülasyonu başlat,  $X_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )
Adım vektörlerini başlat,  $\Delta X_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )
while son koşul sağlanmadı
    Tüm yusuflukların objektif değerlerini hesapla
    Besin kaynağını ve düşmanı güncelle
     $w$ ,  $s$ ,  $a$ ,  $c$ ,  $f$  ve  $e$ 'yi güncelle
    Denklemleri kullanarak  $S$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $F$  ve  $E$ 'yi hesapla
    Komşu yarıçapı güncelle
    if bir yusuflukta en az bir komşu yusufluk varsa
        Hız vektörünü güncelle (Denklem 8)
        Konum vektörünü güncelle (Denklem 9)
    else
        Konum vektörünü güncelle (Denklem 10)
    end if
    Değişkenlerin sınırlarına göre yeni konumları kontrol et ve düzelt
end while

```

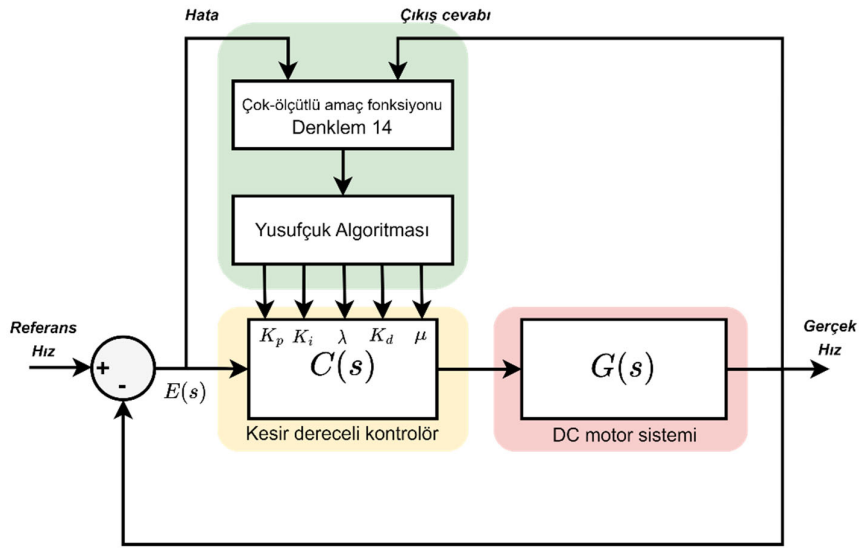
Şekil 4. Yusufluk algoritması sözde kodu [14]

2.3. Kesir Dereceli PID Kontrolörün Parametrelerinin Ayarlanması

Kesir dereceli PID kontrolörler, geleneksel PID kontrolörlere göre daha başarılı bir kontrol sağlarlar [18]. Bu sebeple günümüzde kesir dereceli PID kontrolörlere olan ilgi artmıştır. Bu kontrolör yapısında geleneksel PID kontrolöre göre fazladan iki parametre vardır. Bu ilave parametrelerden λ integral derecesi, μ türev derecesini ifade eder. Kesir dereceli PID kontrolörün eşitliği Denklem (11)'de verilmiştir [19, 20]. Denklemde λ ve μ değerleri 1 olarak alındığında kesir dereceli PID geleneksel PID olur.

$$C_{fopid}(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (11)$$

DC motorun hız kontrolünde kesir dereceli PID kontrolör kullanılan yapının blok diyagramı Şekil 5'te verilmiştir. Şekil ayrıca optimizasyon yöntemini de içerir.



Şekil 5. Kesir dereceli PID kontrolöre dayalı DC motor hız kontrolü blok diyagramı

Kesir dereceli PID kontrolörün parametrelerinin ayarlanması için optimizasyon algoritmasında kullanılacak amaç fonksiyonunun tanımlanması gerekir. Kontrol sistemlerinde hatayı esas alan integral performans ölçütleri geliştirilmiştir. Bu ölçütlerden sıkça kullanılan ikisi sırasıyla ITAE ve ITSE kriterleridir. Bu iki performans ölçütünün eşitlikleri sırasıyla Denklem (12) ve Denklem (13)'te verilmiştir [21].

$$J_{ITAE} = \int t \times |e(t)| dt \quad (12)$$

$$J_{ITSE} = \int t \times e^2(t) dt \quad (13)$$

Amaç foksionunda integral performans kriterlerinin haricinde zaman cevabı özelliklerinden yüzde aşma, yerleşme zamanı, kalıcı durum hatası gibi performans kriterleri de kullanılabilir. Bahsi geçen kriterlerden birden fazlası aynı amaç fonksiyonunda tanımlandığında, amaç fonksiyonu çok-ölçütlü amaç fonksiyonu adını alır. Çalışmada kullanılan çok-ölçütlü amaç fonksiyonu Denklem (14)'te verilmiştir.

$$J_{\min} = a_1 \times J_{ITAE} + a_2 \times J_{ITSE} + a_3 \times J_{Mp} \quad (14)$$

Burada, a katsayıları $[0 1]$ aralığında değişen ağırlık katsayılarıdır ve değerleri deneme-yanılma tekniğiyle ayarlanmıştır. Ayrıca, hedef maksimum yüzde aşma değeri sıfır olacak şekilde tanımlanmıştır. Denklem (14)'te M_p maksimum aşmayı temsil eder ve Denklem 15'teki gibi ifade edilir [13].

$$M_p = y(t_p) - 1 \quad (15)$$

Optimizasyon algoritması popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı ve kontrolör parametrelerinin alt-üst sınır değerlerinin girilmesiyle başlatılır. Algoritma, durma kriteri sağlanınca durur. Böylece optimal kontrolör parametreleri elde edilmiş olur.

3. Simulasyon Çalışması

Bu bölümde, parametreleri verilen DC motor MATLAB/Simulink ortamında modellendi ve hız kontrolü için optimizasyon algoritması oluşturuldu. Tasarlanan kesir dereceli PID kontrolöre göre zaman cevabı ve dayanıklılık analizi yapılarak elde edilen sonuçlar farklı çalışmalarla karşılaştırıldı. Çalışmada kullanılan DC motora ait parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. DC motorun parametreleri [3]

	Parametre	Değer
R_a	Armatür direnci	0.4Ω
L_a	Armatür indüktansı	2.7H
K_m	Motor moment sabiti	0.015
K_b	Elektromotor kuvveti sabiti	0.05
J	Motorun eylemsizlik momenti	0.0004
B	Motor sürtünme sabiti	0.0022

Verilen parametrelerin Denklem (1)'de yerine yazılmasıyla DC motorun transfer fonksiyonu Denklem (16)'teki gibi elde edilir.

$$G_m(s) = \frac{0.015}{0.00108s^2 + 0.0061s + 0.00163} \quad (16)$$

Optimal kontrolör parametrelerine ulaşabilmek için optimizasyon algoritması 20 kez çalıştırıldı. Algoritmada, popülasyon sayısı 30, iterasyon sayısı 50 olacak şekilde ayarlandı. En küçük amaç fonksiyonu değerine göre seçilen kesir dereceli PID kontrolör parametreleri Çizelge 2'deki gibi belirlendi. Simulasyon çalışmasında K_p , K_i ve K_d parametrelerinin alt ve üst sınırları $[0 20]$, λ ve μ parametresinin alt ve üst sınırları $[0 1]$ olarak alınmıştır. Ayrıca kesir dereceli PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi, zaman cevaplarının elde edilmesi gibi kesir dereceli işlemler Fomcon araç kutusu kullanılarak yapılmıştır [22].

Çizelge 2. Kontrolör parametreleri

Algoritma / Kontrolör	K_p	K_i	K_d	λ	μ
DA/FOPID (önerilen yöntem)	20	8.0164	5.2154	0.7291	0.9452
GWO/FOPID [3]	18.328	4.9418	3.2612	0.9998	0.9845
MRFO/FOPID [2]	19.0527	6.3585	5.3293	0.9466	0.9222
GWO / PID [3]	6.8984	0.5626	0.9293	-	-
WOA / PID [23]	20	5.3442	3.5419	-	-

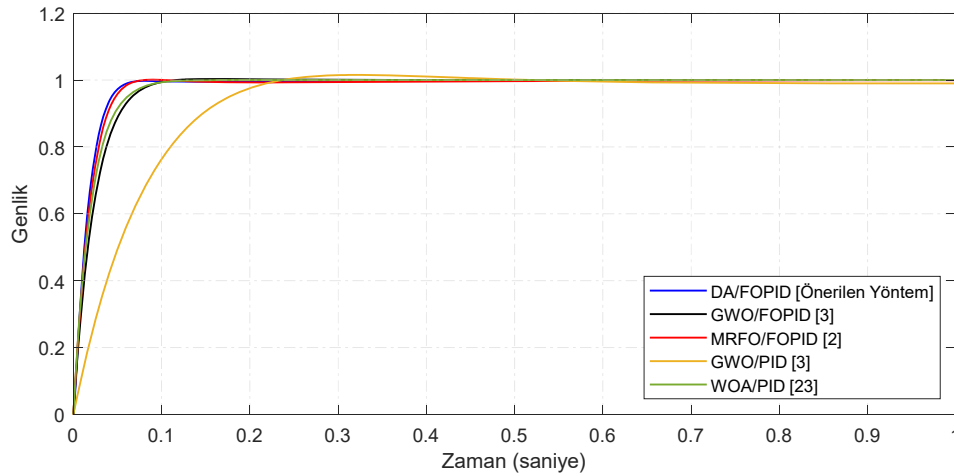
Belirlenen kontrolör parametrelerinin kesir dereceli PID kontrolör denkleminde yerine yazılmasıyla kontrolör denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$C_{fopid}(s) = 20 + \frac{8.0164}{s^{0.7291}} + 5.2154s^{0.9452} \quad (17)$$

Belirlenen kontrolörün Denklem (16)'daki gibi modellenen sisteme uygulanmasıyla kapalı çevrim sistemin transfer fonksiyonu Denklem (18)'deki gibi elde edilir.

$$G_{kç}(s) = \frac{0.078231s^{1.6743} + 0.3s^{0.7291} + 0.12025}{0.00108s^{2.7291} + 0.0061s^{1.7291} + 0.078231s^{1.6743} + 0.30163s^{0.7291} + 0.12025} \quad (18)$$

Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevap eğrisi Şekil 6'da sunulmuştur. Şekilde ayrıca farklı yöntemlere göre belirlenmiş çeşitli çalışmalarla karşılaştırma yapılmıştır. İlave olarak, zaman cevabı özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.



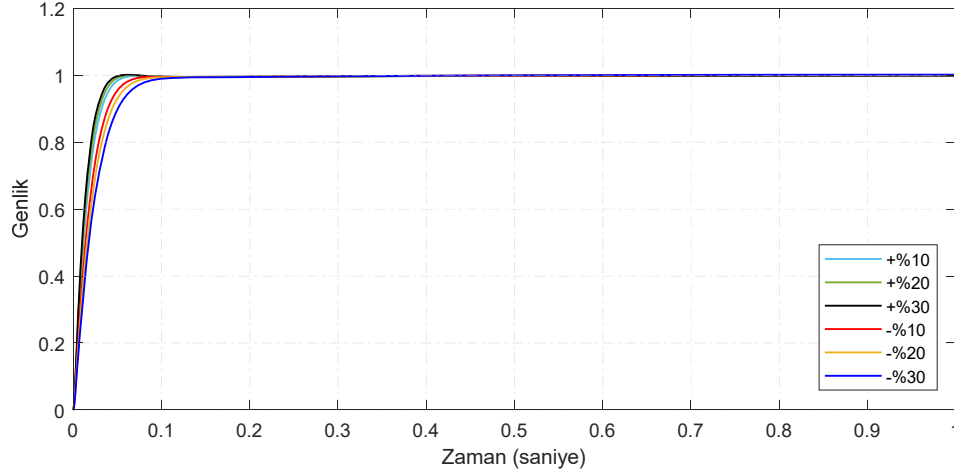
Şekil 6. Bazı yaklaşımlara göre DC motor hız kontrolünün performans karşılaştırması

Şekil 6 incelendiğinde, önerilen yöntemin aşısız ve hızlı bir cevabı olduğu görülmektedir. Ayrıca karşılaştırılan diğer yöntemlere göre üstün bir kontrol sağladığı açıktır. Önerilen yöntemin zaman cevabı özellikleri detaylı olarak Çizelge 3'ten incelenebilir. Çizelgede yerleşme zamanı %2 tolerans değerine göre hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Zaman cevabı özellikleri

Algoritma / Kontrolör	Yerleşme zamanı (s)	Yükselme zamanı (s)	Yüzde aşma (%)
DA/FOPID [önerilen yöntem]	0.0534	0.0323	0
GWO/FOPID [3]	0.1172	0.058	0.51
MRFO/FOPID [2]	0.0562	0.0355	0.1546
GWO/PID [3]	0.254	0.171	1.06
WOA/PID [23]	0.0795	0.0447	0

Yapılan kontrolör tasarımının dayanıklılık performansını değerlendirmek amacıyla motorun R_a ve K_b parametreleri sırasıyla %10, %20, %30, -%10, -%20 ve -%30 oranında değiştirilmiştir. Denklem (17)'deki kontrolörün yeni oluşan modellere uygulanması sonucunda oluşan cevap eğrileri Şekil 7'de verilmiştir. Yapılan kontrolör tasarımının dayanıklı olduğu Şekil 7'den açıkça görülmektedir.



Şekil 7. R_a ve K_b parametrelerinin değişimlerine göre çıkış cevabı

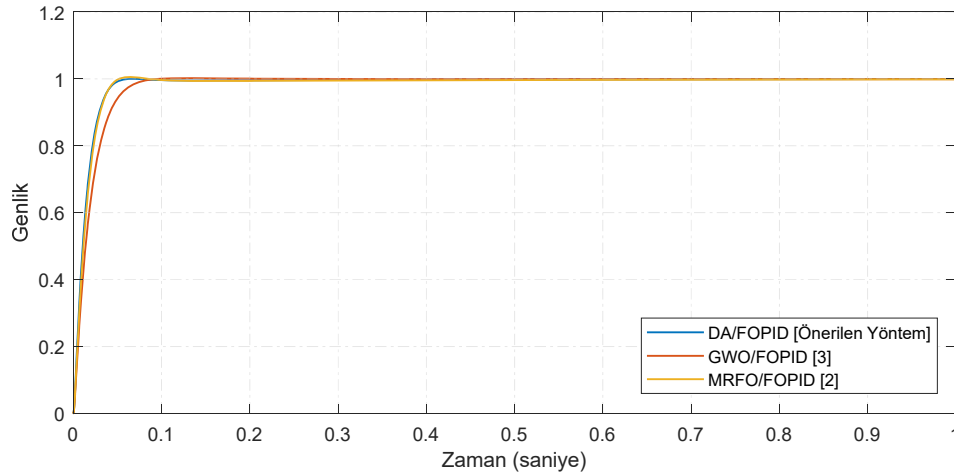
Ayrıca, farklı yöntemlerin karşılaştırıldığı dayanıklılık analizi dört durum için incelenmiştir. Detaylı zaman cevabı özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelgede yerleşme zamanı %2 toleransla hesaplanmıştır.

Durum 1: Motorun R_a ve K_b parametrelerinin her ikisinde %25 arttırılmıştır. Bu duruma göre oluşan transfer fonksiyonu Denklem (19)'daki gibi olmaktadır.

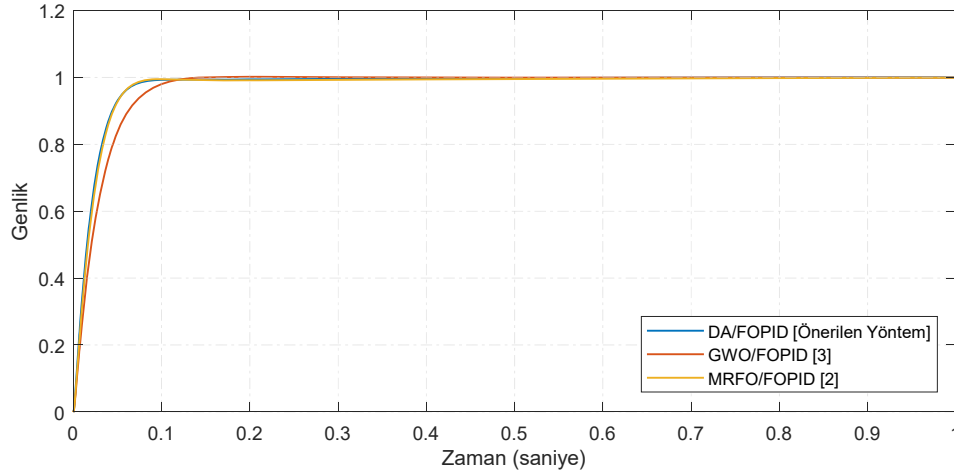
$$G_1(s) = \frac{0.018}{0.00108s^2 + 0.00614s + 0.002} \quad (19)$$

Çizelge 2'de parametreleri verilen kontrolörlerin Denklem (19)'a uygulanmasıyla elde edilen sistemin birim basamak cevap eğrileri Şekil 8'deki gibi olmaktadır. Önerilen yöntem ve İkinci ve ark. [2] tarafından önerilen yöntemin neredeyse aynı çıkış cevabını verdiği şekilden görülmektedir. Ek olarak, üç yöntemin de dayanıklılık sağladığı açıktır.

Durum 2: Motorun R_a parametresi %25 arttırılmış ve K_b parametresi %25 azaltılarak Durum 1'deki çalışma tekrarlanmıştır. Elde edilen cevap eğrileri Şekil 9'daki gibi sunulmuştur. Önerilen yöntemin Agarwal ve ark. [3] yöntemine göre göre iyi bir performans sağladığı ve [2] ile hemen hemen aynı performansı gösterdiği şekilden görülmektedir.



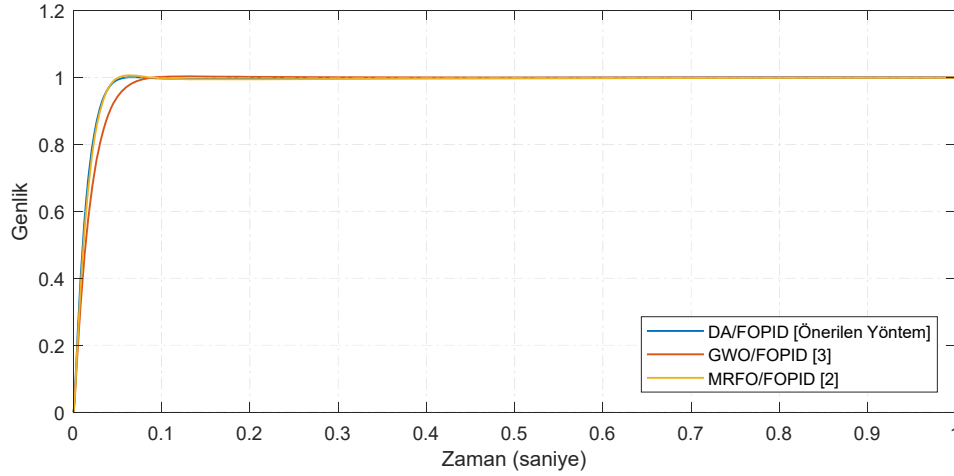
Şekil 8. DC motor hız cevaplarının Durum 1'e göre karşılaştırılması



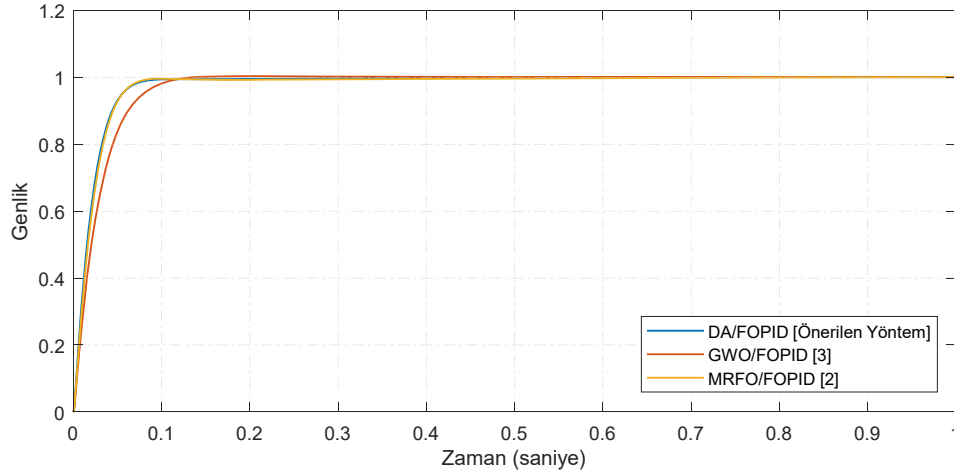
Şekil 9. DC motor hız cevaplarının Durum 2'ye göre karşılaştırılması

Durum 3: Motorun R_a parametresi %25 azaltılmış ve K_b parametresi %25 artırılarak dayanıklılık analizi gerçekleştirilmiştir. Çıkış cevap eğrileri Şekil 10'da verilmiştir. Önerilen yöntemin [3]'e göre daha hızlı bir cevap sağladığı ve [2] ile karşılaştırıldığında yerleşme süresi ve yükselme zamanı olarak çok yakın olduğu, yüzde aşmada daha iyi bir performans sağladığı Çizelge 4'ten görülmektedir.

Durum 4: Motorun R_a ve K_b parametrelerinin her ikisinde %25 azaltılarak çalışma tekrarlanmıştır. Şekil 11, DC motor hız cevaplarının Durum 4'e göre karşılaştırmasını sunmaktadır. Diğer durumlardaki tablo yaklaşık olarak burada da aynıdır.



Şekil 10. DC motor hız cevaplarının Durum 3'e göre karşılaştırılması



Şekil 11. DC motor hız cevaplarının Durum 4'e göre karşılaştırılması

Sonuç olarak, yapılan kesir dereceli PID kontrolör tasarımının hem zaman cevabı analizinde hemde dayanıklılık analizinde başarılı bir performans gösterdiği karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4. Dört farklı durum için zaman cevabı özellikleri

Durum	Parametre	Algoritma / Kontrolör	Yerleşme zamanı (s)	Yükselme zamanı (s)	Yüzde aşma (%)
Durum 1	$R_a=0.5$ $K_m=0.018$	DA/FOPID [önerilen yöntem]	0.0434	0.0267	0.0704
		GWO/FOPID [3]	0.0649	0.0384	0.3000
		MRFO/FOPID [2]	0.0424	0.0274	0.6759
Durum 2	$R_a=0.5$ $K_m=0.012$	DA/FOPID [önerilen yöntem]	0.0706	0.0407	0.0000
		GWO/FOPID [3]	0.0993	0.0583	0.2253
		MRFO/FOPID [2]	0.0678	0.0414	0.0000
Durum 3	$R_a=0.3$ $K_m=0.018$	DA/FOPID [önerilen yöntem]	0.0434	0.0267	0.0835
		GWO/FOPID [3]	0.0648	0.0384	0.3291
		MRFO/FOPID [2]	0.0424	0.0274	0.6813
Durum 4	$R_a=0.3$ $K_m=0.012$	DA/FOPID [önerilen yöntem]	0.0705	0.0408	0.0000
		GWO/FOPID [3]	0.0991	0.0583	0.2645
		MRFO/FOPID [2]	0.0678	0.0414	0.0000

4. Sonuçlar

Bu çalışmada DC motorun hız kontrolünü kesir dereceli PID kontrolör ile gerçekleştirmek için bir parametre ayarlama metodu önerildi. Öncelikle, optimal kontrolör parametrelerini belirlemek için optimizasyon algoritması oluşturuldu ve yusuçuk algoritması kullanılarak parametreler belirlendi. Algoritmada çok-ölçütlü amaç fonksiyonu ITAE, ITSE kriterleri ve yüzde aşmaya göre ayarlanarak optimal çözümler arandı. Kontrolör tasarımının performansını değerlendirmek için zaman cevabı ve dayanıklılık analizleri gerçekleştirildi. Yapılan analizler literatürden farklı çalışmalarla kıyaslanarak performans analizleri yapıldı. Zaman cevabı performansı açısından bir değerlendirme yapıldığında önerilen yöntem ile aşımın olmadığı bunun yanında diğer üç yöntemde aşım olduğu görülmektedir. Ayrıca, önerilen yöntemle yerleşme süresi 0.0534 s olurken, diğer yöntemlerden en yakın sonuç 0.0562 s yerleşme süresi ile MRFO/FOPID ile elde edilmiştir. Diğer üç yöntem ise daha uzun yerleşme sürelerine sahiptir. Benzer durum yükselme süresi için de geçerlidir. Önerilen yöntem ile dayanıklılık analizinde neredeyse sıfır maksimum aşma, çok kısa bir yerleşme ve yükselme zamanı elde edildiği görülmüştür. Sonuç olarak, önerilen DA/FOPID metodunun DC motorun hız kontrolünde diğer yöntemlere göre daha başarılı kontrol gerçekleştirdiği elde edilen şekil ve çizelgelerden görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Sabir M.M.,Khan J.A. Optimal design of PID controller for the speed control of DC motor by using metaheuristic techniques. *Advances in artificial neural systems*, vol. 2014, 2014,
- [2] Ekinci S.,Izci D.,Hekimoğlu B. Optimal FOPID speed control of DC motor via opposition-based hybrid manta ray foraging optimization and simulated annealing algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 46, no. 2; 2021, pp. 1395-1409.
- [3] Agarwal J.,Parmar G.,Gupta R.,Sikander A. Analysis of grey wolf optimizer based fractional order PID controller in speed control of DC motor. *Microsystem Technologies*, vol. 24, no. 12; 2018, pp. 4997-5006.
- [4] Hekimoğlu B. Optimal tuning of fractional order PID controller for DC motor speed control via chaotic atom search optimization algorithm. *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 38100-38114.
- [5] Idir A.,Kidouche M.,Bensafia Y.,Khettab K.,Tadjer S.A. Speed control of DC motor using PID and FOPID controllers based on differential evolution and PSO. *evolutionary computation*, vol. 20, 2018, p. 21.
- [6] Jain R.V.,Aware M.,Junghare A. Tuning of fractional order PID controller using particle swarm optimization technique for DC motor speed control. in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1-4: IEEE.
- [7] Puangdownreong D. Fractional order PID controller design for DC motor speed control system via flower pollination algorithm. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, vol. 17, no. 1; 2019, pp. 14-23.
- [8] Singhal R.,Padhee S.,Kaur G. Design of fractional order PID controller for speed control of DC motor. *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 2, no. 6; 2012, pp. 1-8.
- [9] Ziegler J.G.,Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, vol. 64, no. 11; 1942,
- [10] Astrom K.J. *PID controllers. Theory, Design, and Tuning*, 1995,
- [11] Joseph S.B.,Dada E.G.,Abidemi A.,Oyewola D.O.,Khammas B.M. Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems. *Heliyon*, 2022, p. e09399.
- [12] Hekimoğlu B. Böbrek-ilhamlı Algoritma ile Ayarlanan PID Kontrolör Kullanarak DC Motor Hız Kontrolü. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 2; 2019, pp. 652-663.
- [13] Ogata K. *Modern control engineering*. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2010.

- [14] Mirjalili S. Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural computing and applications*, vol. 27, no. 4; 2016, pp. 1053-1073.
- [15] Wikelski M., Moskowitz D., Adelman J.S., Cochran J., Wilcove D.S., May M.L. Simple rules guide dragonfly migration. *Biology letters*, vol. 2, no. 3; 2006, pp. 325-329.
- [16] Russell R.W., May M.L., Soltesz K.L., Fitzpatrick J.W. Massive swarm migrations of dragonflies (Odonata) in eastern North America. *The American Midland Naturalist*, vol. 140, no. 2; 1998, pp. 325-342.
- [17] Reynolds C.W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. in *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1987, pp. 25-34.
- [18] Das S., Saha S., Das S., Gupta A. On the selection of tuning methodology of FOPID controllers for the control of higher order processes. *ISA transactions*, vol. 50, no. 3; 2011, pp. 376-388.
- [19] Podlubny I. Fractional-order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers. *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 44, no. 1; 1999, pp. 208-214.
- [20] Shah P., Agashe S. Review of fractional PID controller. *Mechatronics*, vol. 38, 2016, pp. 29-41.
- [21] Atherton D. *Control engineering*. Bookboon, 2009.
- [22] Tepljakov A. FOMCON: fractional-order modeling and control toolbox. *Fractional-order modeling and control of dynamic systems*, 2017, pp. 107-129.
- [23] Şahin A.K., Akyazı Ö., Sahin E., Çakır O. DC Motorun Hız Kontrolü İçin Meta-Sezgisel Algoritma Tabanlı PID Denetleyici Tasarımı. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 10, no. 2; pp. 533-549.