
Araştırma Makalesi / Research Article

Böbrek-ilhamlı Algoritma ile Ayarlanan PID Kontrolör Kullanarak DC Motor Hız Kontrolü

Baran HEKİMOĞLU*

*Batman Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman, Türkiye
(ORCID: 0000-0002-1839-025X)*

Öz

DC motor hız kontrol sistemlerinin birçok endüstriyel uygulamasında, çoğunlukla oransal-integral-türevsel (PID) kontrolörler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, DC motor hız kontrolünün en uygun PID kontrolör parametreleri, yani oransal (K_p), integral (K_i) ve türev (K_d) kazançları, etkin ve hızlı bir ayar yöntemi olan böbrek-ilhamlı algoritma (Kidney-inspired Algorithm - KA) ile belirlenmektedir. Kontrol sisteminin tasarımında, kontrolör parametrelerinin KA tarafından optimize edilebilmesi için zaman bölgesi tabanlı bir performans ölçütü kullanılmıştır. Bu amaç fonksiyonu ile önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek için son yıllarda yayımlanmış gri kurt optimizasyon (Grey Wolf Optimization - GWO) algoritması, istilacı ot optimizasyon (Invasive Weed Optimization - IWO) algoritması ve stokastik fraktal arama (Stochastic Fractal Search - SFS) algoritması gibi diğer modern sezgisel-üstü optimizasyon algoritmalarına dayalı yaklaşımlarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarından, DC motorun hız kontrolü için tasarlanan KA tabanlı PID (KA-PID) kontrolörün kapalı çevrim sisteminin aşım, yerleşme zamanı ve yükselme zamanı gibi sistem karakteristiklerini en az iterasyonla önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. KA-PID kontrolör yaklaşımının gürbüzlük analizi de, DC motor parametrelerindeki değişikliklerle gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: DC Motor, PID Kontrolör, Böbrek-ilhamlı Algoritma, Parametre Ayarlaması.

Speed Control of DC Motor Using PID Controller Tuned via Kidney-inspired Algorithm

Abstract

In many industrial applications of DC motor speed control systems, mostly proportional-integral-differential (PID) controllers are used. In this study, the optimal PID controller parameters that is proportional (K_p), integral (K_i) and differential (K_d) gains of DC motor speed control are determined by an effective and fast adjustment method, the kidney-inspired algorithm (KA). In the design of the control system, a time domain-based performance criterion was used to optimize the controller parameters by KA. In order to evaluate the performance of the proposed approach with this objective function, comparisons were made with approaches based on some modern meta-heuristic optimization algorithms published in recent years such as grey wolf optimization (GWO), invasive weed optimization (IWO), and stochastic fractal search (SFS) algorithms. From the simulation results it has been shown that the KA-based PID (KA-PID) controller, which is designed for the speed control of the DC motor, has significantly improved the closed loop system characteristics such as overshoot, settling time, and rise time with minimal number of iterations. The robustness analysis of KA-PID controller approach has also been carried out with variations in the parameters of DC motor.

Keywords: DC Motor, PID Controller, Kidney-inspired Algorithm, Parameter Tuning.

1. Giriş

Son zamanlarda DC motorlar, hareket kontrolünde ya robotik gibi doğrudan tahrik uygulamalarında ya da proses otomasyonu ve bilgisayar çevresel birimleri uygulamalarında aktüatör olarak

*Sorumlu yazar: baran.hekimoglu@batman.edu.tr
Geliş Tarihi: 13.12.2018, Kabul Tarihi: 17.05.2019

kullanılmaktadır. DC motorların bu uygulamalarda kullanılması, basit kontrol edilebilir özelliklerinden ve ürettikleri momentin sürekli olmasından dolayıdır. Bu nedenle, DC motorların hız kontrolü üzerine yapılan çalışmalar önemlidir. Tüm endüstriyel ve robotik süreçlerde, doğası gereği doğrusal olmayan özelliklere sahip birçok sistem vardır. Bu özellikler bilinmemekle birlikte zamanla değişkendir. Basitliği, etkinliği ve sağlamlığı nedeniyle, oransal-integral-türevsel (PID) kontrolörler, endüstriyel ve robotik proseslerde en yaygın kullanılan kontrolörlerdir. Proses parametrelerindeki değişiklikler ve bozucu etkiler sistemi kararsız hale getirir [1].

Son yıllarda, tesislerdeki proseslerin karmaşıklığındaki artış nedeniyle, kararlılık ve iyi geçici rejim cevabı elde etmek için bir PID kontrolörün parametrelerinin ayarlanmasında bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. Öncelikle, her tür endüstride PID parametrelerinin ayarlama işlemi manuel olarak gerçekleştirilir ve bu tür manuel ayarlamalar zaman alıcı bir süreçtir. Ziegler-Nichols ayarlama yöntemi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir, ancak bu yöntem, kontrol edilen sisteme ait modelin önceden bilinmesini gerektirir. Otomatik ayarlama prosedürleri sistemi kararlı hale getirmek için önemlidir. Literatüre göre, manuel ayarlama, Ziegler-Nichols, kazanç-faz marjı ve Cohen-Coon yöntemleri gibi klasik PID kontrolör ayarlama yöntemleri, optimum performansa ulaşmak için karmaşık yüksek mertebeden süreçleri ayarlayamaz [2].

Geçen son yirmi yılda, optimizasyon için sezgisel ve sezgisel-üstü teknikler, araştırmacılar arasında oldukça popüler hale gelmiştir. Bu tekniklerin çoğu, fiziksel olayların yanı sıra, kuşların ve diğer hayvanların davranışlarından da ilham almaktadır. Bu algoritmaların geleneksel tekniklere kıyasla ana avantajları, basitlik, esneklik, rastgele arama yapabilme ve yerel optimadan kaçınılabilmektedir [3, 4]. Bazı popüler sezgisel ve sezgisel-üstü teknikler, genetik algoritma (GA) [5], yapay arı kolonisi (Artificial Bee Colony - ABC) algoritması [6], Jaya optimizasyon algoritması (JOA) [7], istilacı ot optimizasyon (Invasive Weed Optimization - IWO) algoritması [8], stokastik fraktal arama (Stochastic Fractal Search - SFS) algoritması [9], parçacık sürüsü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO) algoritması [8] ve gri kurt optimizasyon (Grey Wolf Optimization - GWO) algoritmasıdır [10] ki literatürde bu algoritmaların DC motor hız kontrolü için PID kontrolör parametrelerini ayarlama kullanıldıklarına dair çalışmalar zaten mevcuttur. Öte yandan, DC motor hız kontrol sistemi için en uygun çözümü bulabilen kesin bir algoritma yoktur. Bu nedenle, bir DC motor hız kontrol sistemindeki PID kontrolörün optimal parametrelerini tanımlamak için yeni bir sezgisel-üstü optimizasyon algoritmasının çalışılması araştırmacılar için gözlemlenebilir bir problemdir.

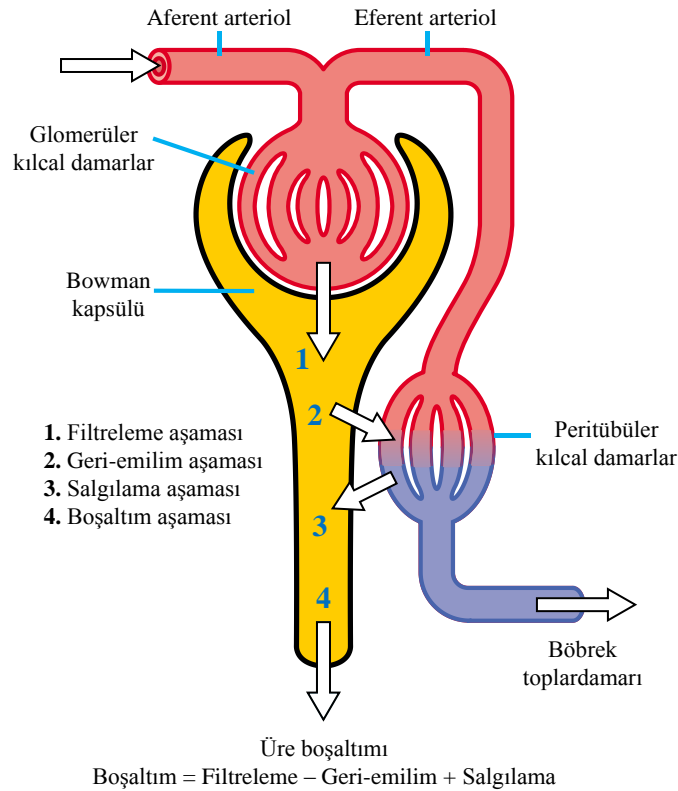
İlk olarak 2017 yılında Jaddi ve arkadaşları tarafından önerilen böbrek-ilhamlı algoritma (Kidney-inspired Algorithm - KA), böbreklerin üriner sisteminin fizyolojik yapısındaki dört çalışma fonksiyonunu (filtreleme, geri-emilim, salgılama ve boşaltım) taklit eder [11,12]. Yapılan ön çalışmalar, KA tekniğinin optimizasyon yeteneğinin GA, PSO ve diğer optimizasyon algoritmalarına nazaran daha etkin ve verimli olduğunu göstermiştir [11]. Bu algoritmanın en göze çarpan belirgin özelliği keşif (küresel arama) safhası ve sömürü (yerel arama) safhası arasındaki uyumlu dengedir. Bu özelliği sayesinde iyi bir yakınsama performansı gösterir [11]. Yeni bir algoritma olmasından ötürü, birkaç mühendislik uygulaması [13-17] haricinde birçok araştırma alanına henüz uygulaması yapılmamıştır. Bu makalenin amacı ve literatüre katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Bir DC motor hız kontrol sistemindeki PID kontrolör parametrelerinin en iyi ayarı için güçlü bir küresel optimizasyon algoritması olan KA tekniğinin ilk kez kullanımı önerilmiştir.
- DC motorun hız kontrolü için önerilen KA tabanlı PID (KA-PID) kontrolörünün performansını ve işe yararlığını ölçmek için literatürdeki diğer çalışmalarda önerilmiş olan GWO-PID [10], IWO-PID [8] ve SFS-PID [9] kontrolörleriyle karşılaştırmalar yapılarak hem geçici rejim cevabı analizi ve hem de gürbüzlük analizi yapılmıştır.

Bu çalışmanın bundan sonraki bölümleri aşağıdaki gibi organize edilmiştir: 2. bölümde böbrek-ilhamlı algoritmanın tanıtımı, 3. bölümde DC motor modelinin çıkarımı, 4. bölümde önerilen KA tekniğinin kapalı çevrim PID kontrollü DC motor sistemine uygulanması, 5. bölümde yapılan analizler için elde edilen simülasyon sonuçları ve tartışma ve son olarak 6. bölümde sonuç verilmiştir.

2. Böbrek-ilhamlı Algoritma

Böbrekler, insan biyolojik yapısının üriner sistemlerinde, aşırı su ve atıkların idrar yoluyla giderilmesi ve kandaki iyon miktarlarının ayarlanması yoluyla kanın filtrelenmesi gibi hayati fonksiyonları olan çok önemli organlardır. Bu nedenle, kan kimyasından, sıvı dengesinden ve dolayısıyla insan vücudunun genel sağlık durumundan sorumludurlar. Böbrek süreci, dört adımla özetlenebilen tekrarlanan bir süreçtir: filtreleme, geri-emilim, salgılama ve boşaltım. Filtreleme, çözünen maddelerin, hem Bowman kapsülünün basıncı hem de kan basıncı altında tüplere aktarıldığı glomerüler kılcal damarlarda başlar. Ardından, çözünen maddeler içindeki yararlı maddeleri tüplerden kan dolaşımına geri döndürmek için geri-emilim uygulanır. Çözünen maddelerin renal tüplere doğru hareketi ise salgılamadır. En son süreç ise idrardaki fazla maddelerin (su, atık ve iyonlar) atıldığı boşaltımdır. Şekil 1’de böbreğin temel fizyolojik mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 1. Böbreğin temel fizyolojik mekanizması [13]

İnsan vücudundaki böbreklerin yukarıda belirtilen işlevlerini temel alan ve onları simüle eden böbrek-ilhamlı algoritma (KA) ilk olarak Jaddi vd. (2017) tarafından önerilmiştir [11,12]. KA'nın başlangıç aşamasında, diğer popülasyon tabanlı algoritmalarda olduğu gibi olası çözünenlerin keyfi bir popülasyonu üretilerek bunlara ait amaç fonksiyonları hesaplanır. Her bir çözünen, biyolojik böbrek sistemindeki su parçacıkları ve plazmada çözünmüş maddeler olarak kabul edilebilir. Her iterasyonda, şimdiye kadar elde edilen en iyi çözüneneye doğru hareket edilecek şekilde tüm çözünenlerin her biri için yeni bir çözünen yaratılır. Bu algoritmada bir çözünenin hareketi aşağıdaki gibi formüle edilir [11]:

$$S_{i+1} = S_i + rand(S_{best} - S_i) \quad (1)$$

Burada S popülasyondaki bir çözüneni, S_i i .nci iterasyondaki bir çözüneni, $rand$ sıfır ile verilen bir sayı arasında rasgele seçilen bir sayıyı ve S_{best} önceki iterasyonlarda bulunan şimdiye kadar elde edilmiş en iyi çözüneni temsil etmektedir. Filtreleme operatörünü uygulayarak, daha yüksek kalitede olan popülasyondaki çözünenler filtrelenmiş kana (FB) aktarılırken geriye kalan çözünenler atığa (W) taşınır. Bu amaçla, KA'da her iterasyonda hesaplanan ve güncellenen bir filtreleme oranı kullanılır.

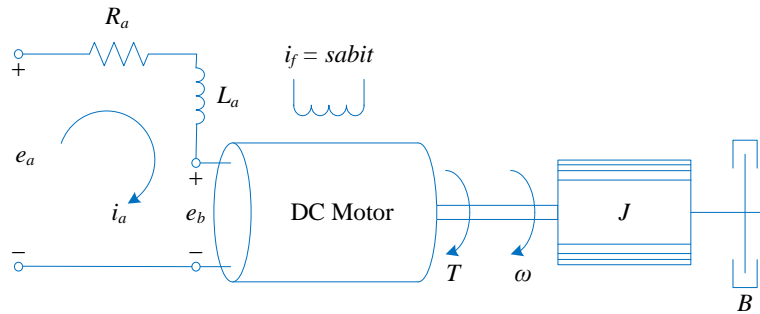
Filtreleme oranı (fr) biyolojik böbrek sistemindeki glomerüler filtreleme hızına benzerdir ve aşağıdaki gibi hesaplanır [11]:

$$fr = \alpha \sum_i^p f(x_i) / p \quad (2)$$

Burada α (0,1] aralığında sabit bir sayıdır, $f(x_i)$ i . iterasyonda x çözüneninin amaç fonksiyonudur, p popülasyon büyüklüğüdür. Bir çözünenin, FB veya W üyesi olarak kabul edilip edilmeyeceğini belirlemek için izlenecek kural şudur: eğer çözünenin kalitesi fr 'den büyükse, çözünen FB 'nin bir üyesi olarak kabul edilir, aksi takdirde, W 'nin bir üyesi olarak kabul edilir. Eğer W 'ye bir çözünen konursa, geri emilim operatörü çözüneni, kendisini geliştirip FB 'nin bir parçası haline gelebilmesi için bir şans daha verir. Bu ancak, Eşitlik (1)'deki hareket operatörünün tekrar uygulanmasından sonra çözünenin filtreleme oranını karşılamasıyla gerçekleşebilir. Bu, biyolojik böbrek sisteminde, yararlı parçacıkların kan dolaşımına geri emilimine benzer. Eğer bu şans değerlendirilemezse, çözünen W 'den dışarı atılır ve bunun yerine W 'ye başka bir rastgele çözünen eklenir. Ayrıca, filtreleme işleminden sonra, FB 'ye yerleştirilen bir çözünen FB 'deki en kötü çözünenen daha iyi ise, o zaman en kötü çözünen FB 'den salgılanır (çıkarılır). Ancak, eğer bu çözünen FB 'deki en kötü çözünenen daha iyi değilse, o zaman çözünenin kendisi salgılanır. Bu, biyolojik böbrek sisteminde kan dolaşımındaki zararlı parçacıkların salgılanmasına benzer. Bundan sonra, şimdiye kadar elde edilen en iyi çözüneni güncellemek için FB 'deki çözünenler sıralanır. Son olarak, yeni bir popülasyon oluşturmak için FB ve W birleştirilir ve filtreleme oranı güncellenir. Bu süreçler, sonlandırma kriterine ulaşılan kadar tekrarlanır. Rastgele çözünenlerin eklenmesi, biyolojik böbrek sisteminde glomerüler kılcal damarlara su ve çözünen maddelerin sürekli olarak eklenmesi olarak düşünülebilir.

3. DC Motor Modeli

DC motorlar harici ve kendinden uyarımlı türler olarak sınıflandırılır. Bu makalede, armatür geriliminin kontrolü üzerinden hız kontrolü için harici uyarımlı bir DC motor düşünülmüştür. DC motor hız kontrol sisteminin eşdeğer devresi Şekil 2'de gösterilmiştir [18].



Şekil 2. DC motor eşdeğer devresi

Bu şekildeki R_a armatür direncini, L_a armatür endüktansını, 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 motor momenti sabitini ve B motor sürtünme sabitini temsil etmektedir.

Sabit bir akı için endüklenen gerilim e_b açısal hız $\omega = d\theta/dt$ ile doğru orantılıdır.

$$e_b = K_b \frac{d\theta}{dt} = K_b \omega \quad (3)$$

Armatür-kontrollü bir DC servo motorun hızı, armatür gerilimi e_a ile kontrol edilir. Armatür devresi için diferansiyel denklem aşağıdaki gibidir.

$$e_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b \quad (4)$$

Armatür akımı, eylemsizlik momenti ile sürtünmeye karşılık gelen momenti üretir, yani,

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = K i_a \quad (5)$$

Tüm başlangıç koşullarının sıfır olduğu kabul edilerek (3)-(5) eşitliklerinin Laplace dönüşümleri alınır, aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

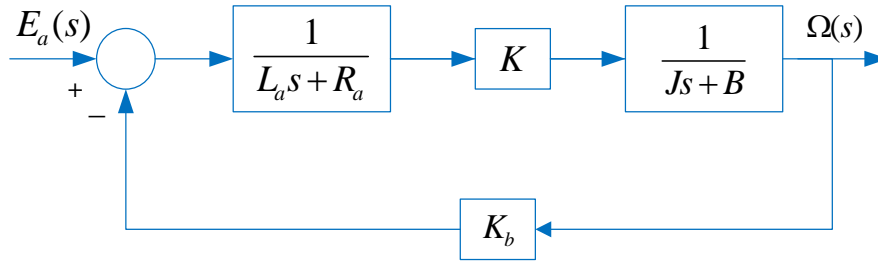
$$E_b(s) = K_b \Omega(s) \quad (6)$$

$$E_a(s) = (L_a s + R_a) I_a(s) + E_b(s) \quad (7)$$

$$T(s) = (J s + B) \Omega(s) = K I_a(s) \quad (8)$$

Şekil 3, bir DC motor sistemine ait blok şemayı göstermektedir. DC motor hızının giriş gerilimine göre transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{(L_a s + R_a)(J s + B) + K_b K} \quad (9)$$



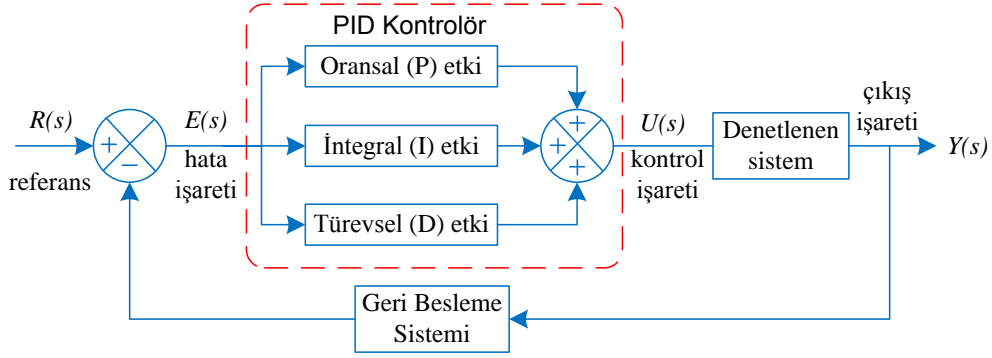
Şekil 3. DC motor eşdeğer devresi

4. KA Tekniğinin DC Motor Sistemine Uygulanması

PID kontrolörler, basitliklerinden ve kolay uygulanabilmelerinden dolayı endüstriyel kontrol sistemlerinde en yaygın kullanılan kontrolör türüdür. Aşımı azaltarak ve yerleşme süresini kısaltarak denetlenen sistemin geçici rejim cevabını iyileştirir. Ayrıca, integral alma yoluyla kalıcı hal hatalarını yok etme özelliğine sahiptir. PID kontrolör için transfer fonksiyonu şu şekilde ifade edilmiştir [19]:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (10)$$

Yukarıdaki eşitlikte K_p , K_i ve K_d sırasıyla oransal, integral ve türevsel kazançlar olarak tanımlanır. PID kontrolör kullanılarak denetlenen sisteme ilişkin blok şema Şekil 4'te gösterilmiştir [20]. PID kontrolörlerin manuel olarak ayarlanması iyi performans sağlamaz, zaman alır ve zordur. Bu makalede, PID kazançlarının ayarlanma süreci KA algoritması üzerinden gerçekleştirilmiştir.

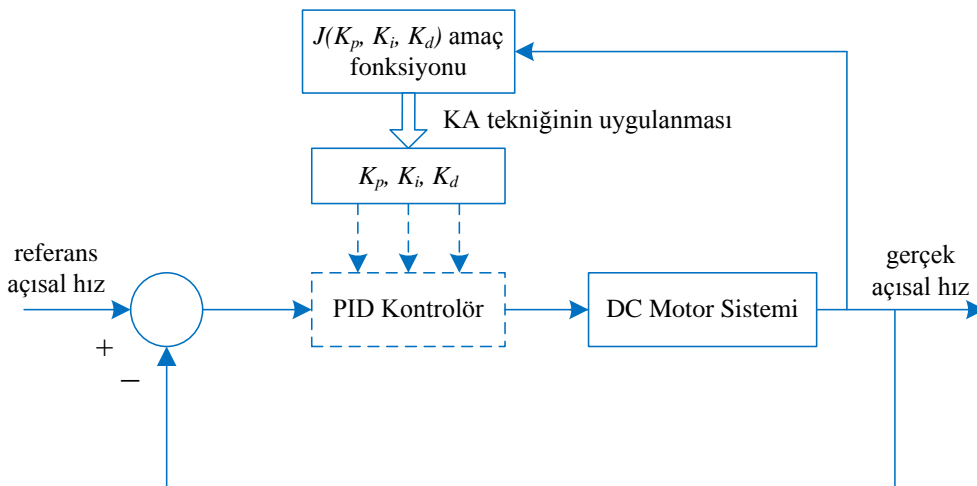


Şekil 4. PID kontrolör ile denetlenen sistem [20]

Kontrolörleri analiz etmek ve tasarlamak için literatürde farklı performans ölçütleri bulunmaktadır. En bilinenleri, mutlak hatanın integrali (*IAE*), zaman-ağırlıklı mutlak hatanın integrali (*ITAE*), karesel hatanın integrali (*ISE*) ve zaman-ağırlıklı karesel hatanın integralidir (*ITSE*). Tüm bu performans ölçütlerinin kendilerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin *IAE* ve *ISE* kullanarak küçük aşımalar elde edilebilir fakat yerleşme zamanından feragat edilmiş olur. *ITSE* ve *ITAE* gibi zaman ağırlıklı ölçütler ise daha fazla hesap süresi gerektiren daha karmaşık bir hesaplama süreci ile bu sorunu çözebilir ancak bu ölçütlerin hiçbiri gerekli olan kararlılık sınırını garanti edemez. Bu makalede, Eşitlik (11)'de verilen ve zaman cevabı kalite ölçütlerini içeren bir zaman bölgesi performans ölçütü düşünülmüştür [21].

$$J(K_p, K_i, K_d) = (1 - e^{-\beta})(M_p + E_{ss}) + e^{-\beta}(t_s - t_r) \quad (11)$$

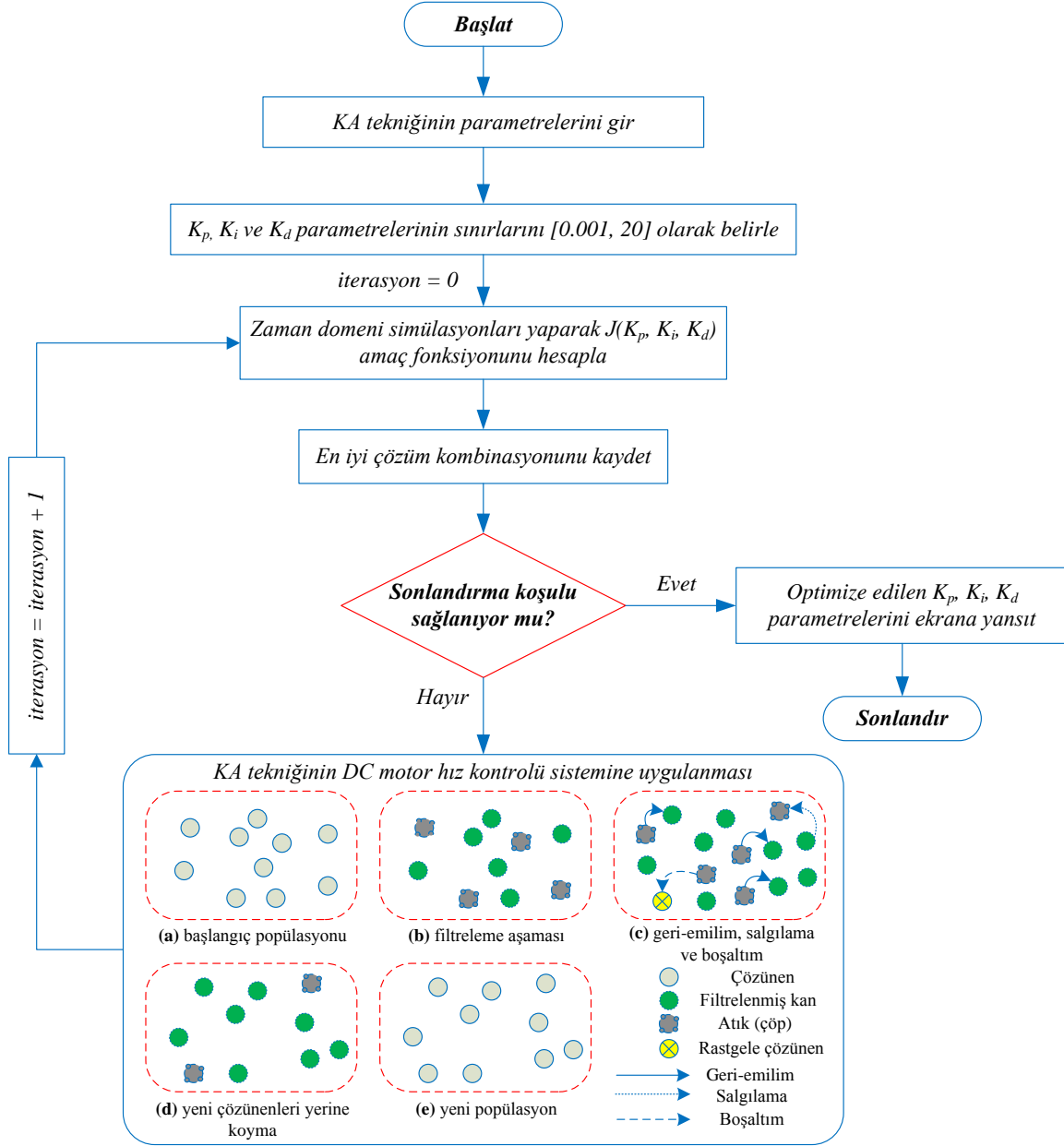
Burada, β [0,5, 1,5] aralığında bir ağırlık çarpanıdır ve bu makalede 1,0 olarak seçilmiştir [22]. Bu çalışmada, DC motor sistemi için PID kontrolörün optimal parametrelerini KA algoritması aracılığıyla belirleyen bir kendiliğinden ayarlama yöntemi önerilmiştir. Önerilen algoritmanın verimliliğini doğrulamak için kendiliğinden ayarlanan PID kontrolör tabanlı DC motor hız kontrol sistemi Şekil 5'te gösterilmiştir. Önerilen KA algoritmasına dayalı parametre ayarlama yönteminin detaylı akış şeması ise Şekil 6'da gösterilmiştir. KA algoritmasının simülasyonu için kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Tüm analizler, simülasyonlar ve KA algoritmasına ilişkin kodlamalar, Intel® i7 2,50 GHz işlemci ve 16 GB RAM özelliğine sahip kişisel bir bilgisayar üzerinden MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Önerilen PID kontrolör tabanlı DC motor hız kontrol sistemi

Tablo 1. KA tekniği için kullanılan parametreler

Parametre	Değeri
Çözünen sayısı (sürü büyüklüğü)	50
Maksimum iterasyon sayısı	30
Alt sınırlar	[0.001 0.001 0.001]
Üst sınırlar	[20 20 20]

**Şekil 6.** DC motor hız kontrolünde kullanılan KA tekniğinin akış şeması

5. Simülasyon Sonuçları ve Tartışma

Mevcut simülasyonda kullanılan DC motorun parametreleri Tablo 2’de verilmiştir [8-10]. Bu parametreler ile bulunan DC motorun açık çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

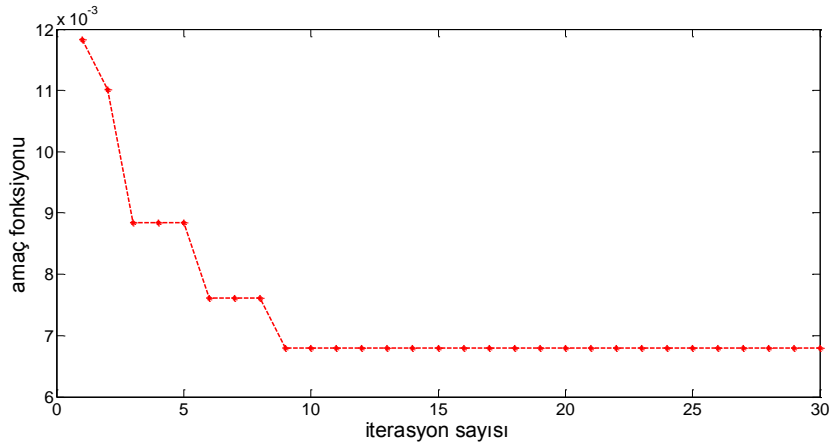
$$G(s) = \frac{0.015}{0.00108s^2 + 0.0061s + 0.00163} \quad (12)$$

Tablo 2. DC motor parametreleri

Parametre	Değeri
R_a	0.4 Ω
L_a	2.7 H
J	0.0004 kg.m ²
B	0.0022 N.m.s/rad
K	0.015 N.m/A
K_b	0.05 V.s

Tablo 1 ve Tablo 2'deki verileri kullanmak suretiyle DC motorun hız kontrolü için KA algoritması çalıştırıldığında optimizasyon süreci sonunda elde edilen PID kontrolör parametrelerinin optimal değerleri Tablo 3'deki gibi elde edilmiştir. Amaç fonksiyonun yakınsaması ve KA tarafından elde edilen amaç fonksiyonu değeri Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekilden görüleceği gibi, KA algoritması hızlı bir şekilde 9. iterasyonda yakınsama göstermektedir. KA-PID tabanlı DC motorun kapalı çevrim transfer fonksiyonu Eşitlik (13)'te verilmiştir.

$$T_{KA-PID} = \frac{0.05588s^2 + 0.2681s + 0.09728}{0.00108s^3 + 0.06198s^2 + 0.2697s + 0.09728} \quad (13)$$

**Şekil 7.** KA-PID için amaç fonksiyonunun yakınsaması ve elde edilen amaç fonksiyonu değeri

Ayrıca önerilen KA-PID kontrolörün üstünlüğünü ve etkinliğini göstermek amacıyla literatürde aynı DC motor sistem parametrelerini kullanan GWO-PID [10], IWO-PID [8] ve SFS-PID [9] kontrolörler ile geçici rejim cevabı üzerinden performans karşılaştırması yapılmıştır.

GWO algoritması, Mirjalili ve arkadaşları tarafından gri kurtların doğadaki yaşama ve avlanma davranışlarından ilham alınarak geliştirilmiştir [23]. Liderlik hiyerarşisini simüle etmek için alfa, beta, delta ve omega gibi dört gri kurt türünü kullanır. GWO algoritması, diğer sürü zekâsına sahip tekniklerden daha üstün arama ve sömürme özelliklerine sahip olduğunu gösteren standart test fonksiyonları ile test edilmiştir. Ayrıca, GWO çeşitli mühendislik optimizasyon problemlerini çözmek için başarıyla uygulanmıştır.

IWO algoritması, 2006 yılında Mehrabian ve Lucas tarafından, tarımdaki yaygın bir fenomen olan istilacı yabancı otların kolonileşmesinden esinlenilerek önerilmiştir. Algoritma, basit bir yapıya, daha az parametreye, güçlü sağlamlığa, anlaşılması ve programlanması kolay özelliklere sahiptir [24].

SFS optimizasyon algoritması ise bir büyüme sürecini taklit etmek için Salimi tarafından geliştirilmiştir [25]. İşlemdeki parçacıklar, arama alanı içinde büyümesini arttırmaya çalışır. Bu sezgisel-üstü algoritma, kısa hesaplama süresi ile ümit verici sonuçlar göstermiştir. Bu algoritmanın en büyük avantajı, daha az parametre ayarı ile arama işlemine başlamasıdır.

Yukarıda kısaca tanıtımı yapılan bu algoritmalara dayalı kontrolörlere ilişkin PID kontrolör parametreleri ise Tablo 3'te listelenmiştir. GWO, IWO ve SFS için PID kontrollü ve birim geri-beslemeli DC motorun kapalı çevrim transfer fonksiyonları aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$T_{GWO-PID} = \frac{0.01394s^2 + 0.1035s + 0.008439}{0.00108s^3 + 0.02004s^2 + 0.1051s + 0.008439} \quad (14)$$

$$T_{IWO-PID} = \frac{0.0007215s^2 + 0.02367s + 0.006558}{0.00108s^3 + 0.006822s^2 + 0.0253s + 0.006558} \quad (15)$$

$$T_{SFS-PID} = \frac{0.003592s^2 + 0.02447s + 0.004197}{0.00108s^3 + 0.009693s^2 + 0.0261s + 0.004197} \quad (16)$$

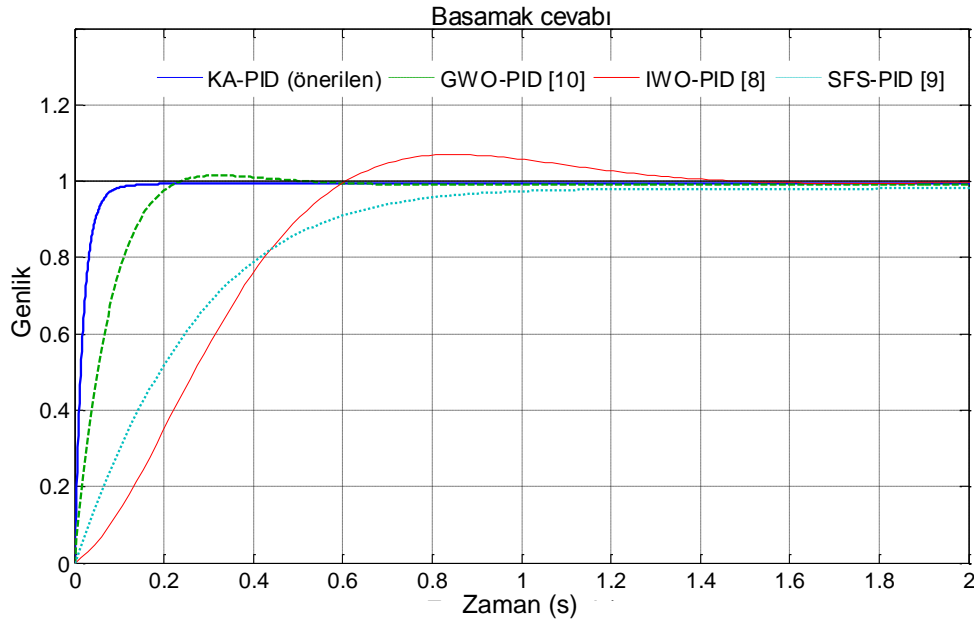
Tablo 4'te önerilen KA-PID yaklaşımının GWO-PID [10], IWO-PID [8] ve SFS-PID [9] ile geçici rejim cevabı ölçütleri açısından karşılaştırmalı analizi gösterilmiştir. En iyi değerler (en az olanlar) kalın yazı tipi ile vurgulanmıştır. (13)-(16) Eşitlikleri için basamak cevaplarının karşılaştırılması Şekil 8'de gösterilmiştir. Geçici rejim cevabı analiz sonuçlarını yansıtan Tablo 4 ve Şekil 8'den de anlaşılacağı üzere, önerilen KA-PID kontrolör, yüzdelik aşım (% M_p), ± 5 'lik tolerans bandı için yerleşme zamanı (t_s), yükselme zamanı (t_r) ve $J(K_p, K_i, K_d)$ amaç fonksiyonu değerleri bakımından diğer algoritmalarla ayarlanan kontrolörlere göre daha üstündür ve mükemmel bir performansa sahiptir.

Tablo 3. KA, GWO, IWO ve SFS ile elde edilen PID kontrolör parametreleri

Algoritma-Kontrolör	K_p	K_i	K_d
KA-PID (önerilen)	17.8728	6.4852	3.7256
GWO-PID [10]	6.8984	0.5626	0.9293
IWO-PID [8]	1.5782	0.4372	0.0481
SFS-PID [9]	1.6315	0.2798	0.2395

Tablo 4. Geçici rejim cevabı ölçütlerinin karşılaştırılması

Algoritma-Kontrolör	Aşım (%)	Yerleşme zamanı (± 5)	Yükselme zamanı (0.1→0.9)	$J(K_p, K_i, K_d)$ amaç fonksiyonu
KA-PID (önerilen)	Aşım yok	0.0629	0.0445	0.0068
GWO-PID [10]	1.5062	0.1769	0.1388	0.0236
IWO-PID [8]	6.9759	1.0500	0.4189	0.2763
SFS-PID [9]	Aşım yok	0.7517	0.5436	0.0766

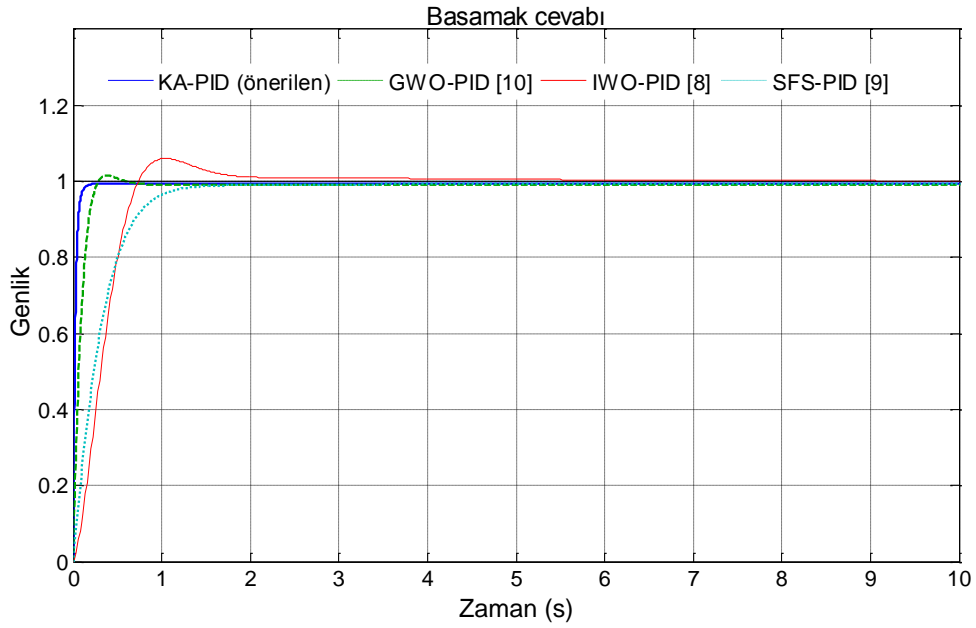


Şekil 8. DC motor hızlarının karşılaştırılması

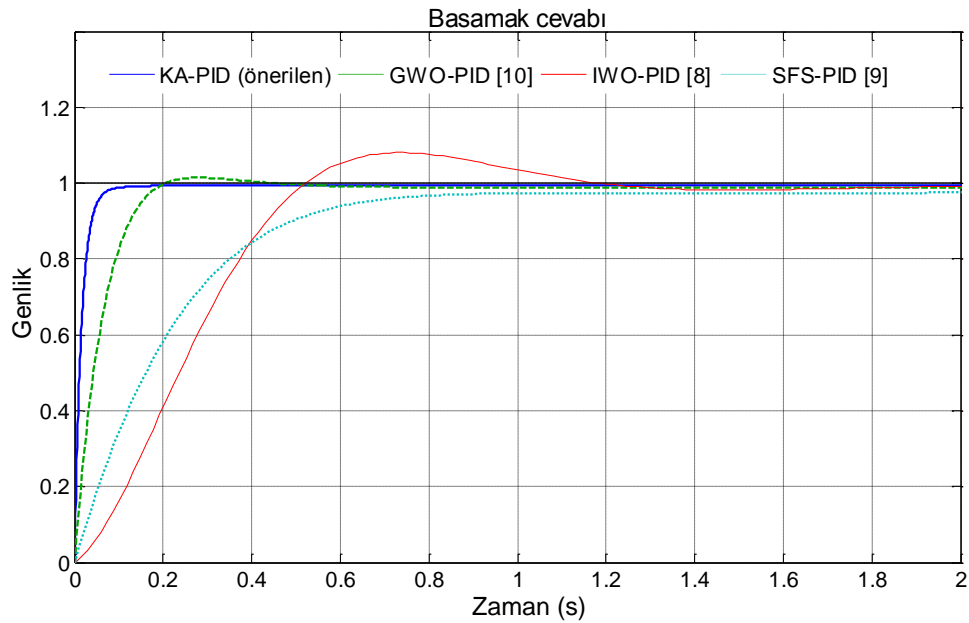
Son olarak önerilen yaklaşımın etkinliğini ve üstünlüğünü vurgulamak amacıyla Tablo 5'te verilen DC motorun elektriksel direnç (R_a) ve K parametresindeki değişimlere göre gürbzlük analizi yapılmıştır. GWO-PID [10], IWO-PID [8], SFS-PID [9] ve önerilen KA-PID kontrolörlerinin geçici rejim cevap parametreleri açısından karşılaştırmalı analizi Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca her iki senaryo için karşılaştırmalı hız cevapları ise Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Tablo ve şekillerdeki sonuçlardan görüleceği üzere önerilen KA-PID kontrolör DC motor parametrelerinin değişiminden etkilenmemiştir ve karşılaştırma için seçilen GWO-PID, IWO-PID ve SFS-PID kontrolörlere kıyasla en iyi geçici rejim cevap performansı göstermiştir.

Tablo 5. DC motor çalışma noktaları

Senaryo No	R_a	K
1	0.3	0.012
2	0.5	0.018



Şekil 9. Senaryo 1 için DC motor hızlarının karşılaştırılması



Şekil 10. Senaryo 2 için DC motor hızlarının karşılaştırılması

Tablo 6. Farklı çalışma noktaları için geçici rejim cevabı ölçütlerinin karşılaştırılması

Senaryo	Senaryo 1			Senaryo 2		
	Aşım (%)	Yerleşme zamanı (±%5)	Yükselme zamanı (0.1→0.9)	Aşım (%)	Yerleşme zamanı (±%5)	Yükselme zamanı (0.1→0.9)
KA-PID (önerilen)	Aşım yok	0.0796	0.0561	Aşım yok	0.0520	0.0369
GWO-PID [10]	1.5195	0.2138	0.1683	1.4479	0.1515	0.1185
IWO-PID [8]	6.0408	1.2422	0.5004	8.0488	0.9335	0.3643
SFS-PID [9]	Aşım yok	0.8922	0.6569	Aşım yok	0.6510	0.4649

6. Sonuç

Endüstride, ev aletlerinde ve robot teknolojisinde var olan DC motor uygulamaları için hız kontrolü büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, DC motor hız kontrolünde yeni bir yaklaşım olarak KA algoritması tabanlı PID kontrolör (KA-PID) kullanımı önerilmiştir. DC motor hız kontrol sistemi için KA algoritması çalıştırılarak PID kontrolörüne ait parametrelerin optimizasyon süreci başlatılmış ve zaman bölgesi tabanlı bir amaç fonksiyonunun değerini en az yapan optimal PID kontrolör parametreleri en az iterasyonla bulunmuştur. Önerilen KA-PID yaklaşımının literatürde mevcut diğer yaklaşımlarla (GWO-PID [10], IWO-PID [8] ve SFS-PID [9]) karşılaştırmalı analizi yürütülmüştür. DC motorun geçici rejim cevabı analiz sonuçları, önerilen KA-PID yaklaşımının diğer güncel yaklaşımlara (GWO-PID [10], IWO-PID [8] ve SFS-PID [9]) kıyasla daha az aşım, yerleşme ve yükselme zamanlarına sahip olduğunu göstermiştir. KA tarafından ayarlandıktan sonra, DC motor parametrelerindeki değişikliklere bağlı olarak PID kontrolörünün performansı üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Ahmed H., Rajoriya A. 2017. A Hybrid of Sliding Mode Control and Fuzzy Logic Control Using a Fuzzy Supervisory Switched System for DC Motor Speed Control. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 25 (3): 1993-2004.
- [2] Hekimoğlu B., Ekinçi S. 2018. Grasshopper Optimization Algorithm for Automatic Voltage Regulator System. 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), pp. 152-156, May 3-5, Istanbul, Turkey.
- [3] Ekinçi S., Demiroren A. 2015. PSO based PSS Design for Transient Stability Enhancement. IU-Journal of Electrical & Electronics Engineering, 15 (1): 1855-1862.
- [4] Ekinçi S., Hekimoğlu B. 2017. Multi-machine Power System Stabilizer Design via HPA Algorithm. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (4): 1271-1285.
- [5] El-Deen A.T., Mahmoud A.A.H., El-Sawi A.R. 2015. Optimal PID Tuning for DC Motor Speed Controller based on Genetic Algorithm. International Review of Automatic Control, 8 (1): 80-85.
- [6] Mishra A.K., Tiwari V. K., Kumar R. Verma T. 2013. Speed Control of DC Motor Using Artificial Bee Colony Optimization Technique. International Conference on Control, Automation, Robotics and Embedded Systems (CARE), pp. 1-6, Dec 16-18, Jabalpur, India.
- [7] Achanta R.K., Pamula, V.K. 2017. DC Motor Speed Control Using PID controller Tuned by Jaya Optimization Algorithm. IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), pp. 983-987, Sep 21-22, Chennai, India.
- [8] Khalilpuor M., Razmjoooy N., Hosseini H., Moallem P. 2011. Optimal Control of DC Motor Using Invasive Weed Optimization (IWO) Algorithm, Majlesi Conference on Electrical Engineering, Aug, Majlesi New Town, Isfahan, Iran.
- [9] Khanam I., Parmar G. 2017. Application of SFS Algorithm in Control of DC Motor and Comparative Analysis. 4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics (UPCON), pp. 256-261, Oct 26-28, Mathura, India.
- [10] Agarwal J., Parmar G., Gupta R., Sikander A. 2018. Analysis of Grey Wolf Optimizer based Fractional Order PID Controller in Speed Control of DC Motor. Microsystem Technologies, 24 (12): 4997-5006.

- [11] Jaddi N.S., Alvankarian J., Abdullah S. 2017. Kidney-inspired Algorithm for Optimization Problems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 42: 358-369.
- [12] Jaddi N.S., Abdullah S. 2018. Optimization of Neural Network Using Kidney-inspired Algorithm with Control of Filtration Rate and Chaotic Map for Real-world Rainfall Forecasting. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 67: 246-259.
- [13] Ekinçi S., Hekimoğlu B., Uysal E. 2019. Kidney-inspired Algorithm for Determination of PID Power System Stabilizer Parameters. *Journal of Polytechnic*, 22 (2): 453-460.
- [14] Ekinçi S., Demiroren A., Hekimoğlu B. 2019. Parameter Optimization of Power System Stabilizers via Kidney-inspired Algorithm. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41 (5): 1405-1417.
- [15] Liang Y., Niu D., Wang H., Chen H. 2017. Assessment Analysis and Forecasting for Security Early Warning of Energy Consumption Carbon Emissions in Hebei Province, China. *Energies*, 10 (3): 391. <https://doi.org/10.3390/en10030391>.
- [16] Ehteram M., Karami H., Mousavi S.F., Farzin S., Celeste A.B., Shafie A.E. 2018. Reservoir Operation by a New Evolutionary Algorithm: Kidney Algorithm. *Water Resources Management*, 32 (14): 4681-4706.
- [17] Ekinçi S., Hekimoğlu B. 2019. Improved Kidney-inspired Algorithm Approach for Tuning of PID Controller in AVR System. *IEEE Access*, 7: 39935-39947.
- [18] Ogata K. 2004. *System Dynamics*. 4th Ed., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [19] Ogata K. 2002. *Modern Control Engineering*. 4th Ed., Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ.
- [20] Ekinçi S., Hekimoğlu B., Kaya S. 2018. Tuning of PID Controller for AVR System Using Salp Swarm Algorithm. *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, pp. 424-429. Sep 28-30, Malatya, Turkey.
- [21] Gaing Z.L. 2004. A particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19 (2): 384-391.
- [22] Hekimoğlu B. 2019. Sine-cosine Algorithm Based Optimization for Automatic Voltage Regulator System. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41 (6): 1761-1771.
- [23] Mirjalili S., Mirjalili, S.M., Lewis, A. 2014. Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69: 46-61.
- [24] Mehrabian A.R., Lucas, C. 2006. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization. *Ecological Informatics*, 1 (4): 355-366.
- [25] Salimi H. 2015. Stochastic fractal search: a powerful metaheuristic algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 75: 1-18.