

BİLYE ÇEMBER SİSTEMİNİN OPTİMUM PID KONTROLÖR TASARIMINDA KLONAL SEÇİM İLKESİNE DAYALI YARA İYİLEŞTİRME ALGORİTMASININ KULLANILMASI

Mehmet ÇINAR^{1*}

¹Bitlis Eren Üniversitesi, Tatvan Meslek Yüksekokulu,13200, Bitlis

Geliş Tarihi/Received Date: 24.07.2021 Kabul Tarihi/Accepted Date: 27.12.2021 DOI: 10.54365/adyumbd.974192

ÖZET

Sistemleri kontrol etmek için belirsizlikler veya lineer olmayan etkilerle ilgili kontrol stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte geliştirilen optimizasyon algoritmaları kontrol sistemindeki belirsiz matematiksel karakteristikler veya lineersizlik yardımıyla kalıcı durum cevabını geliştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada yapay bağışıklık ilkesine dayanan klonal seçim ilkesi tabanlı geliştirilen yara iyileşme algoritması yardımıyla optimum PID kontrolör tasarlanmıştır. Örnek kontrol sistemi olarak bilye ve çember sistemi (ball and hoop system) kullanılmıştır. PID parametrelerinin geliştirilen algoritma yardımıyla ayarlanabilmesi için amaç fonksiyon olarak integral absolute error (IAE) seçilmiştir. Böylece sistem optimum çözüme hızlı bir şekilde ulaşmış ve zamandan da tasarruf edilmiştir. Elde edilen sonuçlar diğer algoritmalar ile kıyaslanarak önerilen algoritmanın üstünlükleri ispatlanmıştır. Bunu başarabilmek için Matlab GUI ortamında program yazılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Yapay bağışıklık sistemi, Klonal seçim ilkesi, Yara iyileşme algoritması, PID ayarlama, Bilye çember sistemi*

OPTIMAL TUNING OF PID CONTROLLER USING WOUND HEALING ALGORITHM BASED ON THE CLONAL SELECTION PRINCIPLE

ABSTRACT

Control strategies for uncertainties or non-linear effects need to be developed to control systems. Optimization algorithms developed with the rapid development of computer technology are frequently used to improve the steady-state response with the help of ambiguous mathematical characteristics or nonlinearity in the control system. In this study, the optimum PID controller was designed using the wound healing algorithm based on the clonal selection principle. The proposed algorithm is applied to self-tuning of proportional-integral-derivative-(PID) controller in the ball and hoop system which represents a system of complex industrial processes. In order to adjust the PID parameters with the aid of the developed algorithm, integral absolute error (IAE) has been chosen as the objective function. Thus, the system reached the optimum solution quickly and time was saved. The advantages of the proposed algorithm have been proved by comparing the obtained results with other algorithms. In order to achieve this, a program was written in the Matlab GUI environment.

Keywords: *Artificial immune system, Clonal selection principle, Wound healing algorithm, Tuning of PID, Ball and hoop system*

* e-posta: mcinar@beu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1542-9120>

1. Giriş

Otomatik kontrol, mühendislik ve bilimin ilerlemesinde önemli bir role sahiptir. Özellikle uzay teknolojisindeki gelişmelerin yanında robotik sistemler, modern üretim ve endüstriyel süreçlerde otomatik kontrol, sürecin önemli ve vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiştir. Örneğin, havacılık endüstrisinde kullanılan oto pilot sisteminin tasarımında, sürücüsüz otomobil kontrolünde, imalat endüstrisinde takım tezgahlarının sayısal kontrolünde otomatik kontrol çok önemlidir. Otomatik kontrol teorisi ve pratiğindeki gelişmeler, dinamik sistemlerin optimum performansına ulaşma ve üretkenliği artırma araçları sağlar. Kontrol edilen değişken, ölçülen ve kontrol edilen nicelikler veya durumlar, otomatik kontrol sistemindeki kontrolör tarafından belirlenir. Aslında kontrolörün temel görevi, sistemin kontrol edilen değişken değerini ölçmek ve ölçülen değeri daha önce belirtilen ya da amaçlanan değer ile kıyaslayıp, sapmasını düzeltmek veya sınırlandırmaktır [1]. Kontrolör tasarımı literatürde sıklıkla karşılaşılan bir konudur ve bu konuda pek çok bilimsel çalışma vardır. Özellikle orantılı-integral-türev (PID) kontrolörlerin tasarımı üzerine literatürde çok sayıda çalışma vardır [2,3].

PID kontrolöre ait parametrelerin ayarlanmasına ilişkin maksimum yüzde aşım, yerleşme zamanı, yükselme zamanı, ortalama karesel hata gibi birim basamak cevabı performans ölçütlerini dikkate alan birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları optimizasyon işleminde bu ölçütlerden sadece birini dikkate alırken, bazıları da bahsedilen ölçütlerden bir kaçını birlikte göz önünde bulundurur. Bu yöntemlerin çoğu önceden belirlenmiş kriterlere bağlı olarak sistem için en iyi olan PID parametrelerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Literatürde, PID kontrolör parametreleri iyileştirme yöntemi olarak Ziegler-Nichols ve CHR (Chien-Hrones- Reswick) kuralları sıklıkla kullanılmıştır [4]. Ancak bu yöntemler daha çok temel PID kontrol yapıları için önerilmiş olup, doğrusal olmayan kontrolör yapıları için optimal çözümler sunmamaktadır. PID kontrolör parametrelerini ayarlama işlemi bir optimizasyon problemi olarak kabul edilir.

Optimizasyon algoritmalarının yanı sıra, bilgisayar ve yazılım teknolojisindeki gelişmeler ile kontrolör parametreleri hızlı ve başarılı bir şekilde belirlenebilmektedir. Bilindiği gibi optimizasyon gerçek bir işlevi minimize veya maksimize etmek için fonksiyona değerler yerleştirerek gerçekleştirilen sistematik bir problem çözme sürecidir. Kontrol sistemlerindeki hata, sistemin gerçek ve istenen değeri arasındaki fark olarak ifade edilir. İdeal bir sistemde, hata sıfır olarak kabul edilir. Fakat pratikte bu mümkün değildir. Hatayı en aza indirmek, kontrol sisteminin optimum performansta çalışmasını sağlayacaktır. Optimizasyon tekniği aynı zamanda hata minimizasyonu içinde kullanılmaktadır. Kontrolör, minimum hatayı elde etmek için kontrolör parametrelerine göre tasarlanır. Hesaplama tekniğindeki ilerlemeye paralel olarak bilim ve mühendislik alanındaki uygulamalar hızla artmaktadır. Referans [5]'te, araştırmacılar kök-yer eğrisi ve Bode yaklaşımını kullanarak sürekli zamanlı bir kontrolör tasarlamak için MATLAB tarafından uygulanan bir grafik kullanıcı arayüzü geliştirmişlerdir.

Son yıllarda karmaşık süreçleri tanımlamak ve / veya kontrol etmek için yapay zeka teknikleri sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolör parametrelerinin ayarlanması, kontrol teorisindeki en karmaşık problemlerden birisidir. Karmaşık problemlerin üstesinden gelebilmek için geliştirilen yapay zeka tabanlı yöntemlerden birisi de bağışıklık sistemini hesapsal olarak taklit eden algoritmalarıdır. Bu çalışmada, doğrusal olmayan bir sistemi düzenlemek için klasik PID denetleyicisinin üç terimini optimum şekilde ayarlamak için klonal seçim ilkesi tabanlı geliştirilen yara iyileşme algoritmasından bahsedilmiştir. Çalışma içerisindeki bölümler şu şekilde düzenlenmiştir:

2. Bölümde yapay bağışıklık sistemleri hakkında genel bilgi verilmiş ve klonal seçim ilkesinden bahsedilmiştir. 3. Bölümde klonal seçim ilkesi tabanlı geliştirilen yara iyileşme algoritmasından bahsedilmiştir. 4. Bölümde önerilen yöntem yardımıyla optimum PID kontrolör parametreleri bilye ve çember sistemi kullanılarak elde edilmiştir. 5. Bölümde sonuç kısmından bahsedilmiştir.

2. Yapay bağışıklık sistemleri

Canlılarda bulunan bağışıklık sistemi vücudun hastalıklara karşı savunma mekanizmasını oluşturan, dışarıdan gelen saldırılara karşı koruyan karmaşık bir sistemdir. En az beyin kadar karmaşık bir yapıya sahip olan bu sistemin sahip olduğu yetenekler ile özellikle matematikçiler, bilgisayarlılar ve diğer bilim alanlarından araştırmacılar ilgilenmektedir. Özellikle son yıllarda bilgisayar bilimindeki hızlı gelişmeler neticesinde özellikle optimizasyon algoritmaları konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Optimizasyon problemleri, karar değişkenlerinin sürekli veya kesikli olmalarına göre ikiye ayrılır. Son otuz yıllık periyotta mühendislik, bilgisayar, yönetim bilimi gibi birçok farklı alanda bu tip problemler ortaya çıkmıştır. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için geliştirilen algoritmalarından birisi de, yapay bağışıklık sistemini hesapsal olarak taklit eden algoritmalarıdır. Bu algoritmalar canlılarda bulunan savunma mekanizması araştırılarak oluşturulmuştur ve birçok alanda araştırma konusu olmuştur [6].

Yapay bağışıklık sistemleri, canlılardaki biyolojik bağışıklık sistemlerinin sınıflandırma ve öğrenme davranışlarının bölümlerini hesapsal olarak taklit ederek bir yapay zeka algoritmaları sınıfı oluşturur. Optimizasyon problemlerinde sıklıkla kullanılan bu algoritmalar makine öğrenmesi, örüntü tanıma, anormal durum tespiti, kontrolör tasarımı gibi konularda sıklıkla kullanılmaktadır. Çizelge 1'de yapay bağışıklık sistemine dayalı olarak geliştirilen temel 4 algoritma ve uygulama alanları verilmiştir.

Çizelge 1. Yapay bağışıklık algoritmaları ve uygulama alanları

Yapay bağışıklık Algoritmaları	Uygulama alanları
Negatif seçim algoritması	Değişim analizleri
Yapay bağışıklık ağı algoritması	Öğrenme ve öğretme
Klonal seçim algoritması	Arama ve optimizasyon
Antikor ağ modeli	Savunma stratejileri

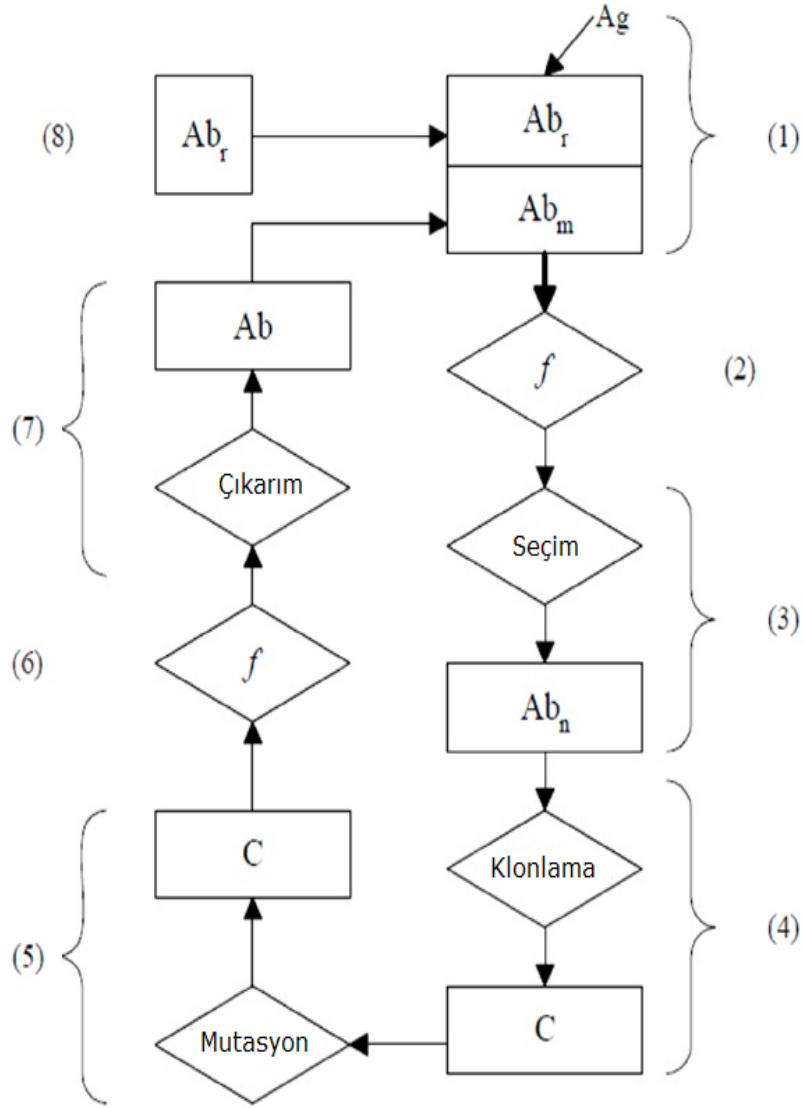
Bu çalışmada klonal seçim algoritması tabanlı geliştirilen yara iyileşme algoritması yardımıyla PID kontrolör parametrelerinin optimum ayarı gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

2.1. Klonal seçim algoritması

Klonal seçim algoritması, doğal bağışıklık sisteminden faydalanarak vücuda dışarıdan bir yabancı madde girdiğinde bağışıklık sisteminin verdiği cevabın temel özelliklerini kullanan bir algoritmadır. Bu cevaba göre sadece antijenleri tanıyan hücreler çoğalmaktadır. Seçilen hücreler benzerlik prensibi yardımıyla olgunlaşma işlemine tabi tutulur. Böylece seçilmiş hücrelerin antijene benzerliği geliştirilir. Bağışıklık sisteminde algoritmanın ilgilendiği temel olaylar aşağıdaki gibidir [7]:

- Bellek hücrelerinin saklanması
- Antijen tarafından en fazla uyarılmış bireyin seçimi ve klonlama işlemine tabi tutulması
- Antijen tarafından uyarılmamış hücrelerin ölümü
- Benzerliğin artırılması için hücrelerin mutasyona uğratılması ve tekrar seçimi
- Farklılaşmanın üretilmesi ve farklı hücrelerin popülasyona katılması
- Hücre benzerliği ile orantılı olarak hipermutasyon işleminin uygulanması

Klonal seçim algoritmasının işlem adımları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Klonal seçim algoritması işlem adımları

1. Rastgele üretilmiş B hücreleri (Ab_r) ve hafıza hücrelerinin (Ab_m) birleşerek, çözüm popülasyonu (Ab) oluşturulur.
2. Popülasyonun antijenle (Ag) uyarılma seviyesi hesaplanır. Uyarılma seviyesi probleme uygunluk fonksiyonundan geçirilerek eşik değeri hesaplanır.
3. En çok uyarılan hücreler seçilir.
4. Bu hücreler klonlanmaya tabi tutulur.

$$N_c = \sum_{i=1}^n \text{round} \left(\frac{N}{i} \right) \quad (1)$$

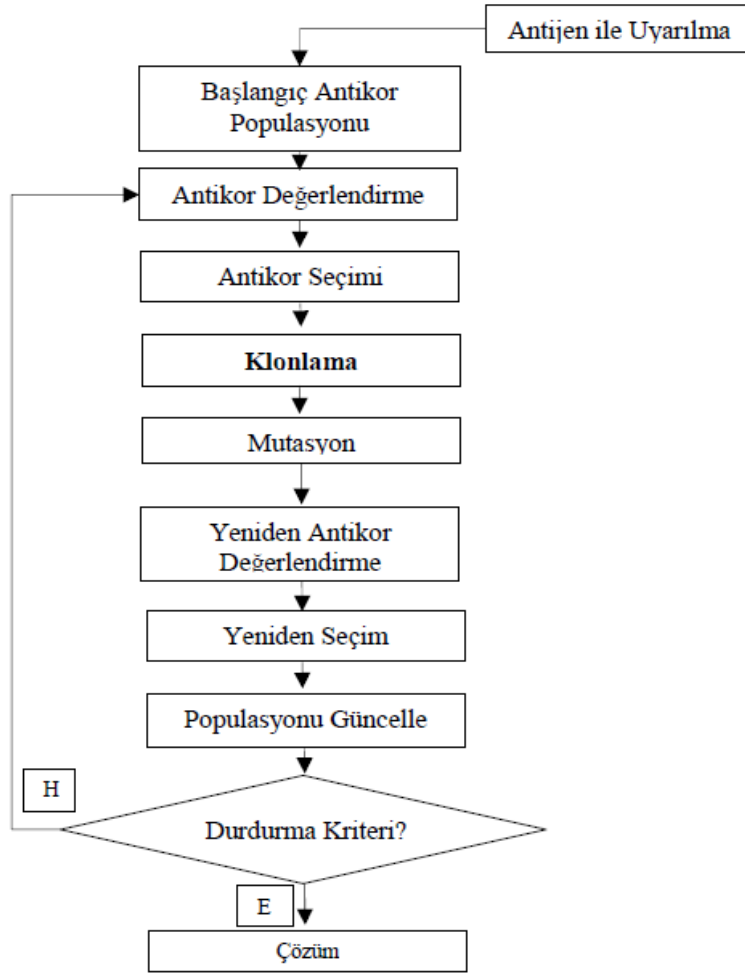
N_c : Her bir Ag 'den üretilen klon sayısı

N : Toplam Ab sayısı

n : Seçilen antikor sayısı

5. Klonlanan hücreler mutasyona tabi tutulur.
6. Mutasyona uğrayan hücreler problemin uygunluğuna göre çözüm ağına katılır.
7. Uygunluk fonksiyonundan geçmeyen hücreler popülasyondan atılır.

Şekil 2' de klonal seçim algoritmasının akış şeması gösterilmiştir.



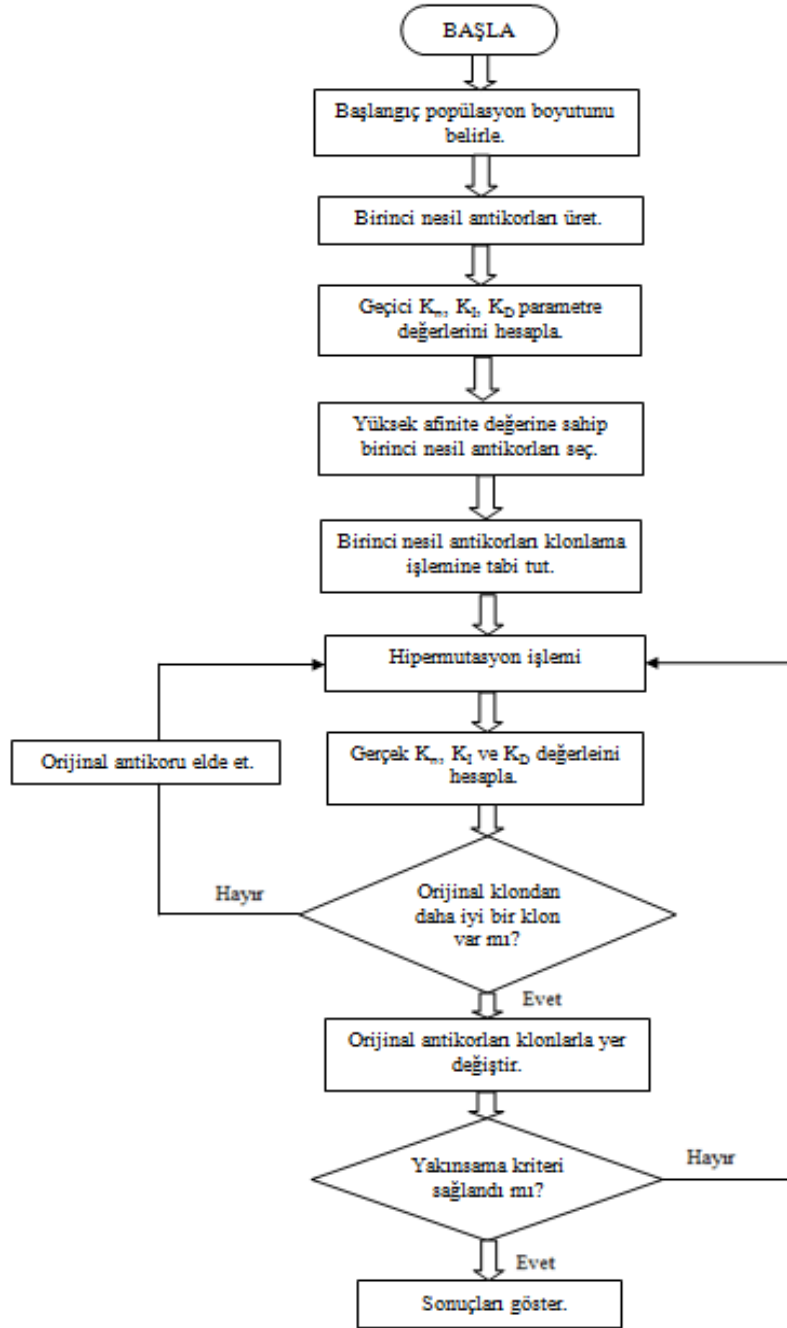
Şekil 2: Klonal seçim algoritmasının akış şeması.

Klonal seçim algoritması bir parametre yönetimi değildir, bu nedenden ötürü de genetik algorithmadan ayrılır. Yakınlık oranının yenilenmesi ve yakınlık olgunlaştırılması klonal seçim algoritmasının iki farklı özeliğidir.

3. Geliştirilen Algoritma (Yara İyileşme Algoritması)

Yara iyileşme algoritmasının temel yapısında klonal seçim ilkesi yatar. Klonal seçim algoritmasında üretilen klon sayısı Denklem 1’de görülmektedir. Geliştirilen yara iyileşme algoritmasında Denklem 1’ e α (klonlama faktörü) ve f (Klonlama işlemini hızlandırma faktörü) parametreleri eklenmiştir. Böylece elde edilen Denklem 4’ de görülmektedir. Eklenen bu yeni parametreler daha iyi sonuç elde edilmesini sağlamıştır. Geliştirilen algoritmanın akış şeması Şekil 3’de verilmiştir. İlk olarak başlangıç popülasyonu P üretilir. Sonra seçim işlemi yeni bir P_n popülasyonu oluşturmak için n adet en iyi afinite özelliğine sahip antikorları seçer. Afinite, antikor ile antijenin birbirine bağlanmasına neden olan çekim başka bir ifadeyle bağışıklık yanıtı demektir. Seçim işlemindeki temel kural antikorların afinite değeridir. Oluşturulan bu popülasyondaki bireyler yeni bir popülasyon oluşturabilmek için klonlama işlemi yardımıyla klonlanır. Klon sayıları antikorların afinite değerine bağlıdır. Daha sonra hipermutasyon işlemi yardımıyla yeni bir popülasyon oluşturmak için klonlar mutasyon işlemine tabi tutulur. Mutasyon işlemindeki temel kural; yüksek afinite değerine sahip antikorlar daha düşük mutasyon oranına sahiptir ya da tersi düşünülürse; düşük afinite değerine sahip klonlar daha yüksek mutasyon oranına sahiptir. Bunun nedeni; lokal optimum değerine yakın antikorlar çözüm değerine daha yakındır; fakat optimum çözümden uzak olan antikorlar; optimum

veya en iyi çözüme doğru hareket edebilmesi için fazla miktarda mutasyona uğrarlar. Tekrar seçim işlemi en iyi klonların ailelerinden iyi olup olmadığını kontrol eder. En sonunda; düşük benzerlikteki antikorlar, yeni antikorlarla yer değiştirilir. Seçim işlemi, klonlama ve mutasyon işlemi popülasyonu en iyi çözüme doğru hareket ettirir.



Şekil 3: Yara iyileşme algoritması akış şeması.

3.1. Yara iyileşme algoritması çözüm aşamaları:

1. N adet antikorla başlangıç popülasyonunu (P) üret.
2. P popülasyonundaki her bir antikor için afinite belirle. En iyi afinite değerine sahip n adet antikor (N_s) seç ve P_n popülasyonunu oluştur.

Antikor ve antijen arasındaki afinite değerini ölçmek için genellikle aralarındaki uzaklığa bakılır. Öklit mesafe formülü ile Denklem (2) yardımıyla hesaplanır:

$$d = \sum_{i=1}^N (Ag_i - Ab_i)^2 \quad (2)$$

Hesaplanan d eşik değer λ ile karşılaştırılır ve E işaretleme hatası aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E = d - \lambda \quad (3)$$

Eğer $E < 0$ ise antikor antijeni tanımamaktadır ve aralarında bir afinite yoktur. E değeri 0 ile 1 arasında ise aralarında bir afinite vardır denir.

3. 2. aşamada seçilen n adet antikoru klonla ve geçici klon popülasyonu N_c ' yi oluştur. N_c ' yi oluşturmak için Denklem (4) kullanılır.

$$Nc_i = \sum_{i=1}^n \text{round} \left(\frac{\alpha * N_s * f}{i} \right) \quad (4)$$

α : Klonlama faktörü (değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir)

f : Klonlama işlemini hızlandırma faktörü (değeri 0.9 ile 0.99 arasında değişmektedir.)

N_s : 2. Adımda seçilen en iyi antikor sayısı

4. N_c klon popülasyonunu hipermutasyon işlemine tabi tutun. N_c^* alt popülasyonunu oluşturun. Hipermutasyon işlemi antikoların afinite değeriyle orantılıdır [8].
5. N_c^* alt popülasyonuna ait her bir antikorum afinite değerini hesapla ve içinden en iyi değere sahip antikoları seçerek $N_{c(n)}^*$ oluştur ve başlangıç popülasyonuna ekle.
6. Düşük afinite değerine sahip antikoları yeni antikolarla yer değiştir.
7. Eğer P popülasyonunun değeri N 'den küçükse popülasyonu tamamlamak için antikoları üret.
8. Yakınsama testini yap. Test başarılı ise programı durdur. Yoksa işlemlere devam et.

4. Optimum PID kontrolör tasarımı

Sistemlerin istenilen özelliklerde çalışmasını sağlayan kontrolör / denetleyici devrelerinin analizi ve tasarımı, kontrol teorisinin başlıca alanlarındanıdır. Bu alanda, farklı yapı ve karakteristiklerde kontrolörler geliştirilmiştir. Bunlardan birisi de PID kontrolördür. PID kontrolörler, sağlam ve etkili performans göstermeleri nedeni ile endüstriyel ortamlarda sıkça tercih edilen denetleyicilerdir [9]. PID kontrolörü meydana getiren oransal (P), integral (I), türev (D) kazanç ağırlık parametrelerinden her biri sistemin çalışması esnasında farklı türlerde etki etmektedirler. PID kontrolörün sürekli durum yapısı aşağıdaki gibidir:

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) + T_d \frac{d}{dt} e(t)] \quad (5)$$

Denklem (5)'de $e(t)$ kontrolörün girişi, $u(t)$ çıkışı, K_p oransal kazanç, T_i integral zaman sabiti, T_d türev zaman sabitidir. Denklem (5) Laplace dönüşümü yardımıyla aşağıdaki gibi yazılır:

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s) \quad (6)$$

Denklem (6) da K_i : İntegral kazancı K_d : Türev kazancıdır [10].

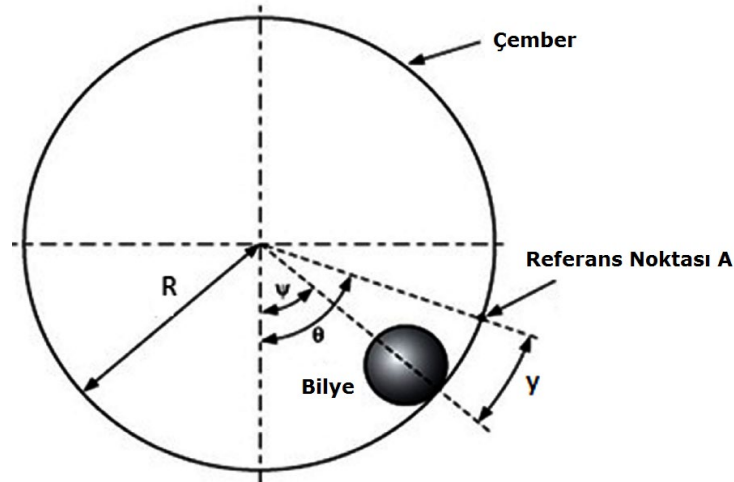
PID kontrol parametrelerinin sistem cevabına etkileri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. PID kontrolör parametrelerinin sistem cevabına etkileri

	K_p(Oransal)	K_i (İntegral)	K_d (Türevsel)
Yükselme zamanı	Azalır	Azalır (Az)	Az etki
Aşım değeri	Artar	Artar	Azalır
Yerleşme zamanı	Artar(az)	Artar	Azalır
Kararlı hal hatası	Azalır	Azalır (çok)	Az etki

4.1. Simulasyon Sonuçları

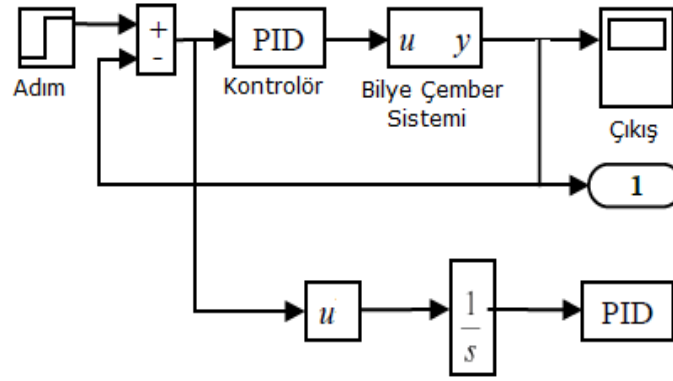
4.1.1. Bilye ve Çember Sistemi:



Şekil 4. Bilye ve çember sistemi [11].

Bilye ve çember sistemindeki anahtar değişkenler: Bilyenin ağırlığı (m), çember açısı (θ), çember yarıçapı (R) ve bilyenin çemberdeki pozisyonu (y) dir. Bilye ve çember sisteminin transfer fonksiyonu denklem (7)’de verilmiştir [12].

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{s^4 + 6s^3 + 11s^2 + 6s} \quad (7)$$



Şekil 5. IAE kontrolör simülasyonu

Optimum PID parametrelerini belirlemek için kullanılan amaç fonksiyon denklem 8’te verilmiştir.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (8)$$

Yara iyileşme algoritması yardımıyla çember ve bilye sisteminin optimum PID parametrelerini hesaplamak için geliştirilen programın ekran görüntüsü aşağıdaki gibidir.

Hazırlayan: Mehmet ÇINAR Versiyon:1.0

IEEE TEST SİSTEMİ

PID

Tek Hat Şeması

Sistem Verileri

SEÇENEKLER

Hedeflenen Fonksiyon **Kp, Ki, Kd**

Algoritma **YARA_IYILEŞME**

PROGRAMI ÇALIŞTIR

VERİLERİ SIFIRLA

PROGRAMDAN ÇIKIŞ

YARA İYİLEŞME PARAMETRELERİ

Varsayılan: veya özel değerler

Popülasyon sayısı, P:

İterasyon sayısı

Çalışma sayısı, Itç:

İyileşme katsayısı, d1:

Afinite katsayısı:

Klon Katsayısı:

Klon hızlandırma, f:

TAMAM

Bilye ve çember sistemi için PID parametreleri

Kp:4.8625

Ki:0.0012

Kd:5.6524

Şekil 6. Geliştirilen program

Çizelge 3’de yara iyileşme algoritmasında sistemin analizi için seçilen parametreler ve değerleri verilmiştir. Parametreler seçilirken algoritma 30 defa çalıştırılarak en optimum değerler elde edilmiştir. Çünkü önerilen algoritma stokastik bir algoritma olduğu için başlangıç değerleri rastgele atanmaktadır.

Çizelge 3. Yara iyileşme algoritması parametreleri ve değerleri

Parametreler	Değerler
Popülasyon sayısı	150
İterasyon sayısı	150
Çalışma sayısı	1
İyileşme katsayısı	1.3
Afinite katsayısı	1.3
Klon katsayısı	0.4
Klon hızlandırma	0.95

Yara iyileşme algoritması sonucu elde edilen PID kontrolör parametreleri aşağıdaki gibidir:

$$K_P= 4.8625, K_I= 0.0012, K_D=5.6524$$

Elde edilen bu parametreler yardımıyla bilye ve çember sisteminin kapalı çevirm transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G(s)= \frac{5.6524s^2 + 4.8625s + 0.0012}{s^5 + 6s^4 + 11s^3 + 11.6524s^2 + 4.8625s + 0.0012} \quad (9)$$

Çizelge 4’de literatürde aynı bilye ve çember sistemi için kullanılan farklı algoritmaların K_p , K_I ve K_D değerleri görülmektedir.

Çizelge 4. Bilye ve çember sistemi için farklı algoritmalar kullanılarak elde edilen PID kontrolör parametreleri

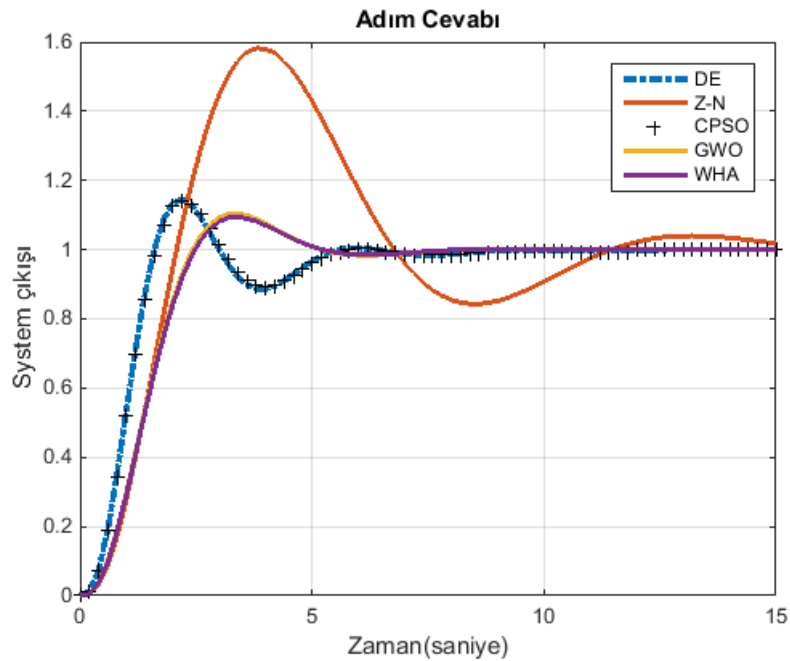
Algoritma	IAE		
	K_p	K_I	K_D
DE[13]	5.856	0.0043	11.835
SOMA[13]	5.856	0.0043	11.835
Z-N [14]	6	1.9078	4.7178
CPSO[14]	5.8653	0.0001	11.4188
GWO[15]	4.9900	0.0010	5.7056
WHA(Önerilen)	4.8625	0.0012	5.6524

DE: Differential Evolution algorithm
 SOMA: Self-Organizing Migrating Algorithm
 Z-N: Ziegler-Nichols
 CPSO: Chaotic particle swarm optimization
 GWO: Grey Wolf Optimization
 WHA: Wound Healing Algorithm

Çizelge 5. Farklı algoritmaların bilye ve çember sistemi için kapalı çevrim transfer fonksiyonu

Algoritma	Kapalı çevrim transfer fonksiyonu	Kullanılan amaç fonksiyon
DE[13]	$\frac{11.835s^2 + 5.856s + 0.0043}{s^5 + 6s^4 + 11s^3 + 17.835s^2 + 5.856s + 0.0043}$	IAE
Z-N[14]	$\frac{4.7178s^2 + 6s + 1.9078}{s^5 + 6s^4 + 11s^3 + 10.7178s^2 + 6s + 1.9078}$	IAE
CPSO[14]	$\frac{11.4188s^2 + 5.8653s + 0.0001}{s^5 + 6s^4 + 11s^3 + 17.4188s^2 + 5.8653s + 0.0001}$	IAE
GWO[15]	$\frac{5.7056s^2 + 4.9900s + 0.0010}{s^5 + 6s^4 + 11s^3 + 11.7056s^2 + 4.9900s + 0.0010}$	IAE
WHA (önerilen)	$\frac{5.6524s^2 + 4.8625s + 0.0012}{s^5 + 6s^4 + 11s^3 + 11.6524s^2 + 4.8625s + 0.0012}$	IAE

Çizelge 5'te verilen transfer fonksiyonlarının adım cevap eğrileri şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Transfer fonksiyonlarının adım cevapları

Çizelge 6’te algoritmalar sonucu elde edilen yerleşme zamanı, yüzde aşım değeri ve yükselme zamanı değerleri görülmektedir.

Çizelge 6. Algoritmalara göre hesaplanan değerlerin karşılaştırılması

Algoritma	Yerleşme zamanı (sn)	Yüzde aşım değeri (%)	Yükselme zamanı (sn)
DE[13]	5.19	14.5	0.985
SOMA[13]	5.19	14.5	0.985
Z-N[14]	10.6	58.4	1.3
CPSO[14]	4.88	14.6	1.01
Standart PSO [16]	7.2	25	1.12
GWO[15]	4.8	10.4	1.52
WHA(önerilen)	4.69	9.43	1.55

5. Sonuçlar

Analitik yollarla çözümü zor ve işlem karmaşası fazla olan fonksiyonların çözümü için kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi optimizasyon algoritmalarıdır. Kontrol sistemleri için kontrolör tasarımı için birçok analitik yöntem bulunmasına karşın, bu yöntemler çok sayıda işlem basamağına sahiptir ve zaman zaman ileri derece matematiksel işlemler gerektirmektedirler. Bu durumda kontrolör tasarımı için optimizasyon algoritması kullanılması, tasarım aşamasında sürecin kısaltılması ve yapılabilecek işlem hatalarından kaçınılması açısından oldukça yararlı olmaktadır. Bununla birlikte istenen hassasiyetle parametreler belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada yara iyileşme algoritması yardımıyla PID kontrolör tasarımı için Matlab GUI ortamında program geliştirilmiştir. Bunun için Matlab programının yüksek matematiksel hesaplama kabiliyetinden yararlanılarak, GUI ortamında kullanımı kolay bir arayüz tasarlanmıştır. Böylece hızlı ve kolay bir tasarım süreci geçirilmiş, PID kontrolör katsayılarının yara iyileşme algoritması ile optimize edilebildiği ve sonuçların grafiksel olarak sunulabildiği bir uygulama geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar diğer optimizasyon algoritmaları ile kıyaslanmıştır. PID kontrolörü optimize etmek için amaç fonksiyon olarak integral absolute error kullanılmıştır. Maksimum aşma süresi ve yerleşme süresinde diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar Çizelge 6’da gösterilmiştir. Hesaplanan maksimum aşma süresi; değere en yakın olan GWO algoritmasına göre % 10.57 daha düşük bir aşma değerine sahiptir. Hesaplanan yerleşme süresi; değere en yakın GWO algoritmasına göre %2.29 daha düşüktür. Böylece bilye ve çember sistemi için yara iyileşme algoritması yardımıyla optimize edilen PID kontrolör, daha hızlı yerleşme zamanına sahip ve daha az bir aşımaya sahip olacak; sistem hızlı ve kararlı bir şekilde stabil olacaktır.

Kaynaklar

- [1] Brogan WL. Modern Control Theory. Upper saddle river, NJ: Prentice Hall,1985.
- [2] Tan N. Computation of stabilizing PI and PID controllers for processes with time delay. ISA Transactions 2005; 44(2): 213–223.
- [3] Barbosa RS, Machado JAT, Ferreira IM. Tuning of PID controllers based on Bode’s ideal transfer function. Nonlinear Dynamics 2004; 38(1): 305–321.
- [4] Aström K, Höglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. New York, Instrument Society of America, 1995.
- [5] Cao M, Watkins JM, O’Brien RT. A graphical user interface for a unified approach for continuous time compensators design. Computers in Education 2009; 19(1): 49-59.
- [6] Alataş B, Akın E. Yapay Zekada Yeni Bir Alan: Yapay Bağışıklık Sistemleri, YA-EM’2004 Kongresi, 2004, Adana, Haziran, 464-466.
- [7] Kaymaz ED. Yapay Bağışıklık Sistemi Tabanlı K-NN Sınıflandırma Algoritması İle Protein Örüntülerinin Hücredeki Yerleşim Yerlerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007, Elazığ.

- [8] Souza SSF, Romero R, Franco JF. Artificial immune networks Copt-aiNet and Opt-aiNet applied to the reconfiguration problem of radial electrical distribution systems. *Electric Power Systems Research* 2015; 119: 304-312.
- [9] Farkh R, Laabidi K, Ksouri M. Stabilizing Sets of PI / PID Controllers for Unstable Second Order Delay System. *International Journal of Automation and Computing* 2014; 11(2): 210-222.
- [10] Xue D, Chen Y, Atherton DP. *Linear feedback control: analysis and design with MATLAB*, Siam, 2007.
- [11] Sreekanth P, Hari A. Genetic algorithm based self tuning regulator for ball and hoop system. *IEEE Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS)*, 2016, Namakkal, India, 4-5 March.
- [12] Kaliappan VK, Thatthan M. Enhanced ABC Based PID Controller for Nonlinear Control System. *Indian Journal of Science and Technology* 2015; 8(7): 48-56.
- [13] Davendra D, Zelinka I, Senkerik R. Chaos driven evolutionary algorithms for the task of PID Control. *Computers & Mathematics with Applications* 2010; 60(4): 1088–1104.
- [14] Mojallali H, Gholipour R, Khosravi A, Babae, H. Application of chaotic particle swarm optimization to PID parameter tuning in ball and hoop system. *International Journal of Computer and Electrical Engineering* 2012; 4(4): 452– 457.
- [15] Jain N, Parmar G, Gupta R, Khanam I. Performance evaluation of GWO/PID approach in control of ball hoop system with different objective functions and perturbation. *Cogent Engineering* 2018; 5(1): 1-18.
- [16] Morkos S, Kamal, H. Optimal tuning of PID controller using adaptive hybrid particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Computers, Communications & Control* 2012; 7(1): 101–114.