

TERS SARKAÇ SİSTEMİNİN AÇISAL DENGELEMESİ İÇİN GA VE PSO TABANLI PID KONTROLÜ

¹Berivan Koç and ²Handan Gürsoy-Demir

¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi, Türkiye

² Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İskenderun Teknik Üniversitesi, Türkiye

Abstract

In this study, in addition to the classical Proportional-Integral-Derivative (PID) controller used for the angle control of the inverted pendulum system in the equilibrium position, it is aimed to improve the PID controller parameters with optimization techniques inspired by nature such as Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO). By means of these algorithms, the gain parameters of the PID controller are optimized based on certain performance criteria. In order to evaluate the system performance, a hybrid fitness function is defined by using the Integral of Squared Error (ISE) and Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) criteria, which take into account the error magnitude and the time response of the system. As a result of the simulation studies, it is observed that GA and PSO based controllers increase the system performance compared to the classical PID controller and provide the pendulum to come to equilibrium faster and more stably. The obtained results show that the nature-inspired algorithms provide an effective and efficient approach in the control of nonlinear and complex systems

Key words: inverted pendulum, PID, optimization, PSO,GA

Özet

Bu çalışmada, ters sarkaç sisteminin denge konumundaki açı kontrolü amacıyla kullanılan klasik Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrolörüne ek olarak, Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) gibi doğadan esinlenen optimizasyon teknikleriyle PID denetleyici parametrelerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu algoritmalar aracılığıyla PID kontrolörünün kazanç parametreleri, belirli performans kriterleri esas alınarak optimize edilmiştir. Sistem performansını değerlendirmek amacıyla, hata büyüklüğünü ve sistemin zaman tepkisini dikkate alan Kare Hata İntegrali (ISE – Integral of Squared Error) ve Zaman Ağırlıklı Mutlak Hata İntegrali (ITAE – Integral of Time-weighted Absolute Error) kriterleri birlikte kullanılarak hibrit bir uygunluk fonksiyonu tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonucunda, GA ve PSO tabanlı denetleyicilerin, klasik PID denetleyicisine kıyasla sistem performansını artırdığı ve sarkacın daha hızlı ve kararlı şekilde dengeye gelmesini sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, doğadan esinlenen algoritmaların doğrusal olmayan ve karmaşık sistemlerin denetiminde etkili ve verimli bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: ters sarkaç, PID, optimizasyon, PSO,GA

1. Giriş

Ters sarkaç sistemi günümüzde mühendislik alanında kontrol sistemleri için sıklıkla kullanılan bir modeldir [1]. Kontrol teorisinde kararsız, dinamik ve doğrusal olmayan sistem olarak tanımlanır. Doğal durumunda dengesiz olan sistemi kontrol yöntemleriyle dengeli(stabilize) hale getirmek amaçlanır. En temel haliyle ters sarkaç düzeneği bir arabanın üzerine yerleştirilen bir çubuğun, denge halinde düşmeden durmasını amaçlar. Bu oluşturulan temel düzenek ile teorik olarak kararsız sistemlerin durumunun inceleneceği ideal bir ortam sunar. Ters sarkaç sisteminin teori kısmı dışında pratikte de kullanılan birçok alanı mevcuttur. Pratik mühendislikteki önemi birçok farklı disiplindeki uygulamalarda da fayda sağlamaktadır. Biyomekanikte, rehabilitasyon robotlarının tasarımında, humanoid robotların dengeli yürüme mekanizmalarında, havacılık sektöründe roketlerin süreçleri (kalkış ve iniş kontrolleri gibi) bu örnekler ters sarkaç sisteminin yalnızca teorik değil gerçek hayattaki problemlerin çözümünde mühendisliğe cevap üretebilen bir model olmasını sağlamaktadır.

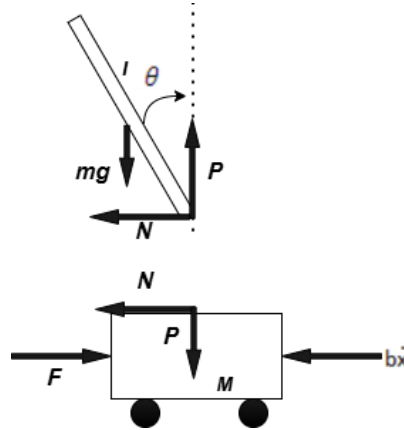
Kontrol sistemleri, mühendislikte fiziksel süreçlerin kararlı ve istenen bir biçimde yürütülmesini sağlamak amacıyla kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemlerde yaygın olarak kullanılan orantısal-integral-türevsel (PID) kontrolörler, yapılarının basitliği ve geniş uygulama alanları sayesinde çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir [2]. PID kontrolörleri, sistem dinamiklerine hızlı ve etkili şekilde müdahale ederek sistem davranışlarını iyileştirme ve kararlılık sağlama açısından önemli avantajlar sunar. Bu bağlamda, ters sarkaç sistemi kontrol teorisinde sıklıkla ele alınan klasik ve zorlu bir dengeleme problemidir [3]. Ters sarkaç sistemi, bir taşıyıcı araç üzerine dikey yerleştirilen bir sarkacın kararlılığını sağlamak amacıyla tasarlanmış olup, sistemin ani ve hızlı değişimlerine gerçek zamanlı tepki gerektirir. Bu dinamik yapının denetiminde, PID kontrolör parametrelerinin uygun şekilde ayarlanması sistemin genel performansını önemli ölçüde artırmaktadır [4]. Literatürde, bu tür sistemlerin dengelemesi amacıyla PID kontrolörlerine dayalı birçok optimizasyon temelli çalışma gerçekleştirilmiştir [5].

PID parametrelerinin belirlenmesinde optimizasyon algoritmalarının kullanımı, klasik PID yöntemlerinin ötesine geçmiştir. Çünkü parametrelerin manuel olarak ayarlanması zaman alıcı ve sistematik olmayan sonuçlar doğurabilirken, optimizasyon algoritmalarıyla daha hızlı ve daha etkili sonuçlar elde edilebilmektedir [6]. Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) gibi birçok farklı optimizasyon tekniği literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle GA, ters sarkaç gibi karmaşık sistemlerde uygun kontrol parametrelerini bulmada kullanılan yaygın bir optimizasyon yöntemidir. Doğadan esinlenen bu algoritmada; çözüm adayları kromozomlar olarak temsil edilir ve çözüm süreci üreme, mutasyon ve çaprazlama gibi evrimsel işlemlerle ilerler [7]. PSO ise, doğadaki sosyal etkileşimlerden ilham alınarak geliştirilmiş bir optimizasyon algoritmasıdır. Bir grup parçacık, çözüm uzayında rastgele yerleştirilir ve her biri, hem kendi en iyi deneyimlerinden hem de topluluğun en iyi çözümünden öğrenerek konum ve hızını günceller. Bu süreç, en iyi çözüme yaklaşıma kadar sürer [8].

Bu çalışmada, klasik PID kontrolörünün yanı sıra, parametrelerini optimize edebilmek için Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmaları kullanılmıştır. PSO algoritmasında her bir parçacık, GA’da ise her birey; bir PID parametre setini (K_p , K_i , K_d) temsil etmektedir. Bu yapıdaki parçacıklar ve bireyler, çözüm uzayında belirlenen sınırlar içerisinde hareket ederek en uygun parametre kombinasyonunu bulmayı amaçlar. Sistem performansının değerlendirilmesinde; ISE (Integral of Squared Error), ITAE (Integral of Time-weighted Absolute Error) ve IAE (Integral of Absolute Error) gibi yaygın hata metrikleri kullanılmıştır. Ayrıca, çalışmada klasik performans metriklerini aşımı (overshoot) ile birleştiren yeni bir hibrit değerlendirme modeli önerilmiştir. Bu hibrit model sayesinde sistemin hem dinamik cevabı hem de kararlılığı daha kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Sonuçlar, klasik PID kontrolör ile optimizasyon temelli kontrolörlerin performanslarının karşılaştırılması yoluyla değerlendirilmiştir.

2. Ters Sarkaç Sisteminin Matematiksel Modeli

Ters sarkaç sistemi, araba üzerine monte edilmiş ve yerçekimi merkezinin üzerinde konumlandığı kararsız bir sarkaçtan oluşur. Sistemin amacı, sarkacı dik konumda (denge noktası) tutarken aynı anda arabayı istenilen pozisyonda hareket ettirebilmektir. Karmaşık ve doğrusal olmayan dinamikleri sayesinde, ters sarkaç sistemi kontrol algoritmalarının performanslarını test etmek ve optimize etmek amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan bir referans sistemdir [6].



Şekil 1. Ters sarkaç sistemi detaylı gösterim

Tablo 1. Sistem Parametreleri

Sembol	Anlamı	Değeri
M	Arabacın kütlesi	0.5 kg
m	Sarkacın kütlesi	0.2 kg
b	Arabanın sürtünme katsayısı	0.1 Ns/m
I	Sarkacın atalet momenti	0.006 kg.m ²
g	Yerçekimi ivmesi	9.8 m/s ²
l	Sarkacın kütle merkezine uzaklığı	0.3 m

Şekil 1’de görüleceği üzere, sisteme dışarıdan F kuvvetiyle müdahale edilmektedir. Bu değer giriş (input) olarak alınmıştır. Böylece, sistem bir giriş kuvveti F alır ve iki temel değişken üretir. θ sarkacın dikeyden sapma açısı, x arabanın pozisyonunu belirtmektedir. Sistem parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Sistemin denklemleri, Newton’un ikinci hareket yasası ($F = ma$) ve Lagrange yöntemi kullanılarak çıkarılır. Denklem 1, arabaya etki eden kuvvetlerin toplamından elde edilir.

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + N = F \quad (1)$$

Sarkacın ağırlık merkeziyle ilgili momentlerin toplamından elde edilen Denklem 2 aşağıda verilmiştir.

$$l\ddot{\theta} = -Nl \cos \theta - Pl \sin \theta \quad (2)$$

Sarkaç üzerindeki yatay kuvvetlerin toplamı Newton’un hareket yasasına göre Denklem 3’ü vermektedir.

$$N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (3)$$

Sarkaç üzerindeki düşey kuvvet bileşeni P aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$P = ml\dot{\theta}^2 \cos \theta + ml\ddot{\theta} \sin \theta + mg \quad (4)$$

Bu dört denklemin kullanılması ile sistemin tüm hareketi modellenir [6,9].

2.2. PID Kontrol Yöntemi

PID kontrol yöntemi, kontrol sistemleri içerisinde en yaygın olarak kullanılan ve uygulama kolaylığı ile öne çıkan bir tekniktir [2]. Bu yöntemde kontrol sinyali; hatanın oransal bir katsayı ile çarpılması, zamanla integrali alınarak bir integral kazancı ile çarpılması ve türev bileşeninin bir türev kazancı ile çarpılması sonucunda elde edilir. PID kontrolörü, hatanın geçmiş (integral terimi), mevcut (oransal terim) ve gelecekteki (türev terimi) davranışlarını dikkate alarak sistem tepkisini düzenler. Bu özellikleri sayesinde, birçok farklı sistemde etkin bir şekilde uygulanabilir ve oldukça başarılı performans sonuçları sunar. PID kontrol yönteminin matematiksel ifadesi Denklem 5’te verilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Burada $u(t)$ kontrol sinyalini, $e(t)$ hata sinyalini (referans – çıkış), K_p oransal kazancını, K_i integral kazancını, K_d türev kazancını ifade etmektedir.

PID denkleminde yer alan kazançlarının belirlenmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında deneme-yanılma (trial-and-error), Ziegler–Nichols ayar yöntemi ve çeşitli optimizasyon teknikleri yer almaktadır [4].

3. Optimizasyon Yöntemleri

Ters sarkaç sisteminde bulunan araba ve sarkaç dinamikleri birbirine bağlıdır. PID parametreleri de bu sistemin tüm kararlılığını direk etkilemektedir. Yüksek performanslı bir denetleyici yapısı için PID ye verilen parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Klasik yöntemlerle verimli sonuçlar almak her zaman mümkün olmayabilir ve zorlu bir süreçtir. Bu çalışmada denetleyici performansını arttırmak amacıyla PID parametreleri Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ile üretilmiştir.

3.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritma, biyolojik evrim sürecini temel alarak geliştirilen ve çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir optimizasyon yöntemidir [10]. Temel aşamaları doğal seçim, çaprazlama (crossover) ve mutasyon gibi genetik işlemler yer alır. Başlangıçta rastgele bireyler içeren bir popülasyon oluşturulur ve nesiller boyunca daha iyi çözümler üretmek üzere gelişir. Uygunluk fonksiyonu ile her bireyin başarımı değerlendirilir ve bu iyi bireyin genetik bilgisi sonraki nesillere aktarılır.

Bu çalışmada, PID kontrol sisteminin K_p , K_i ve K_d parametrelerinin optimizasyonu amacıyla Genetik Algoritma uygulanmıştır. Bu yönteme ait sözde kod Şekil 2'de sunulmuştur.

1. Başlat:
 - Popülasyonu rasgele oluştur
Her birey = $[K_p, K_i \text{ ve } K_d]$
 - Her birey için uygunluk (fitness) değerini hesapla
(uygunluk_degeri = $ISE + ITAE$)
2. Döngü: Maksimum iterasyona kadar veya hata eşiği sağlanana kadar
 - a. Seçim:
 - En iyi bireyleri seç
 - b. Çaprazlama (Crossover):
 - Seçilen bireyleri eşleştirerek yeni bireyler oluştur
 - c. Mutasyon:
 - Belirli bir olasılıkla rastgele genleri değiştir (K_p , K_i veya K_d)
 - d. Yeni bireylerin uygunluk değerlerini hesapla
 - e. Popülasyonu güncelle
3. En iyi PID parametre kombinasyonunu döndür: $[K_p^*, K_i^*, K_d^*]$

Şekil 2. Genetik algoritma sözde kodu

3.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), kuş veya balık sürülerinin doğadaki toplu hareketlerinden esinlenerek geliştirilen bir sürü zeka algoritmasıdır [11]. Bu yöntemde her bir çözüm parçacık olarak ifade edilirken, parçacıklar çözüm uzayında hareket ederek optimum çözüme ulaşmayı amaçlarlar. Her parçacık hem kendi geçmiş deneyimini (*pBest*) hem de sürünün en iyi deneyimini (*gBest*) dikkate alarak hız ve konum güncellemeleri yapar. PSO algoritmasının parametre azlığı ve hızlı yakınsama gibi temel özellikleri literatürde onu ön plana çıkarmıştır.

PSO algoritması, PID kontrol parametrelerinin optimize edilmesinde sıklıkla tercih edilmekte olup, bu çalışmada, PID kontrol sisteminin K_p , K_i ve K_d parametrelerinin optimizasyonu amacıyla geliştirilen yönteme ait sözde kod Şekil 3'te verilmiştir[12].

1. Başlat:
 - Her parçacığın konumu: $[K_p, K_i \text{ ve } K_d]$ rastgele belirlenir
 - Her parçacığın hızı rastgele atanır
 - Her parçacığın uygunluk değeri hesaplanır (örneğin $ISE + ITAE$)
 - Her parçacığın en iyi pozisyonu (*pBest*) kaydedilir
 - Sürünün en iyi pozisyonu (*gBest*) belirlenir
2. Döngü: Maksimum iterasyona kadar veya performans kriteri sağlanana kadar
Her parçacık için:
 - a. Hızı güncelle:

$$v = w*v + c1*r1*(pBest - x) + c2*r2*(gBest - x)$$
 - b. Konumu güncelle:

$$x = x + v$$
 - c. Yeni uygunluk değerini hesapla
 - d. *pBest* ve *gBest*'i gerektiğinde güncelle
3. En iyi *PID* parametre kombinasyonunu döndür: $[K_p^*, K_i^*, K_d^*]$

Şekil 3. Parçacık sürü optimizasyonu sözde kodu

3.3. Performans Kriterleri

Performans kriterleri, kontrol sistemlerinin çıkışlarının istenen referans değerine ne derece yaklaştığını değerlendirmek amacıyla kullanılan tekniklerdir [13]. Bu çalışma kapsamında iki temel performans kriteri ele alınmıştır: ISE ve ITAE.

ISE, sistemin hata büyüklüğünü zaman boyunca karesel olarak değerlendirir. Büyük hatalara daha fazla ceza verir ve böylece ani sapmaların önüne geçilir. ISE kriterinin matematiksel ifadesi aşağıda Denklem 6' da verilmiştir.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t)dt \quad (6)$$

ITAE kriteri ise hatanın mutlak değeri zamanla çarpılarak değerlendirilir. Geç ortaya çıkan hatalara daha fazla ceza verir; bu yüzden geç dengeye gelmeleri engellemeye çalışır. Bu kriter Denklem 7’de verilmiştir.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (7)$$

Bu çalışmada, her iki performans kriterinin sağladığı avantajlardan yararlanmak için hibrit bir performans değerlendirme yapısı kullanılmıştır. Böylece, hem ISE sayesinde büyük sapmaların önüne geçilirken, ITAE sayesinde yerleşme süresini azaltması sayesinde sistemin dengeye hızlı gelmesi amaçlanmıştır. Hibrit yaklaşım Denklem 8’de verilmiştir.

$$J = ISE + ITAE \quad (8)$$

4. Bulgular

Ters sarkaç sisteminin kontrolü için yapılan simülasyon çalışmasında, denge durumundaki sarkaç sistemine 500 Ns’lik ani darbe girişi uygulanmış ve başlangıç açısı $-\pi$ konumunda olan sarkacın açı değişimi gözlemlenmiştir. Kontrolcü tasarımı için Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile PID kontrolcüsü parametrelerinin optimizasyonu yapılmış ve Klasik PID kontrolcüsü ile performans karşılaştırması yapılmıştır. Klasik PID kontrolcüsü parametreleri, literatürde yaygın olarak kullanılan deneysel deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmiştir. Her üç yöntemle de sistemin başarımı ISE (Integral Square Error), ITAE (Integral Time Absolute Error) ve her ikisinin hibrit birleşimi ile maksimum salınım (overshoot) gibi kriterler kullanılarak değerlendirilmiştir. PID kontrolcüsünün parametre değerleri ve sistem performans sonuçları Tablo 2 ve Tablo 3’te özetlenmiştir.

Tablo 2. PID kontrolcüsünün parametre benzetim sonuçları

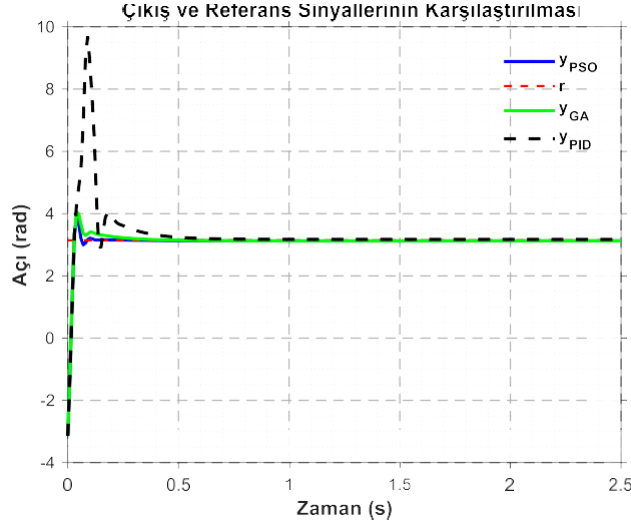
	GA-PID	PSO-PID	PID
K_p	192.95	100	200
K_i	19.28	20.02	5
K_d	28.14	30.05	25

Tablo 3’te, GA ve PSO tabanlı PID denetleyicilerinin performansı, PID’ye kıyasla çok daha iyi sonuçlar vermektedir. ISE, ITAE ve hibrit performans kriterlerinde elde edilen düşük değerler, sistemin daha hızlı ve kararlı şekilde dengeye geldiğini göstermektedir. Klasik PID ise, daha büyük ISE ve ITAE değerleriyle daha düşük bir performans sergilemiştir. J Başarı Oranı (%) ile GA-PID ve PSO-PID kontrolcülerinin J (hibrit uygunluk fonksiyonu) değeri, PID kontrolcüsüne göre ne kadar iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

Tablo 3. Sistem performans sonuçları

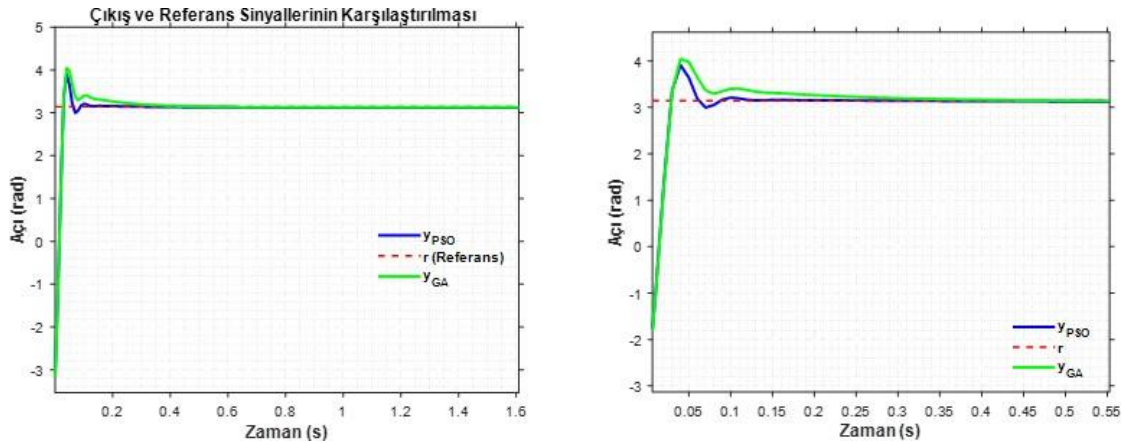
	ISE	ITAE	J	J Başarı Oranı (%)
GA-PID	63.3185	6.5657	69.87	80.3%
PSO-PID	61.4464	5.0717	66.51	81.2%
PID	327.8717	25.3373	353.20	-

Şekil 4'de simülasyon sonuçları sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, GA ve PSO tabanlı PID kontrol sistemlerinin, az bir aşım yaparak hızla dengeye geldiği ve referans değeriyle uyum sağladığı gözlemlenmektedir. Klasik PID kontrolcüsü, optimizasyon yapılmadan elde edilen deneysel deneme-yanılma yöntemiyle tasarlandığı için daha yavaş bir toparlanma süreci sergilemiş ve daha yüksek salınımlar göstermiştir. Bu durum, klasik PID kontrolcüsünün performansının, GA ve PSO tabanlı PID kontrolcüsüne kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4. PSO-PID, GA-PID ve PID kontrolcülerini ile Sarkacın açısı

Şekil 5'te, optimizasyon algoritmalarının etkilerini daha net bir şekilde gözlemleyebilmek amacıyla yalnızca PSO-PID ve GA-PID sonuçları sunulmuştur. Simülasyon sonuçları, PSO tabanlı PID kontrolcüsünün, başlangıçta GA tabanlı PID kontrolcüsü ile benzer sonuçlar gösterdiği görülse de, en hızlı şekilde dengeye yerleştiğini ortaya koymaktadır. PSO, diğer yöntemlere kıyasla çok daha kısa bir sürede referans değeriyle uyum sağlamış ve daha düşük salınımlar ile stabil bir sonuç elde edilmiştir. Bu, PSO'nun optimizasyon sürecinde daha hızlı bir kararlılık sağladığını ve PID parametrelerinin daha verimli bir şekilde optimize edildiğini göstermektedir.



Şekil 5. PSO-PID ve GA-PID kontrolcülerini ile Sarkacın açısı grafiğinin yakın görüntüleri

5. Sonuç

Bu çalışmada, ters sarkaç sisteminin denge konumundaki açı kontrolü amacıyla kullanılan klasik PID kontrolörüne ek olarak, Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) gibi önemli optimizasyon teknikleriyle PID denetleyici parametrelerinin optimum hali ile yeni kontrolcüler geliştirilmiştir. Kontrolcülerin performans değerlendirmesi için Kare Hata İntegrali (ISE) ve Zaman Ağırlıklı Mutlak Hata İntegrali (ITAE) kriterleri kullanılarak hibrit bir uygunluk fonksiyonu oluşturulmuştur.

Elde edilen sonuçlar, GA ve PSO tabanlı PID kontrolcülerinin, klasik PID kontrolcüsüne kıyasla daha üstün bir performans sergilediğini ve sistem kararlılığının hızla sağlandığını açık bir şekilde göstermektedir. Bu bulgular, PSO ve GA algoritmalarının, doğrusal olmayan ve karmaşık sistemlerin kontrolünde etkili bir optimizasyon aracı olarak kullanılabileceğini ve hızlı dengeleme sağlama konusunda güçlü bir performans sunduğunu ortaya koymaktadır.

Kaynakça

- [1] Boubaker, O. (2013). The inverted pendulum benchmark in nonlinear control theory: a survey. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(5), 233.
- [2] Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning* (2nd ed.). Instrument Society of America.
- [3] Boubaker, O. (2012, July). The inverted pendulum: A fundamental benchmark in control theory and robotics. In *International conference on education and e-learning innovations* (pp. 1-6). IEEE.
- [4] Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 64(11), 759–768.
- [5] Rithirun, C., Charean, A., & Sawaengsinkasikit, W. (2021, March). Comparison between pid control and fuzzy pid control on invert pendulum system. In *2021 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON)* (pp. 337-340). IEEE.
- [6] Duru, A. S. (2023). Metaheuristic Algorithms Based PID Controller Tuning Approach for Inverted Pendulum System. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 1(1), 37-50.
- [7] Alimoradpour, S., Rafie, M., & Ahmadzadeh, B. (2022). Providing a genetic algorithm-based method to optimize the fuzzy logic controller for the inverted pendulum. *Soft Computing*, 26(11), 5115-5130.
- [8] Dastranj, M. R., Moghaddas, M., Afghu, S. S., & Rouhani, M. (2011, May). PID control of inverted pendulum using particle swarm optimization (PSO) algorithm. In *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks* (pp. 575-578). IEEE.
- [9] Chakraborty, K., Mukherjee, R. R., & Mukherjee, S. (2013). Tuning of PID controller of inverted pendulum using genetic algorithm. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 3(1), 21-24.

- [10] Alhijawi, B., & Awajan, A. (2024). Genetic algorithms: Theory, genetic operators, solutions, and applications. *Evolutionary Intelligence*, 17(3), 1245-1256.
- [11] Gad, A. G. (2022). Particle swarm optimization algorithm and its applications: a systematic review. *Archives of computational methods in engineering*, 29(5), 2531-2561.
- [12] Mousakazemi, S. M. H. (2021). Comparison of the error-integral performance indexes in a GA-tuned PID controlling system of a PWR-type nuclear reactor point-kinetics model. *Progress in Nuclear Energy*, 132, 103604.
- [13] Soni, Y. K., & Bhatt, R. (2013). BF-PSO optimized PID controller design using ISE, IAE, IATE and MSE error criteria. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 2(7), 2333-2336.