

ZAMAN GECİKMESİ İÇEREN YÜKSEK DERECELİ SALINIM SİSTEMLER İÇİN HİBRİT ATEŞBÖCEĞİ-GENETİK ALGORİTMAYA DAYALI PIDA KONTROLÖR TASARIMI

Tufan DOĞRUEK * 

Alınma: 25.08.2022 ; düzeltme: 21.03.2023 ; kabul: 20.06.2023

Öz: Kontrol sistem tasarımında, kontrolör tipi ve kontrolör parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesi önem arz eder. PID kontrolörler birçok uygulamada çoğunlukla tercih edilirler. Bunun yanında, zaman gecikmesi içeren yüksek dereceden salınımlı sistemlerin kontrolünde PID kontrolörlerin yetersiz kaldığı bilinmektedir. Bu tür sistemlerde geleneksel PID kontrolör yerine PIDA kontrolör tercih edilir. Bu makale zaman gecikmesine sahip yüksek dereceden salınımlı sistemlerin kontrolü için hibrit algoritma tabanlı bir optimizasyon yöntemi sunar. PIDA kontrolör parametrelerini belirlemek için ateşböceği ve genetik algoritmanın avantajlarını birleştiren hibrit bir algoritma kullanılmıştır. Sunulan yöntemde, zaman cevabı parametrelerinden yerleşme ve yükselme zamanı, aşım ve kalıcı hal hatası kriterleri alınarak çok ölçütlü bir amaç fonksiyonu önerilmiştir. Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için iki benzetim çalışması yapılmış, elde edilen sonuçlar literatürden bazı çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca sistemlerin parametre belirsizlik durumları analiz edilmiş ve tasarlanan kontrolörlerin dayanıklılık performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Önerilen yöntemin, zaman gecikmesi içeren yüksek dereceden salınımlı sistemlerin geçici ve kalıcı durum cevabını geliştirdiği, hızlı ve etkili bir ayarlama metodu sunduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek dereceden salınımlı sistemler, PIDA kontrolör, Hibrit algoritma

Hybrid Firefly-Genetic Algorithm-Based PIDA Controller Design for Higher Order Oscillatory Systems with Time-Delayed

Abstract: In control system design, it is important to determine the controller type and controller parameters appropriately. PID controllers are mostly preferred in many applications. At the same time, it is known that PID controllers are insufficient to control higher order oscillatory systems with time delay. In such systems, PIDA controller is preferred instead of traditional PID controller. This paper presents a hybrid algorithm based optimization method for the control of higher order oscillatory systems with time delay. A hybrid algorithm combining the advantages of firefly and genetic algorithm is used to determine PIDA controller parameters. In the proposed method, a multi-criteria objective function is suggested by taking the settling and rising time, percent overshoot and steady state error criteria from the time response parameters. Two simulation studies are conducted to evaluate the performance of the proposed method, and the results are compared with some studies from the literature. In addition, the parameter uncertainties of the systems are analyzed and the robustness performance evaluations of the designed controllers are made. It is seen from the results obtained that the proposed method improves the transient and steady state response of higher order oscillatory systems with time delay and offers a fast and effective tuning method.

Keywords: Higher order oscillation system, PIDA controller, Hybrid algorithm

*Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.
İletişim Yazarı: Tufan Doğruer (tufan.dogruek@gop.edu.tr)

1. GİRİŞ

Bir kontrol sisteminin beklenen çıkış cevabını üretebilmesi için kontrolör seçimi ve kontrolör parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesi önem arz eder. PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrolörler birçok sistemde başarılı kontrol sağlasa da kararsız, servo, salınımlı ya da yüksek dereceli sistemlerde yeteri kadar başarı sağlayamamaktadır. Ayrıca, kontrol edilen sistemlerde zaman gecikmesinin var olması da sistemin kontrolünü güçleştirmektedir. PID kontrolöre yapılan bazı ilavelerle elde edilen PIDA (Oransal-İntegral-Türevsel-İvme) veya PIDD² kontrolör, Fuzzy-PID, adaptif PID ve kesir dereceli PID gibi kontrolörler kontrolü zor sistemlerde de başarılı kontrol sağlayabilmektedir. PIDA kontrolörler, 1996 yılında Jung ve Dorf (Jung ve Dorf, 1996) tarafından yüksek dereceli sistemlerin kontrolü için önerilmiştir. Bazı çalışmalarda (Dal-Young ve diğ., 2001, Jung ve Dorf, 1996), PIDA kontrolörlerin PID kontrolörlere göre yüksek dereceli sistemlerin kontrolünde daha başarılı cevaplar verdiği belirtilmiştir. Yüksek dereceli sistemlerin kontrolü için farklı kontrolör yapılarının kullanıldığı çalışmalar literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalardan birisini Das ve ark. kesir dereceli PID kontrolörlerinin yüksek dereceli sistemleri kontrol etmek için zaman ve frekans uzayında parametre ayarlama yöntemleri üzerinde karşılaştırmalı bir çalışma ile yapmıştır (Das ve diğ., 2011). Frekans alanı yaklaşımının dayanıklılık, yüksek frekanslı gürültü reddetme yeteneği, kontrol sinyali değeri açısından daha iyi performans sağladığını ifade etmişlerdir. Diğer bir çalışmada, Malwatkar ve ark. yüksek dereceden salınımlı sistemler için model tabanlı PID kontrolör tasarımı önermişlerdir (Malwatkar ve diğ., 2009). Çalışmalarında, model indirgeme yöntemleriyle yüksek dereceli salınımlı sistemlerin üçüncü dereceden modelini elde ederek, indirgenmiş modele göre PID parametrelerini belirlemişlerdir. PID parametre ayarlama prosedürünün basit, etkili ve sistem performansını arttırabildiğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında üç benzetim örneği ve bir gerçek zamanlı çalışma sunarak yöntemin uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Bağış ve Şenberber yüksek dereceden salınımlı sistemlerin kontrolünü PID kontrolör ile gerçekleştirmişlerdir (Bağış ve Şenberber, 2017). Çalışmalarında PID kontrolör parametrelerini uygun bir amaç fonksiyonu kullanarak yapay arı kolonisi algoritması (ABC) ile ayarlamışlardır. Önerdikleri yöntemin etkinliğini göstermek için, literatürde verilen geleneksel PID ayarlama yöntemleri ve iki popüler meta-sezgisel optimizasyon algoritması olan parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) algoritması ve genetik algoritma (GA) ile karşılaştırmışlardır. Nihai olarak ABC tabanlı PID ayarlama yönteminin yüksek dereceden salınımlı sistemlere kolay ve başarılı bir şekilde uygulanabileceğini bildirmişlerdir. Arulvadivu ve ark. tarafından değiştirilmiş kelebek optimizasyon algoritması (MBOA) kullanılarak yüksek dereceden doğrusal olmayan zaman gecikmesi içeren sistem için optimal PIDA kontrolör tasarımı önerilmiştir (Arulvadivu ve diğ., 2022). Çalışmalarında beş adet sistem için kontrolör tasarımları yapmış, sundukları yöntemin verimliliğini tablo ve şekillerde göstermişlerdir.

Araştırmacılar kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan birçok yöntem önermişlerdir. Birçok avantajından dolayı oldukça yaygın bir kullanım alanı bulan PID kontrolörlerin parametrelerinin belirlenmesinde Ziegler-Nichols, Åström-Hägglund ve Cohen-Coon en bilinen klasik ayar metotlarıdır (Borase ve diğ., 2021). Bu metotların yanında, kazanç-faz payına dayanan metotlar, frekans cevabı analizi yöntemleri, kutup yerleştirme metotları ve optimal kontrolör parametrelerinin belirlenmesine dayanan metotlar literatürde yer alır (Cominos ve Munro, 2002). 1942 yılında Ziegler-Nichols ayar metotları ile başlayan bu süreç, sonraki yıllarda araştırmacıların bu konuya daha fazla ilgi duymalarını sağlamıştır. Genetik algoritma (GA), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), ateş böceği algoritması (FA), guguk kuşu algoritması (CS), karınca kolonisi algoritması, yapay arı kolonisi algoritması (ABC) gibi yapay zekaya dayanan optimizasyon algoritmalarının kullanılmasıyla, kontrolör parametreleri hızlı ve verimli bir şekilde belirlenebilmektedir. Meta-sezgisel algoritma tabanlı optimizasyon stratejileri, çeşitli kontrol mühendisliği problemlerini çözmek için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır (Latha ve diğ., 2013). Meta-sezgisel algoritmalar, basit mimarileri, iyi optimizasyon yetenekleri

ve hızlı yanıtları nedeniyle kontrol alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel optimizasyon yaklaşımları ile karşılaştırıldığında, meta-sezgisel algoritmalar yüksek boyutlu optimizasyon problemlerinin çözümünde daha verimlidir (Joseph ve diğ., 2022).

Kontrolör parametrelerinin meta-sezgisel algoritmalarla ayarlanması için araştırmacılar birçok bilimsel çalışma sunmuşlardır. Örneğin, bir çalışmada zaman gecikmesi içeren kararsız ve integrating sistemlerin kontrolü PID ve kesir dereceli PID ile yapılırken, kontrolör parametreleri PSO ve ABC algoritmaları kullanılarak belirlenmiştir (Bingul ve Karahan, 2018a). Başka bir çalışmada AVR (otomatik voltaj regülatörü) sisteminin kontrolünde PID kontrolör parametreleri CS algoritması ile ayarlanmıştır (Bingul ve Karahan, 2018b). CS algoritmasını kullanan başka bir çalışmada sıvı seviye sisteminin kontrolü için PIDA kontrolör tasarlanmıştır (Jitwang ve Puangdownreong, 2020). Başka bir makalede, AVR sisteminin PID ile kontrolünde sinüs-kosinüs algoritması kullanılmıştır (Hekimoğlu, 2019). Çok makinalı güç sistemi için dayanıklı kesir dereceli PID kontrolör tasarımı çekirge optimizasyon algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Hekimoğlu, 2020). Çok alanlı bir sistemin otomatik üretim kontrolü karınca aslanı optimize edici algoritması tabanlı PIDA kontrolör kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Raju ve diğ., 2016). Başka bir çalışmada, indüksiyon motorları için optimal PIDA kontrolör parametrelerini bulmak amacıyla doğadan esinlenerek oluşturulmuş bir algoritma olan örümcek maymun optimizasyonu (SMO) kullanılmıştır (Sharma ve diğ., 2016). Yazarlar, indüksiyon motorları için sürü zekası temelli bir algoritma ile optimal PIDA kontrolör parametrelerinin tasarımını gerçekleştiren ilk çalışmayı yaptıklarını belirtmektedir. Diğer bir çalışmada, yüksek dereceli sistemlerin kontrolünde kullanılan PIDA kontrolör parametrelerinin PSO algoritmasıyla belirlenmesi yöntemi önerilmekte ve diğer optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılarak etkinliği gösterilmektedir (Donuk ve diğ., 2018). Buck dönüştürücü sistemi için Bode'nin ideal referans modeline dayalı optimal bir PIDA kontrolör tasarımı ve modifiye Lévy uçuş dağılımı (mLFD) algoritması (Izci ve diğ., 2022a)'da önerilmektedir. Yazarlar, mLFD algoritmasının diğer mevcut yöntemlere göre daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir. Çalışma çeşitli testler ve analizlerle desteklenerek doğrulanmıştır. Başka bir çalışma, Runge Kutta optimizer (RUN) algoritmasının modifiye edilerek mRUN (modified RUN) algoritmasının geliştirildiğini ve daha iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir (Izci ve diğ., 2022c). mRUN algoritması, bir PID ve PIDA kontrolörü ayarlamak için kullanılmış ve diğer benzer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Son yıllarda, birbirini tamamlayan iki veya daha fazla algoritmanın bir araya getirilmesi ile elde edilmiş hibrit algoritmalar optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır (Rodriguez ve diğ., 2012). Hibrit algoritmalar, algoritmaların arama yeteneklerini geliştirmede önemli bir rol oynamaktadır. Hibridizasyon, her bir algoritmanın avantajlarını birleştirerek hibrit bir algoritma oluşturmayı amaçlarken, aynı zamanda algoritmanın dezavantajını en aza indirmeye çalışır. Genel olarak, hibrit algoritmaların sonucu genellikle ya hesaplama hızı ya da doğruluk açısından bazı iyileştirmeler yapabiliyor olmasıdır (Ting ve diğ., 2015). Khadanga ve Satapathy çalışmalarında hibrit genetik algoritma ve yerçekimsel arama algoritması kullanarak sönüm kontrolör parametrelerini optimize etmek için uygun bir ayarlama yöntemi sunmuşlardır (Khadanga ve Satapathy, 2015). Başka bir çalışmada, optimizasyon problemlerinin çözümü için gri kurt optimizasyonu, simbiyotik organizmalar arama algoritması ve genetik algoritmanın birleştirilmesi ile bir hibrit algoritma sunulmuştur (Gai ve diğ., 2018). Bir başka çalışmada yazarlar, düşürücü dönüştürücünün kontrolü için Nelder-Mead yöntemiyle entegre edilmiş yeni bir yapay ekosistem tabanlı optimizasyon algoritması ile PID kontrolör tasarımı sunmuşlardır (Izci ve diğ., 2022b). Başka bir düşürücü dönüştürücü tasarımı için kesir dereceli PID kontrolör parametreleri hibrit Lévy uçuş dağılımı ve benzetimli tavlama algoritması ile ayarlanmıştır (Izci ve diğ., 2022d). Başka bir hibrit algoritma olan manta vatozu yiyecek arama ve benzetimli tavlama algoritması DC motorun hız kontrolünde kesir dereceli PID kontrolör parametrelerinin ayarlanmasında kullanılmıştır (Ekinci ve diğ., 2021). Literatürde yer alan hibrit algoritmaları şu şekilde genişletebiliriz: PSO ve GA (Wang ve diğ., 2017), FA ve PSO (Al-

Thanoon ve diğ., 2019), yerçekimsel ve FA (Gupta ve diğ., 2021), GWO ve ABC (Gaidhane ve Nigam, 2018), PSO ve LEVY uçuş algoritması (Barisal ve diğ., 2017), PSO ve CS (Yang ve diğ., 2021). Bu çalışmada kontrolör parametreleri ateşböceği ve genetik algoritmanın bir araya getirilmesi ile oluşturulmuş bir hibrit algoritma kullanılarak belirlenmiştir. Başarılı FA ve GA hibridizasyonlarının önceki girişimleri literatürde bildirilmiştir (Masouleh ve diğ., 2016, Rahmani ve MirHassani, 2014, Zervoudakis ve diğ., 2019).

Yapılan çalışmanın amacı ve literatüre olan katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Bu çalışmanın temel amacı zaman gecikmesi içeren yüksek dereceden salınımlı sistemlerin kontrolünü PIDA kontrolör ile gerçekleştirerek, zaman cevabı performansını iyileştirmektir. PIDA kontrolör parametreleri hibrit ateşböceği-genetik algoritma tabanlı bir yöntem ile belirlenmiştir. Çalışmada, zaman cevabı özelliklerine dayanan çok ölçütlü bir amaç fonksiyonu önerilmiştir.

- Çalışmada, yüksek dereceden salınımlı sistemlerin parametre belirsizliğine sahip olması durumunda PIDA kontrolör performansının değerlendirmesi yapılmıştır.

Makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. 2. Bölümde hibrit ateşböceği-genetik algoritma tanıtılmış ve PIDA kontrolör parametrelerinin ayarlanması anlatılmıştır. 3. Bölümde zaman gecikmesine sahip yüksek dereceden salınımlı sistemler için benzetim çalışması yapılmış ve bu sistemler için zaman cevabı ve parametre belirsizliği analizleri sunulmuştur. Son bölüm sonuç ve tartışma şeklindedir.

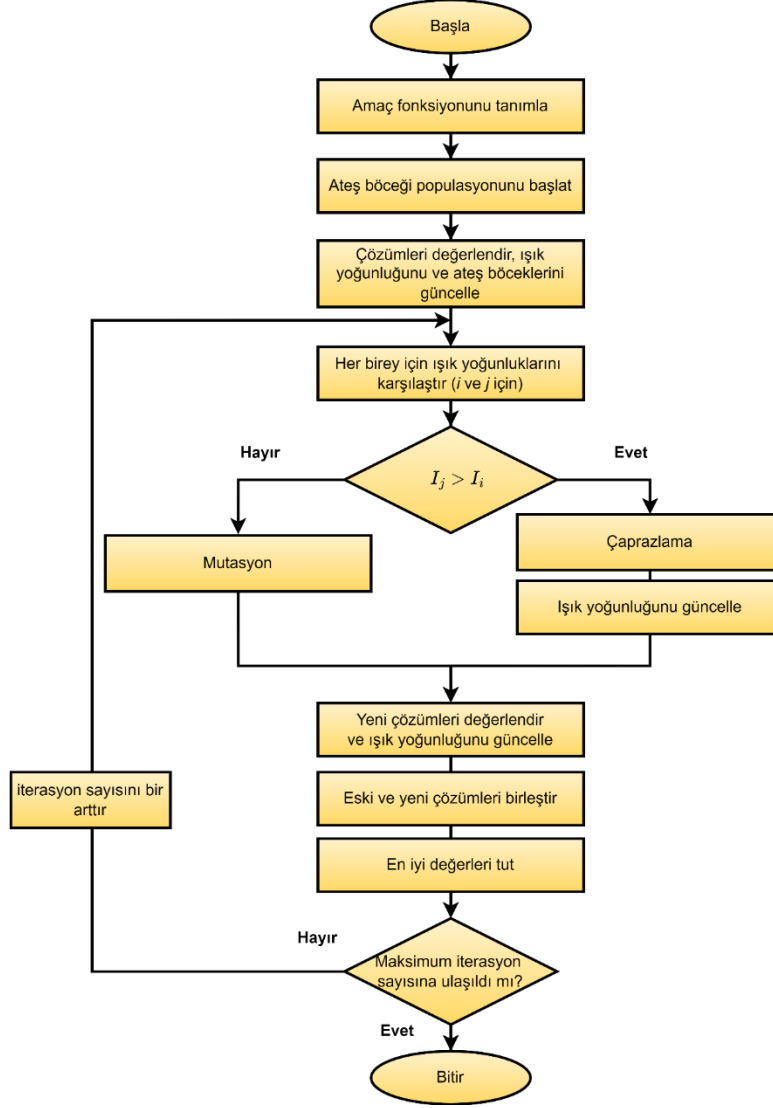
2. MATERYAL VE METOT

2.1. Hibrit Ateşböceği-Genetik Algoritma

Ateşböcekleri karşı cinsi etkileyerek üreme, avlanma ve düşmanlarından korunma gibi eylemleri yerine getirmektedir. Bu türün doğada sergilediği davranışlardan esinlenerek oluşturulmuş Ateşböceği algoritması 2008 yılında Yang (Yang, 2010) tarafından geliştirilmiştir. Bu algoritmanın temel prensibi, ateşböceklerinin çekiciliğine bağlı olarak birbirlerine veya rastgele bir yöne doğru hareket etmesi şeklindedir. Çekicilik parlaklıkla orantılıdır ve iki ateş böceği arasındaki mesafe arttıkça çekicilik ve parlaklık azalır. Ateşböcekleri daha iyi çözümler aradıkça, hareketleri mevcut konumlarına, çekiciliklerine ve rastgeleleştirme terimine göre güncellenir. Herhangi iki ateş böceğinden az parlak olan, daha parlak olana doğru hareket eder. Hiçbiri parlak değilse, rastgele hareket ederler. Genetik algoritmalar ise ilk olarak John Holland tarafından tanıtılan, prensibini evrim teorisindeki 'en iyinin hayatta kalması' fikrinden alan ve geniş bir uygulama alanına sahip bir optimizasyon yöntemidir (Holland, 1992). John Holland 1970'lerin başlarında genetik algoritmalar ile ilgili çalışmalarına başlamıştır. Geleneksel optimizasyon yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar veren genetik algoritmaların ilk genel formu Goldberg (1989) tarafından belirtilmiştir. Çözüm uzayının belirli bir yerini tarayarak, kısa bir sürede çözüme ulaşırlar (Goldberg ve Deb, 1991). Optimizasyon algoritmalarında, arama uzayında küresel optimum nokta bulunmadan durma kriterinin sağlanması, yerelde minimuma takılma yada erken yakınsama gibi problemler olabilmektedir (Aydilek, 2017). Bu tür problemlerin üstesinden gelebilmek için hibrit algoritmalar kullanılmaktadır.

Ateşböceği ve genetik algoritmanın üstün tarafları bir araya getirilerek oluşturulan hibrit yaklaşım, rastgele oluşturulmuş N tane bireyi (kromozomlar veya ateş böcekleri) alır. N tane birey, amaç fonksiyonunun değerine eşit olan ışık yoğunluğuna göre en iyiden en kötüye doğru sıralanır. Yinelemeler sırasında, iki ateş böceğinin ışık yoğunluğu karşılaştırılır. İki ateşböceğinden j . ateşböceği, i . ateşböceğinden daha parlaksa, iki ateşböceği için genetik çaprazlama uygulanır. Eğer i . ateşböceği daha parlaksa, her iki ateşböceğinde de genetik mutasyon uygulanır. Sonuç olarak, her iki şekilde de iki yeni çözüm üretilir. İki yeni çözüm, yineleme sürecinde eskilerinin yerini alır ve ışık yoğunlukları, kullanılan ebeveynlerin ortalama ışık yoğunluğuna eşittir. Nihayetinde hibrit algoritma, ateşböceği algoritmasının ana yapısını

kullanarak genetik alırtımda çaprazlama ve mutasyon için bireylerin seçilmesinde farklı bir yol izler (Zervoudakis ve diğ., 2019). Hibrit ateşböceği ve genetik alırtımın akış diyagramı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1:
Hibrit ateşböceği-genetik alırtımın akış diyagramı

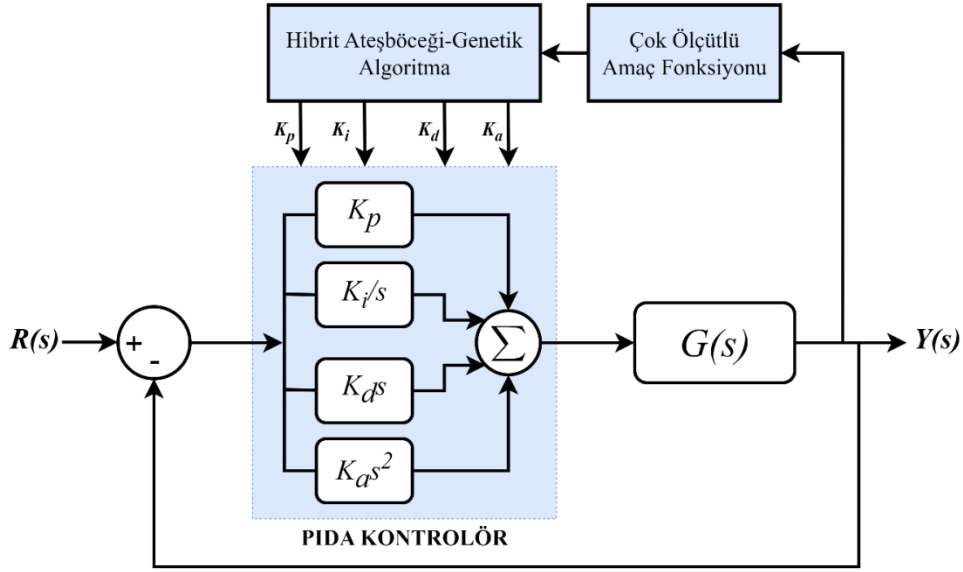
2.2. PIDA Kontrolör Parametrelerinin Ayarlanması

PID kontrolör, sadeliği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla tercih edilir. PID kontrolörün parametrelerinin ayarlanması, kontrol sisteminin sağamlığının ve performansının iyileştirilmesi için kritik bir konudur. Bu nedenle, PID veya benzer kontrolör yapılarının parametrelerinin uygun şekilde ayarlanmasıyla süreçlerin performansını ve sağamlığını artırma olasılıkları hala vardır. Son yıllarda, birçok araştırmacı değiştirilmiş bir PID kontrolör üzerinde çalışmıştır (Kumar ve Hote, 2021, Mosaad ve diğ., 2019, Yakout ve diğ., 2021). PIDA kontrolör olarak bilinen bu yapı gelişmiş bir PID kontrolördür ve geleneksel PID kontrolöre göre fazladan

bir çift türev parametresi içerir. PIDA kontrolör, PID kontrolöre kıyasla kontrol sisteminin istenen özelliklerini karşılamak için daha fazla serbestlik derecesi sağlar (Kumar ve Hote, 2020). Orijinde rastgele üç sifıra ve bir kutba sahip olan PIDA kontrolör, yüksek dereceli sistemler için PID kontrolörden daha hızlı ve daha düzgün yanıtlar sağlayabilir (Lurang ve diğ., 2019). PIDA kontrolörün eşitliği Denklem 1’de verilmiştir (Ekinci ve diğ., 2022).

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_a s^2 \quad (1)$$

PIDA kontrolörün parametrelerini belirlemek için Şekil 2’de blok diyagramı verilen bir optimizasyon algoritması oluşturulmuştur.



Şekil 2:
Önerilen yönteme ait kontrol sisteminin blok diyagramı

Kontrol sistemlerinde hatayı esas alan ISE, IAE, ITSE, ITAE gibi integral performans kriterleri sıklıkla kullanılır ve amaç fonksiyonlarında yer alır. Önerilen yöntemde amaç fonksiyonu olarak, zaman cevabı karakteristiklerine dayanan ve Denklem 2’de verilen çok ölçütlü bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

$$J_{\min} = a_1 t_s + a_2 t_r + a_3 M_p + a_4 e_{ss} \quad (2)$$

Denklem 2’de t_s yerleşme zamanı, t_r yükselme zamanı, M_p aşım ve e_{ss} kalıcı hal hatasını temsil eder. Denklemde a ile gösterilen parametreler $[0, 1]$ aralığında seçilen ağırlıklandırma katsayılarıdır. Ağırlıklandırma katsayıları, deneme-yanılma metoduyla seçilmiştir ve tüm a parametrelerinin toplam değeri 1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu makalede ağırlıklandırma katsayıları a_1, a_2, a_3 ve a_4 sırasıyla 0.3, 0.3, 0.2 ve 0.2 olarak alınmıştır.

Amaç fonksiyonunun tanımlanması ve hibrit ateşböceği-genetik algoritmanın başlangıç ayarlarının yapılmasıyla optimizasyon işlemi yürütülür. Algoritmada ilk çevrim PIDA kontrolör parametrelerine rasgele değerler atanarak başlar. Şekil 2’deki kapalı çevrim kontrol sisteminin çıkışından zaman cevabı karakteristikleri bir kod vasıtasıyla alınır ve çok ölçütlü amaç fonksiyonuna aktarılır. Çok ölçütlü amaç fonksiyonunun değerine göre hibrit algoritma PIDA kontrolör parametreleri için değer üretir. Yeni PIDA kontrolör parametrelerine göre çıkıştaki

zaman cevabı karakteristikleri tekrar okunur ve çok ölçütlü amaç fonksiyonunun yeni değerine göre hibrit algoritma tekrardan kontrolör parametrelerini yeniler. Bu süreç durma kriteri sağlanıncaya kadar devam eder.

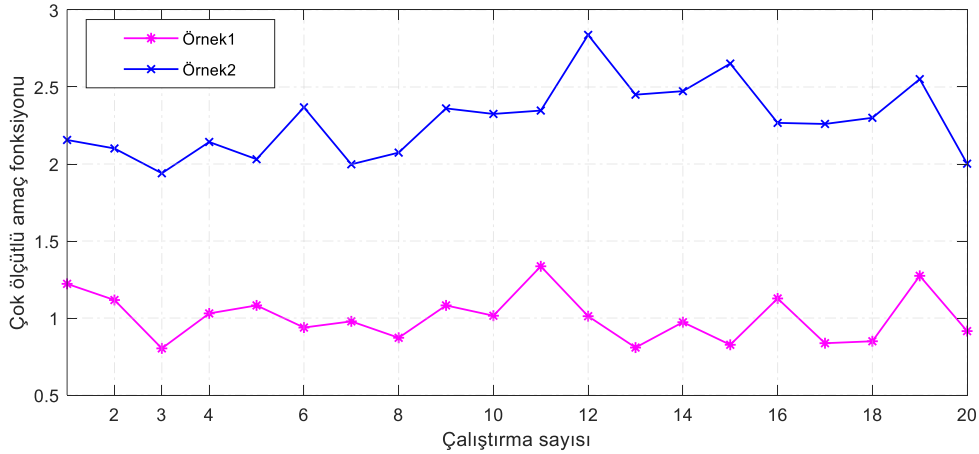
3. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu bölümde zaman gecikmesi içeren yüksek dereceden salınımlı iki sistem için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Hibrit algoritmada popülasyon sayısı 10, iterasyon sayısı 100 alınarak çalışmalar sürdürülmüştür. Ayrıca kontrolör parametrelerinin alt ve üst sınır değerleri örnek alınan sistemlere göre değişir. Bu değerler ilk örnekte [0 10] aralığında, ikinci örnekte [0 50] aralığında seçilmiştir.

Örnek 1: Denklem 3'te verilen örnek sistem (Bağış ve Şenberber, 2017, Malwatkar ve diğ., 2009, Wang ve diğ., 1999), zaman gecikmesi içeren 4.dereceden salınımlı bir sistemdir. Bu sistem için PIDA kontrolör tasarımı yapılarak, zaman cevabı ve parametre belirsizliği durumları incelenmiştir.

$$G_1(s) = \frac{1}{(s^2 + 2s + 3)(s + 2)^2} e^{-0.1s} \quad (3)$$

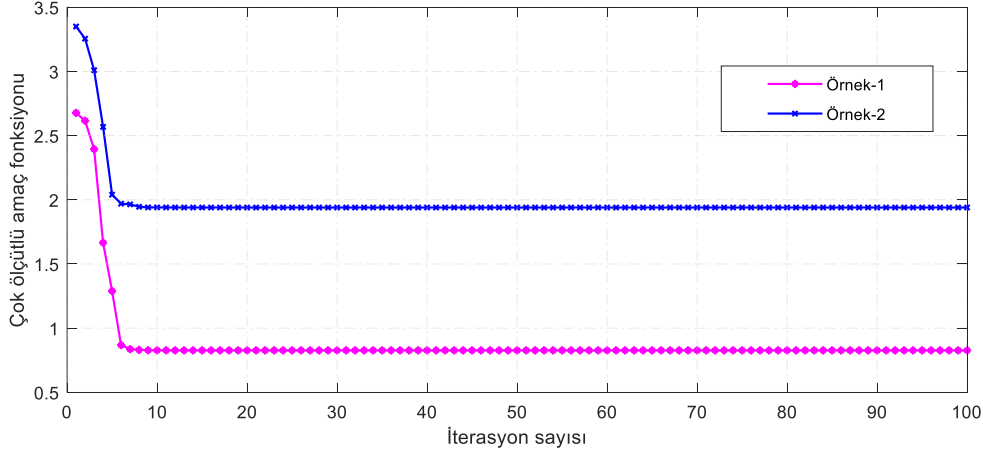
Önceki bölümde anlatılan yöntemle göre hibrit algoritma 20 kez çalıştırılır ve en uygun amaç fonksiyonuna göre PIDA kontrolör parametreleri belirlenir. Çalıştırma sayılarına göre çok ölçütlü amaç fonksiyonu değerlerini veren grafik Şekil 3'te verilmiştir. Şekilde ayrıca Örnek-2 için olan çok ölçütlü amaç fonksiyonu değerleri de gösterilmiştir.



Şekil 3:
Çalıştırma sayılarına göre çok ölçütlü amaç fonksiyonu değerleri

Şekil 3 incelendiğinde, en küçük amaç fonksiyonu değerinin 3. çalıştırmada elde edildiği görülmektedir. Bu çalıştırmaya ait çok ölçütlü amaç fonksiyonu değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimi (yakınsama) Şekil 4'te sunulmuştur. Algoritmanın 10 iterasyondan daha önce uygun amaç fonksiyonu değerine ulaştığı şekilden görülmektedir. Ayrıca Örnek-2'ye ait yakınsama eğrisi de şekilde sunulmuştur. Örnek-2 için de yakınsama eğrisinin çok hızlı olduğu dikkat çekmektedir.

En küçük amaç fonksiyonu değerlerine göre elde edilen kontrolör parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de ayrıca literatürde daha önceden yapılmış çalışmalarla elde edilen kontrolör parametreleri de verilmiştir. Tabloda hem Örnek-1 hem de Örnek-2 için elde edilen parametreler gösterilmiştir.

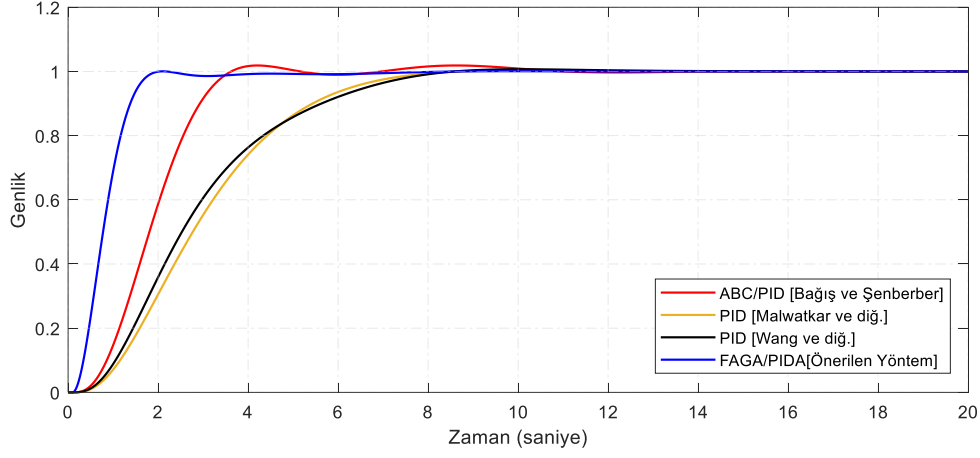


Şekil 4:
Örnek-1 ve Örnek-2 için yakınsama eğrileri

Belirlenen PIDA kontrolör parametrelerinin Denklem 3’teki sisteme uygulanmasıyla elde edilen kapalı çevrim sistemlerin birim basamak cevap eğrileri Şekil 5’te verilmiştir. Önerilen yöntemle, diğer yöntemlere kıyasla daha iyi bir aşım değeri sağlanırken, aynı zamanda hızlı bir cevap eğrisi elde edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen yöntemle elde edilen PIDA kontrolörün sistemin geçici ve kalıcı durum davranışını oldukça geliştirdiği şekilden açıkça görülmektedir.

Tablo 1. Kontrolör parametreleri

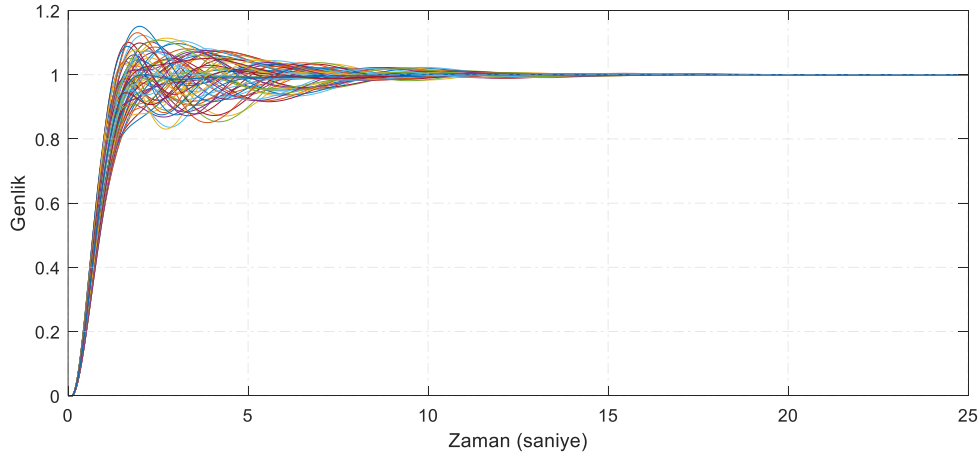
	Yöntem	K_p	K_i	K_d	K_a
Örnek 1	Önerilen Yöntem	8.9712	4.6063	8.5643	4.3520
	ABC/PID [Bağış ve Şenberber]	2.7121	2.2136	2.8118	-
	PID [Malwatkar ve diğ.]	1.3039	1.3104	1.3351	-
	PID [Wang ve diğ.]	1.5030	1.3660	1.7150	-
Örnek 2	Önerilen Yöntem	46.8757	30.1457	34.7987	15.6960
	ABC/PID [Bağış ve Şenberber]	29.1480	25.7060	20.5730	-
	PID [Karimi ve diğ.]	4.9300	15.6013	0.6162	-
	PID [Wang ve diğ.]	17.5620	22.4850	14.1300	-



Şekil 5:
Farklı yöntemlere göre elde edilen birim basamak cevap eğrileri (Örnek-1)

Tasarlanan PIDA kontrolörün dayanıklılık performansını değerlendirmek için Denklem 3 ile verilen sistemin parametrelerinde $\pm\%10$ değişim olduğunu kabul edelim. Parametrelerinde $\pm\%10$ değişim olan sistem Denklem 4 ile gösterilmiştir. Altı parametresi aralık halinde alınan sisteme, tasarlanan PIDA kontrolörün uygulanmasıyla elde edilen sistemin kapalı çevrim birim basamak cevap eğrileri Şekil 6’da gösterilmiştir.

$$G_1(s) = \frac{[0.9,1.1]}{[0.9,1.1]s^4 + [4.5,5.5]s^3 + [8.1,9.9]s^2 + [7.2,8.8]s + [3.6,4.4]} e^{-0.1s} \quad (4)$$



Şekil 6:
Parametre değişimlerine göre elde edilen birim basamak cevap eğrileri (Örnek-1)

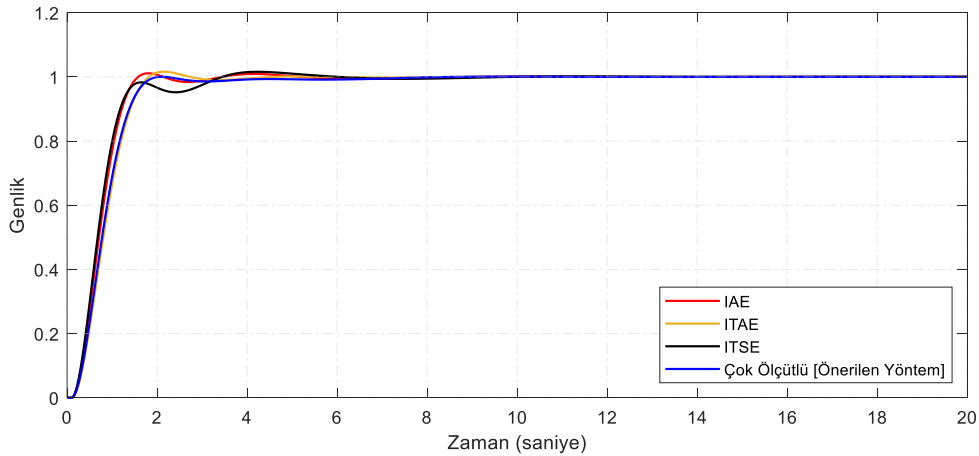
Şekil 6, her bir parametre için alt ve üst sınır değerleri olmak üzere iki değer alınarak, altı parametre için $2^6=64$ birim basamak cevabını içerir. Şekil incelendiğinde, tasarlanan PIDA kontrolörün 64 sistemi de kontrol ettiği görülmektedir.

Önerilen çok ölçütlü amaç fonksiyonunun performansını değerlendirmek amacıyla optimizasyon algoritmasında IAE, ITAE, ITSE gibi integral performans kriterleri kullanılarak PIDA kontrolör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen PIDA kontrolör parametreleri Tablo 2’de sunulmuştur. Tablo 2, hem Örnek 1 hem de Örnek 2 için elde edilen PIDA kontrolör parametrelerini içerir.

Tablo 2. Kontrolör parametreleri

	<i>Amaç Fonksiyonları</i>	K_p	K_i	K_d	K_a
Örnek 1	Çok ölçütlü amaç fonksiyonu	8.9712	4.6063	8.5643	4.3520
	IAE	10.00	5.3034	9.6889	5.1423
	ITAE	8.5123	4.7126	8.5126	3.9537
	ITSE	10.00	5.2491	10.00	5.6905
Örnek 2	Çok ölçütlü amaç fonksiyonu	46.8757	30.1457	34.7987	15.6960
	IAE	50.00	32.1325	39.6481	18.5816
	ITAE	47.4073	31.5600	36.9212	16.1159
	ITSE	50.00	35.1961	46.5911	21.7597

Tablo 2’de verilen PIDA kontrolörlerin Denklem 3’teki sisteme uygulanmasıyla elde edilen kapalı çevrim sistemlerin birim basamak cevap eğrileri Şekil 7’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, IAE ve ITAE kriterleri ile aşım olduğu, ITSE kriterinin uzun yerleşme zamanı oluşturduğu görülmektedir. Bunun yanında çok ölçütlü amaç fonksiyonu ile tasarlanan PIDA kontrolörlü sistemde aşım olmadığı dikkat çekmektedir.



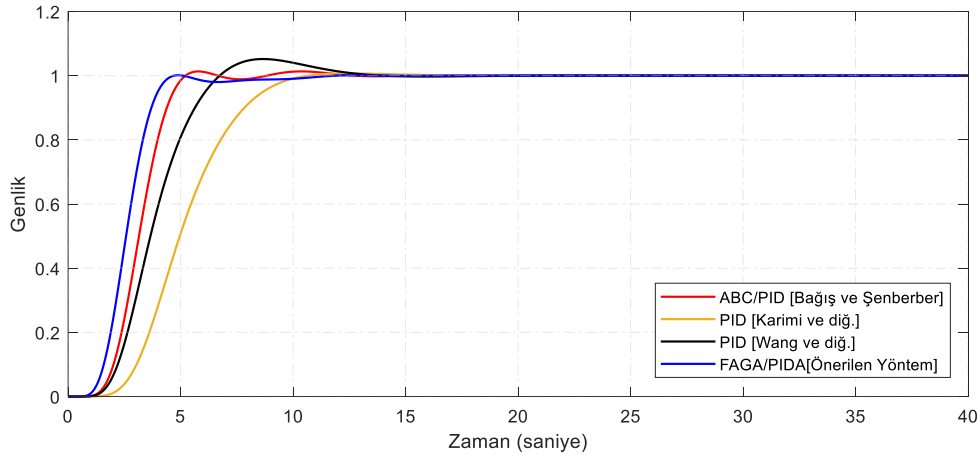
Şekil 7:

Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan PIDA kontrolör ile elde edilen birim basamak cevap eğrileri (Örnek-1)

Örnek 2: Denklem 5’te verilen örnek sistem (Bağış ve Şenberber, 2017, Karimi ve diğ., 2003, Wang ve diğ., 1999), zaman gecikmesi içeren 7.dereceden salınımlı bir sistemdir. Örnek-1’e göre derecesi daha yüksek ve zaman gecikmesi daha uzun olan bu sistem için önerilen yönteme göre belirlenen PIDA kontrolör parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

$$G_2(s) = \frac{1}{(s^2 + 2s + 3)^3 (s + 3)} e^{-0.3s} \quad (5)$$

Belirlenen PIDA kontrolör parametrelerine göre yapılan kontrolde elde edilen kapalı çevrim sistemlerin birim basamak cevapları Şekil 8’de sunulmuştur. Önerilen yöntemin diğer üç yönteme göre sistemin hem aşmasını iyileştirdiği hem de yükselme ve yerleşme zamanını kısalttığı şekilden görülmektedir.



Şekil 8:
Farklı yöntemlere göre elde edilen birim basamak cevap eğrileri (Örnek-2)

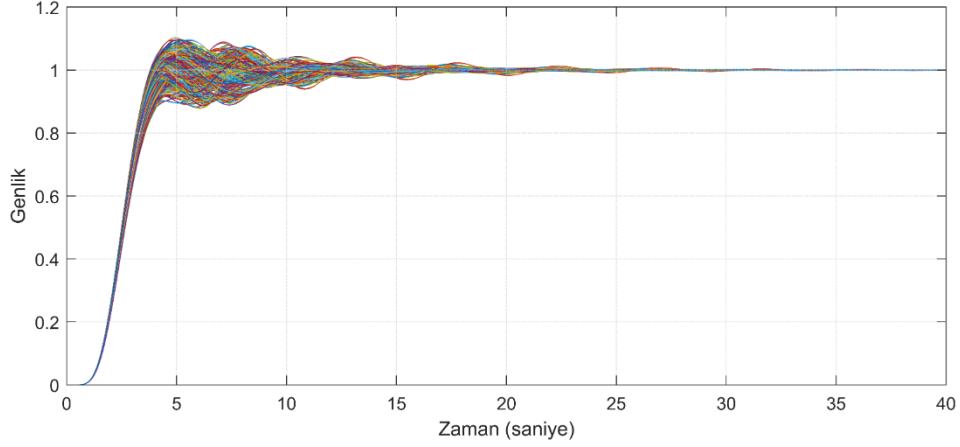
İlave olarak, sistemin dayanıklılık analizi için Denklem 6’daki sistem göz önüne alınarak bir çalışma yapılmıştır.

$$G_2(s) = \frac{[0.95,1.05]}{[0.95,1.05]s^7 + [8.55,9.45]s^6 + [38,40]s^5 + [105,109]s^4 + [190,200]s^3 + [240,246]s^2 + [186,192]s + [78,84]} e^{-0.3s} \quad (6)$$

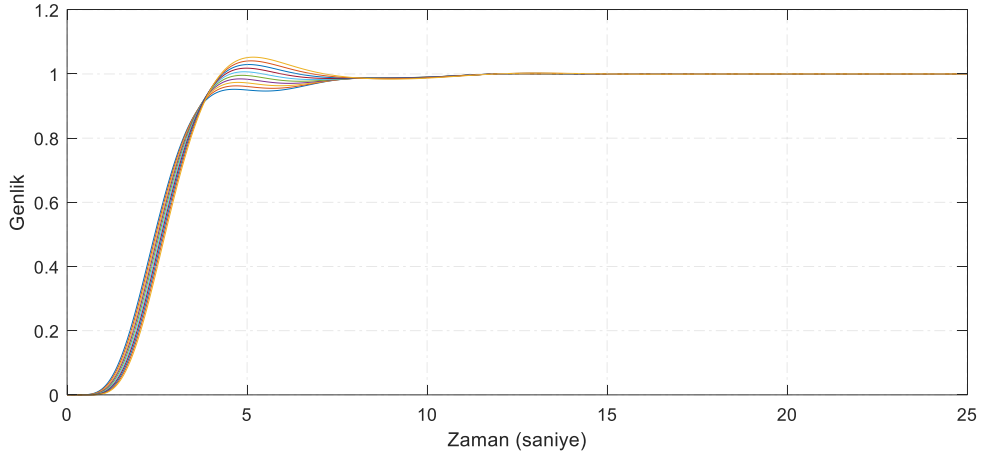
Denklem 6’daki sistemin dokuz parametresi için belirsizlik durumu olduğu varsayılarak ve her parametre için alt-üst sınır değerleri alınarak $2^9=512$ farklı sistem oluşturulmuştur. Belirlenen PIDA kontrolörün 512 sisteme uygulanmasıyla elde edilen sistemlerin birim basamak cevapları Şekil 9’da gösterilmiştir. Önerilen PIDA kontrolörün 512 farklı sistemi kontrol edebildiği şekilden görülmektedir.

Ayrıca, zaman gecikmesi parametresi için bir dayanıklılık analizi yapılmıştır. Denklem 7’de verilen sistemin gecikme zamanı $[0.15 \ 0.45]$ aralığında on farklı değer alınarak sistemler oluşturulmuş, elde edilen cevap eğrileri Şekil 10’da verilmiştir. Tasarlanan PIDA kontrolörün on farklı sistemi de başarılı bir şekilde kontrol ettiği ve kontrolörün dayanıklılık performansının tatmin edici seviyede olduğu şekilden görülmektedir.

$$G_2(s) = \frac{1}{(s^2 + 2s + 3)^3 (s + 3)} e^{-[0.15, 0.45]s} \quad (7)$$

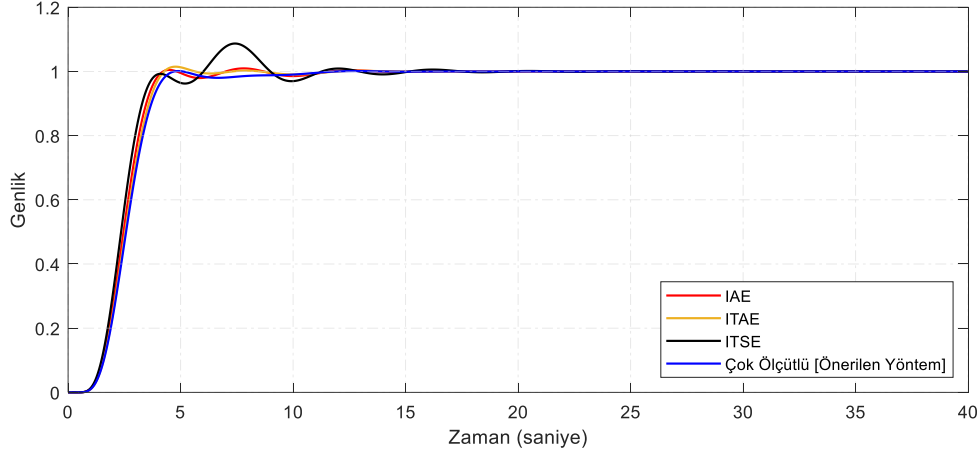


Şekil 9:
Parametre değişimlerine göre elde edilen birim basamak cevap eğrileri (Örnek-2)



Şekil 10:
Zaman parametresi değişimine göre elde edilen birim basamak cevap eğrileri (Örnek-2)

Ek olarak, amaç fonksiyonlarının karşılaştırması Örnek 2 için de yapılmıştır. Tablo 2’de verilen PIDA kontrolörün Denklem 5’teki sisteme uygulanmasıyla elde edilen kapalı çevrim sistemlerin birim basamak cevap eğrileri Şekil 11’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, ITSE kriteri ile yaklaşık %10’luk aşım yapan bir cevap elde edilmektedir. IAE ve ITAE kriterleri ile yaklaşık %1 bir aşmaya sahip ve salınımı olan cevap eğrileri elde edildiği şekilden görülmektedir. Çok ölçütlü amaç fonksiyonu kullanılarak tasarlanan PIDA kontrolörünün, aşım olmaksızın istenen hedef değere hızlı ve istikrarlı bir şekilde yakınsadığı gözlemlenebilir.



Şekil 11:
Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan PIDA kontrolör ile elde edilen birim basamak cevap eğrileri (Örnek-2)

Kontrolü gerçekleştirilen sistemlerin zaman cevabı özelliklerine ait bilgiler ve karşılaştırma yapılan yöntemlere ait zaman cevabı özellikleri Tablo 3'te detaylı bir şekilde sunulmuştur. Tabloda yerleşme zamanı %2 tolerans değerine göre hesaplanmıştır.

Tablo 3. Zaman cevabı karakteristikleri

	Yöntem	Yerleşme zamanı	Yükselme zamanı	Aşım (%)
Örnek 1	Önerilen Yöntem	1.7167	1.0399	2.0154e-04
	ABC/PID [Bağış ve Şenberber]	3.4082	2.0692	1.8583
	PID [Malwatkar ve diğ.]	7.1990	4.2781	0.3133
	PID [Wang ve diğ.]	7.5073	4.5760	0.6786
Örnek 2	Önerilen Yöntem	4.2670	2.1166	0.1222
	ABC/PID [Bağış ve Şenberber]	4.9445	2.3726	1.3167
	PID [Karimi ve diğ.]	9.5067	4.7951	0.6970
	PID [Wang ve diğ.]	11.4226	3.4325	5.1763

4. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, zaman gecikmesine sahip yüksek dereceden salınımlı sistemlerin kontrolü hibrit algoritma tabanlı bir yöntemle tasarlanan PIDA kontrolör ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, zaman cevabı karakteristiklerine dayanan çok ölçütlü bir amaç fonksiyonu önerilmiştir. Çalışmada, önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için zaman cevabı ve dayanıklılık analizlerinin yapıldığı iki benzetim çalışması sunulmuştur. Yapılan çalışmanın sonuçları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Öncelikle, ateşböceği ve genetik algoritmanın avantajlarını bir araya getiren hibrit algoritmanın çok küçük iterasyon değerlerinde sonuca ulaştığı gözlenmiştir.
- Önerilen yöntemin, zaman gecikmesine sahip yüksek dereceden salınımlı sistemlerin zaman cevabında geçici ve kalıcı durum parametrelerini geliştirdiği gözlenmiştir.
- Örnek sistemler için parametre belirsizliği durumlarının var olması halinde, tasarlanan PIDA kontrolörün performansı incelenmiş ve başarılı bir kontrol gerçekleştirdiği gözlenmiştir.
- Önerilen çok ölçütlü amaç fonksiyonu çeşitli integral performans kriterleri ile karşılaştırılmış ve özellikle aşırımsız cevap eğrileri elde edilmiştir.

Sonuç olarak, zaman gecikmesine sahip yüksek dereceden salınımlı sistemlerin kontrolü önerilen yöntemle hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirildi.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Yazar Tufan DOĞRUER, çalışmanın tüm süreçlerinde katkıda bulunmuştur ve çalışmanın her yönünden sorumludur.

KAYNAKLAR

1. Al-Thanoon, N.A., Qasim, O.S. ve Algamal, Z.Y. (2019) A new hybrid firefly algorithm and particle swarm optimization for tuning parameter estimation in penalized support vector machine with application in chemometrics, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 184, 142-152. doi:10.1016/j.chemolab.2018.12.003
2. Arulvadivu, J., Manoharan, S., Lal Raja Singh, R. ve Giriprasad, S. (2022) Optimal design of proportional integral derivative acceleration controller for higher-order nonlinear time delay system using m-MBOA technique, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, e3016. doi: 10.1002/jnm.3016
3. Aydilek, İ.B. (2017) Değiştirilmiş ateşböceği optimizasyon algoritması ile kural tabanlı çoklu sınıflama yapılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 32, 1097-1108. doi:10.17341/gazimmfd.369406
4. Bağış, A. ve Şenberber, H. (2017) ABC algorithm based PID controller design for higher order oscillatory systems, *Elektronika ir Elektrotehnika* 23. doi:10.5755/j01.eie.23.6.19688
5. Barisal, A.K., Panigrahi, T.K. ve Mishra, S. (2017) A hybrid PSO-LEVY flight algorithm based fuzzy PID controller for automatic generation control of multi area power systems: Fuzzy based hybrid PSO for automatic generation control, *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJE OE)* 6, 42-63. doi:10.4018/IJE OE.2017040103
6. Bingul, Z. ve Karahan, O. (2018a) Comparison of PID and FOPID controllers tuned by PSO and ABC algorithms for unstable and integrating systems with time delay, *Optimal Control Applications and Methods* 39, 1431-1450. doi:10.1002/oca.2419

7. Bingul, Z. ve Karahan, O. (2018b) A novel performance criterion approach to optimum design of PID controller using cuckoo search algorithm for AVR system, *Journal of the Franklin Institute* 355, 5534-5559. doi:10.1016/j.jfranklin.2018.05.056
8. Borase, R.P., Maghade, D., Sondkar, S. ve Pawar, S. (2021) A review of PID control, tuning methods and applications, *International Journal of Dynamics and Control* 9, 818-827. doi: 10.1007/s40435-020-00665-4
9. Cominos, P. ve Munro, N. (2002) PID controllers: recent tuning methods and design to specification, *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* 149, 46-53. doi: 10.1049/ipcta:20020103
10. Dal-Young, H., Ihn-Yong, L., Young-Seung, C., Young-Do, L. ve Boo-Kwi, C. (2001) The design of PIDA controller with pre-compensator [for induction motors], Paper presented at the *ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No. 01TH8570)*. doi:10.1109/ISIE.2001.931570
11. Das, S., Saha, S., Das, S. ve Gupta, A. (2011) On the selection of tuning methodology of FOPID controllers for the control of higher order processes, *ISA transactions* 50, 376-388. doi:10.1016/j.isatra.2011.02.003
12. Donuk, K., Özbey, N., İnan, M., Yeroğlu, C. ve Hanbay, D. (2018) Investigation of PIDA Controller Parameters via PSO Algorithm, Paper presented at the *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*. doi:10.1109/IDAP.2018.8620871
13. Ekinci, S., Izci, D. ve Hekimoğlu, B. (2021) 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* 46, 1395-1409. doi: 10.1007/s13369-020-05050-z
14. Ekinci, S., Izci, D. ve Kayri, M. (2022) An effective controller design approach for magnetic levitation system using novel improved manta ray foraging optimization, *Arabian Journal for Science and Engineering* 47, 9673-9694. doi:10.1007/s13369-021-06321-z
15. Gai, W., Qu, C., Liu, J. ve Zhang, J. (2018) A novel hybrid meta-heuristic algorithm for optimization problems, *Systems Science & Control Engineering* 6, 64-73. doi: 10.1080/21642583.2018.1531359
16. Gaidhane, P.J. ve Nigam, M.J. (2018) A hybrid grey wolf optimizer and artificial bee colony algorithm for enhancing the performance of complex systems, *Journal of computational science* 27, 284-302. doi:10.1016/j.jocs.2018.06.008
17. Goldberg, D.E. ve Deb, K. (1991) A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. In *Foundations of genetic algorithms*, Volume 1. (Elsevier), pp. 69-93.
18. Gupta, D.K., Soni, A.K., Jha, A.V., Mishra, S.K., Appasani, B., Srinivasulu, A., Bizon, N. ve Thounthong, P. (2021) Hybrid gravitational–firefly algorithm-based load frequency control for hydrothermal two-area system, *Mathematics* 9, 712. doi:10.3390/math9070712
19. Hekimoğlu, B. (2019) Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system, *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 41, 1761-1771. doi:10.1177/0142331218811453
20. Hekimoğlu, B. (2020) Çekirge optimizasyon algoritması kullanılarak çok makinalı güç sistemi için gürbüz kesir dereceli PID kararlı kılıcısı tasarımı, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 35, 165-180. doi:10.17341/gazimmfd.449685
21. Holland, J.H. (1992) *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, (MIT press).

22. Izci, D., Ekinci, S. ve Hekimoğlu, B. (2022a) A novel modified Lévy flight distribution algorithm to tune proportional, integral, derivative and acceleration controller on buck converter system, *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 44, 393-409. doi:10.1177/01423312211036591
23. Izci, D., Hekimoglu, B. ve Ekinci, S. (2022b) A new artificial ecosystem-based optimization integrated with Nelder-Mead method for PID controller design of buck converter. *Alexandria Eng J* 61: 2030–2044. doi:10.1016/j.aej.2021.07.037
24. Izci, D., Ekinci, S. ve Mirjalili, S. (2022c) Optimal PID plus second-order derivative controller design for AVR system using a modified Runge Kutta optimizer and Bode's ideal reference model, *International Journal of Dynamics and Control*, 1-18. doi:10.1007/s40435-022-01046-9
25. Izci, D., Ekinci, S., Kayri, M. ve Eker, E. (2022d) A novel improved arithmetic optimization algorithm for optimal design of PID controlled and Bode's ideal transfer function based automobile cruise control system, *Evolving Systems* 13, 453-468. doi:10.1007/s12530-021-09402-4
26. Jitwang, T. ve Puangdownreong, D. (2020) Application of cuckoo search to robust PIDA controller design for liquid-level system, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* 16, 189-205. doi:10.24507/ijicic.16.01.189
27. Joseph, S.B., Dada, E.G., Abidemi, A., Oyewola, D.O. ve Khammas, B.M. (2022) Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems, *Heliyon*, e09399. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e09399
28. Jung, S. ve Dorf, R.C. (1996) Analytic PIDA controller design technique for a third order system, Paper presented at the *Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control*. doi:10.1109/CDC.1996.573472
29. Karimi, A., Garcia, D. ve Longchamp, R. (2003) PID controller tuning using Bode's integrals, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 11, 812-821. doi:10.1109/TCST.2003.815541
30. Khadanga, R.K. ve Satapathy, J.K. (2015) A new hybrid GA–GSA algorithm for tuning damping controller parameters for a unified power flow controller, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 73, 1060-1069. doi:10.1016/j.ijepes.2015.07.016
31. Kumar, M. ve Hote, Y.V. (2020) Robust PIDD2 controller design for perturbed load frequency control of an interconnected time-delayed power systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 29, 2662-2669. doi:10.1109/TCST.2020.3043447
32. Kumar, M. ve Hote, Y.V. (2021) Real-time performance analysis of PIDD2 controller for nonlinear twin rotor TITO aerodynamical system, *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 101, 1-16. doi:10.1007/s10846-021-01322-4
33. Latha, K., Rajinikanth, V. ve Surekha, P. (2013) PSO-based PID controller design for a class of stable and unstable systems, *International Scholarly Research Notices* 2013. doi:10.1155/2013/543607
34. Lurang, K., Thammarat, C., Hlangnamthip, S. ve Puangdownreong, D. (2019) Optimal design of two-degree-of-freedom PIDA controllers for liquid-level system by bat-inspired algorithm, *Int J Circuits Syst SignProcess* 13, 34-39.
35. Malwatkar, G., Sonawane, S. ve Waghmare, L. (2009) Tuning PID controllers for higher-order oscillatory systems with improved performance, *ISA transactions* 48, 347-353. doi:10.1016/j.isatra.2009.04.005

36. Masouleh, M.F., Kazemi, M.A., Alborzi, M. ve Eshlaghy, A.T. (2016) A Genetic-Firefly Hybrid Algorithm to Find the Best Data Location in a Data Cube, *Engineering, Technology & Applied Science Research* 6, 1187-1194.
37. Mosaad, A.M., Attia, M.A. ve Abdelaziz, A.Y. (2019) Whale optimization algorithm to tune PID and PIDA controllers on AVR system, *Ain Shams Engineering Journal* 10, 755-767. doi:10.1016/j.asej.2019.07.004
38. Rahmani, A. ve MirHassani, S. (2014) A hybrid firefly-genetic algorithm for the capacitated facility location problem, *Information Sciences* 283, 70-78. doi:10.1016/j.ins.2014.06.002
39. Raju, M., Saikia, L.C. ve Sinha, N. (2016) Automatic generation control of a multi-area system using ant lion optimizer algorithm based PID plus second order derivative controller, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 80, 52-63. doi: 10.1016/j.ijepes.2016.01.037
40. Rodriguez, F.J., Garcia-Martinez, C. ve Lozano, M. (2012) Hybrid metaheuristics based on evolutionary algorithms and simulated annealing: taxonomy, comparison, and synergy test, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 16, 787-800. doi:10.1109/TEVC.2012.2182773
41. Sharma, A., Sharma, H., Bhargava, A. ve Sharma, N. (2016) Optimal design of PIDA controller for induction motor using spider monkey optimization algorithm, *International Journal of Metaheuristics* 5, 278-290. doi:10.1504/IJMHEUR.2016.081156
42. Ting, T., Yang, X.-S., Cheng, S. ve Huang, K. (2015) Hybrid metaheuristic algorithms: past, present, and future, *Recent advances in swarm intelligence and evolutionary computation*, 71-83.
43. Wang, Q.-G., Lee, T.-H., Fung, H.-W., Bi, Q. ve Zhang, Y. (1999) PID tuning for improved performance, *IEEE Transactions on control systems technology* 7, 457-465. doi:10.1109/87.772161
44. Wang, R., Tan, C., Xu, J., Wang, Z., Jin, J. ve Man, Y. (2017) Pressure control for a hydraulic cylinder based on a self-tuning PID controller optimized by a hybrid optimization algorithm, *Algorithms* 10, 19. doi:10.3390/a10010019
45. Yakout, A.H., Attia, M.A. ve Kotb, H. (2021) Marine predator algorithm based cascaded PIDA load frequency controller for electric power systems with wave energy conversion systems, *Alexandria Engineering Journal* 60, 4213-4222. doi:10.1016/j.aej.2021.03.011
46. Yang, R., Liu, Y., Yu, Y., He, X. ve Li, H. (2021) Hybrid improved particle swarm optimization-cuckoo search optimized fuzzy PID controller for micro gas turbine, *Energy Reports* 7, 5446-5454. doi:10.1016/j.egyr.2021.08.120
47. Yang, X.-S. (2010) Nature-inspired metaheuristic algorithms, (Luniver press).
48. Zervoudakis, K., Tsafarakis, S. ve Paraskevi-Panagiota, S. (2019) A new hybrid firefly-genetic algorithm for the optimal product line design problem, Paper presented at the *International Conference on Learning and Intelligent Optimization*.

