

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ORANSAL İNTEGRAL TÜREVSEL DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN SEZGİSEL
OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ İLE AYARLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan TEKİN

**EKİM 2024
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ORANSAL İNTEGRAL TÜREVSEL DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN SEZGİSEL
OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ İLE AYARLANMASI**

Sinan TEKİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"ELEKTRİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 30 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı kapsamında hazırlanmış olan bu tezde oransal integral türevsel denetleyicinin kazanç sabitleri sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılarak ayarlanmıştır. Denetleyici parametreleri hata alanı tabanlı uygunluk fonksiyonları ile en iyileştirilmiş ve üç test sistemi üzerinde yapılan benzetim çalışmalarında parametre ayarlaması ile kontrol başarımının belirgin bir şekilde arttığı tespit edilmiştir.

Tez çalışmam boyunca akademik desteği ve kıymetli katkılarıyla her zaman yanımda olan danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR’a gönülden teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili aileme ise en derin şükranlarımı sunarım.

Sinan TEKİN
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Oransal İntegral Türevsel Denetleyici Parametrelerinin Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri ile Ayarlanması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 30/10/2024

Sinan TEKİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Özeti	2
1.3. Kapalı Çevrim Sistemler	5
1.4. PID Kontrol	6
1.4.1. Oransal Eylem	6
1.4.2. İntegral Eylemi	7
1.4.3. Türevsel Eylem	7
1.4.4. PID Denetleyici	8
1.5. Süreç Modelleri ve Süreç Modellerinin Sınıflandırılması	9
1.6. Kıyas Modelleri	10
1.7. Hata Alanı Tabanlı Performans Metrikleri	10
1.8. PID Kazanç Sabitlerinin Ayarlanması	11
1.8.1. Ziegler-Nichols Yöntemi	11
1.8.2. Cohen-Coon Yöntemi	13
1.8.3. PID Parametrelerinin Dahili Model Kontrolü ile Belirlenmesi	14
1.8.4. Lamda Ayarlama Yöntemi	14
1.8.5. Yaklaşık M-Sınırlı İntegral Kazancı Optimizasyonu	15
1.9. Parçacık Sürüşü Optimizasyonu	15
1.10. Radyal Hareket Optimizasyonu	17
1.10.1. RHO Algoritmasında Parçacıklara İlk Değerlerinin Verilmesi	18
1.10.2. RHO Algoritmasında Parçacıkların Hareketi	19
1.11. Farksal Gelişim Algoritması	20
1.11.1. FG Algoritmasında Mutasyon İşlemi	20
1.11.2. FG Algoritmasında Çaprazlama İşlemi	21
1.11.3. FG Algoritmasında Seçme İşlemi	21
1.12. Genetik Algoritmalar	22
1.12.1. Genetik Algoritmalarda Kromozom Kodlama	22

1.12.2. Genetik Algoritmelerde Başlatma İşlemi	22
1.12.3. Genetik Algoritmelerde Seçim İşlemi	23
1.12.4. Genetik Algoritmelerde Genetik Değişim İşlemi	23
1.12.5. Genetik Algoritmelerde Mutasyon İşlemi	23
1.12.6. Genetik Algoritmelerde Değerlendirme İşlemi	24
1.12.7. Genetik Algoritmelerde Ekleme İşlemi	24
1.12.8. Genetik Algoritmelerde Sonlandırma İşlemi	24
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME	25
2.1. Giriş	25
2.2. Ziegler-Nichols Yöntemi ile PID Parametrelerinin Ayarlanması	25
2.3. PID Denetleyici Parametrelerinin PSO ile Optimize Edilmesi	28
2.4. PID Denetleyici Parametrelerinin RHO ile Optimize Edilmesi	37
2.5. PID Denetleyici Parametrelerinin DRHO ile Optimize Edilmesi	46
2.6. PID Kazanç Faktörlerinin FG ile Optimize Edilmesi	55
2.7. PID Kazanç Faktörlerinin GA ile Optimize Edilmesi	64
2.8. Parametre Ayarlama Yöntemlerinin Başarımlarının Kıyaslanması	73
2.8.1. IAE Kıstasına Göre Algoritmaların Başarımlarının Kıyaslanması	73
2.8.2. ISE Kıstasına Göre Algoritmaların Başarımlarının Kıyaslanması	75
2.8.3. ITAE Kıstasına Göre Algoritmaların Başarımlarının Kıyaslanması	76
2.8.4. ITSE Performans Kıstasına Yöntemlerin Başarımlarının Kıyaslanması	77
2.9. Sezgisel Optimizasyon Yöntemlerinin Yakınsamalarının Kıyaslanması	79
3. SONUÇLAR	86
4. ÖNERİLER	88
5. KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

ORANSAL İNTEGRAL TÜREVSEL DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ İLE AYARLANMASI

Sinan TEKİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR
2024, 95 Sayfa

Teknolojik yenilikler ve gelişime paralel olarak günümüzde otomatik kontrol sistemlerine duyulan gereksinim hızla artmaktadır. Kontrol sistemleri, üretim süreçlerinin hızını, doğruluğunu ve güvenilirliğini artırırken, aynı zamanda maliyetleri de düşürmektedir. Literatürde çeşitli oransal kontrol yöntemleri bulunmakla birlikte, en yaygın kullanılan yöntemlerden biri oransal integral türevsel (*Proportional Integral Derivative*, PID) kontrolüdür. PID denetim, sistem hatasına dayalı bir yöntem olduğu için kontrol edilen sistemin matematiksel modelinin bilinmesine ihtiyaç duymaz. Bu yöntemde, oransal eylem hatanın genliğine, integral bileşeni hatanın alanına ve türevsel eylem ise hatanın eğimine göre kontrol işaretine katkıda bulunur. İntegral bileşeni hatanın geçmişi, oransal bileşen mevcut durumunu ve türevsel bileşen ise geleceğini dikkate alarak, uygun kontrol sinyallerinin üretilmesini sağlar. PID denetimde bu üç eylemin sistem çıkışı üzerindeki etkisi kazanç faktörleri ile belirlenir. Kazanç faktörlerinin doğru seçimi, sistemin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlarken, yanlış seçilmesi ise sistemin kararsız duruma geçmesine neden olabilir.

Bu yüksek lisans tezinde, belirlenmiş üç farklı test sisteminin kontrolü PID denetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PID denetleyicinin performansını artırmak amacıyla kazanç faktörleri, Ziegler-Nichols adım cevabı, parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), radyal hareket optimizasyonu (RHO), değiştirilmiş radyal hareket optimizasyonu (DRHO), farksal gelişim (FG) ve genetik algoritma (GA) ile optimize edilmiştir. Sezgisel optimizasyon yöntemleri ile kazanç sabitlerinin ayarlanmasında, mutlak hata toplamı, hata karesi toplamı, zaman ağırlıklı mutlak hata toplamı ve zaman ağırlıklı hata karesi toplamı olmak üzere dört farklı performans kriteri kullanılmıştır. İlk olarak, bu beş sezgisel optimizasyon algoritması destekli PID denetleyicinin başarımı belirlenen hata kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. Ardından, optimizasyon yöntemlerinin birbirlerine göre performansları analiz edilmiştir.

Literatürde PID denetleyici parametrelerinin PSO, FG, GA ve RHO yöntemleriyle optimize edilmesine ilişkin birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak, PID denetleyici kazanç faktörlerinin DRHO algoritması ile optimize edilmesine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yenilik, sunulan yüksek lisans tezinin literatüre yaptığı en önemli katkıdır.

Anahtar Kelimeler: Parametre optimizasyonu, Sezgisel optimizasyon algoritmaları, Oransal integral türevsel denetim, Stokastik yöntemler

SUMMARY

TUNING PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE CONTROLLER PARAMETERS BY INTUITIVE OPTIMIZATION METHODS

Sinan TEKİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Oğuzhan ÇAKIR
2024, 95 Pages

In parallel with technological innovations and developments, the demand for automatic control systems has rapidly increased in recent years. Control systems enhance the speed, accuracy, and reliability of production processes while reducing costs. Although various proportional control methods are available in the literature, the Proportional Integral Derivative (PID) control is one of the most widely used methods. PID control is a method based on system error that does not require the mathematical model of the controlled system to be known. In this method, the proportional action contributes to the control signal based on the error magnitude, integral component based on the error area, and derivative action based on the slope of the error. The integral component considers the past error, the proportional component reflects the current state, and the derivative component anticipates future errors, enabling the generation of appropriate control signals. In the PID control, the influence of these three actions on the system output is determined by the gain factors. The proper selection of gain factors ensures stable system operation, whereas incorrect selection may lead to instability.

In this study, three different test systems were controlled using a PID controller. To improve the performance of the PID controller, the gain factors were optimized using Ziegler-Nichols step response, Particle Swarm Optimization (PSO), Radial Movement Optimization (RHO), Modified Radial Movement Optimization (DRHO), Differential Evolution (DE), and Genetic Algorithm (GA). During the gain-tuning process using heuristic optimization methods, four performance criteria were utilized: total absolute error, total squared error, time-weighted total absolute error, and time-weighted total squared error. Initially, the performance of the PID controller supported by these five heuristic optimization algorithms was compared based on specified error criteria. Subsequently, the performances of the optimization methods were analyzed.

Numerous studies have focused on optimizing PID controller parameters using the PSO, DE, GA, and RHO methods. However, no studies have been conducted on optimizing PID controller gain factors using the DRHO algorithm. This innovation represents the most significant contribution of this master's thesis to existing literature.

Key Words: Parameter Optimization, Heuristic Optimization Algorithms, Proportional Integral Derivative Control, Stochastic Methods

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kapalı çevrim kontrol sistemi	5
Şekil 2. PID denetleyicinin blok şeması	8
Şekil 3. Ziegler-Nichols yöntemi ile PID parametrelerinin belirlenmesi	12
Şekil 4. Kazanç faktörleri Ziegler-Nichols adım tepkisi tekniğiyle hesaplanan PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin adım tepkisi	26
Şekil 5. Kazanç faktörleri Ziegler-Nichols adım tepkisi tekniğiyle hesaplanan PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin adım tepkisi	26
Şekil 6. Kazanç faktörleri Ziegler-Nichols adım tepkisi tekniğiyle hesaplanan PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin adım tepkisi	27
Şekil 7. Kazanç faktörleri PSO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	29
Şekil 8. Kazanç faktörleri PSO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	29
Şekil 9. Kazanç faktörleri PSO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	30
Şekil 10. Kazanç faktörleri PSO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	30
Şekil 11. Kazanç faktörleri PSO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	32
Şekil 12. Kazanç faktörleri PSO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	32
Şekil 13. Kazanç faktörleri PSO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	33
Şekil 14. Kazanç faktörleri PSO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	33

Şekil 15. Kazanç faktörleri PSO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	35
Şekil 16. Kazanç faktörleri PSO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	35
Şekil 17. Kazanç faktörleri PSO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	36
Şekil 18. Kazanç faktörleri PSO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	36
Şekil 19. Kazanç faktörleri RHO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	38
Şekil 20. Kazanç faktörleri RHO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	38
Şekil 21. Kazanç faktörleri RHO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	39
Şekil 22. Kazanç faktörleri RHO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	39
Şekil 23. Kazanç faktörleri RHO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	41
Şekil 24. Kazanç faktörleri RHO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	41
Şekil 25. Kazanç faktörleri RHO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	42
Şekil 26. Kazanç faktörleri RHO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	42
Şekil 27. Kazanç faktörleri RHO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	44
Şekil 28. Kazanç faktörleri RHO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	44

Şekil 29. Kazanç faktörleri RHO ile ITAE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	45
Şekil 30. Kazanç faktörleri RHO ile ITSE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	45
Şekil 31. Kazanç faktörleri DRHO ile IAE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	47
Şekil 32. Kazanç faktörleri DRHO ile ISE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	47
Şekil 33. Kazanç faktörleri DRHO ile ITAE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	48
Şekil 34. Kazanç faktörleri DRHO ile ITSE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	48
Şekil 35. Kazanç faktörleri DRHO ile IAE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	50
Şekil 36. Kazanç faktörleri DRHO ile ISE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	50
Şekil 37. Kazanç faktörleri DRHO ile ITAE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	51
Şekil 38. Kazanç faktörleri DRHO ile ITSE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	51
Şekil 39. Kazanç faktörleri DRHO ile IAE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	53
Şekil 40. Kazanç faktörleri DRHO ile ISE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	53
Şekil 41. Kazanç faktörleri DRHO ile ITAE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	54
Şekil 42. Kazanç faktörleri DRHO ile ITSE performans kıstasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	54

Şekil 43.	Kazanç faktörleri FG ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	56
Şekil 44.	Kazanç faktörleri FG ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	56
Şekil 45.	Kazanç faktörleri FG ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	57
Şekil 46.	Kazanç faktörleri FG ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	57
Şekil 47.	Kazanç faktörleri FG ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	59
Şekil 48.	Kazanç faktörleri FG ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	59
Şekil 49.	Kazanç faktörleri FG ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	60
Şekil 50.	Kazanç faktörleri FG ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	60
Şekil 51.	Kazanç faktörleri FG ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	62
Şekil 52.	Kazanç faktörleri FG ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	62
Şekil 53.	Kazanç faktörleri FG ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	63
Şekil 54.	Kazanç faktörleri FG ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	63
Şekil 55.	Kazanç faktörleri GA ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	65
Şekil 56.	Kazanç faktörleri GA ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	65

Şekil 57. Kazanç faktörleri GA ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	66
Şekil 58. Kazanç faktörleri GA ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	66
Şekil 59. Kazanç faktörleri GA ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	68
Şekil 60. Kazanç faktörleri GA ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	68
Şekil 61. Kazanç faktörleri GA ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	69
Şekil 62. Kazanç faktörleri GA ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	69
Şekil 63. Kazanç faktörleri GA ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	71
Şekil 64. Kazanç faktörleri GA ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	71
Şekil 65. Kazanç faktörleri GA ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	72
Şekil 66. Kazanç faktörleri GA ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi	72
Şekil 67. 1. sistemin IAE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması	79
Şekil 68. 1. sistemin ISE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması	80
Şekil 69. 1. sistemin ITAE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması	80
Şekil 70. 1. sistemin ITSE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması	81
Şekil 71. 2. sistemin IAE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması	81

Şekil 72.	2. sistemin ISE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması	82
Şekil 73.	2. sistemin ITAE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması	82
Şekil 74.	2. sistemin ITSE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması	83
Şekil 75.	3. sistemin IAE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması	83
Şekil 76.	3. sistemin ISE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması	84
Şekil 77.	3. sistemin ITAE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması	84
Şekil 78.	3. sistemin ITSE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması	85

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Kazanç sabitlerinin sistem tepkisi üzerindeki etkisi	9
Tablo 2. 134 kıyas süreç modeli	10
Tablo 3. Ziegler-Nichols adım cevabı ile bulunan kazanç sabitleri	12
Tablo 4. Ziegler-Nichols frekans cevabı ile bulunan kazanç sabitleri	13
Tablo 5. Cohen-Coon yöntemi ile bulunan PID parametreleri	13
Tablo 6. PSO algoritması	17
Tablo 7. Ziegler-Nichols yöntemi ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri	27
Tablo 8. Birinci sistem için PSO simülasyon parametreleri	28
Tablo 9. 1. sistem için PSO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri	31
Tablo 10. 2. sistem için PSO benzetim parametreleri	31
Tablo 11. İkinci sistem için PSO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri	34
Tablo 12. 3. sistem için PSO benzetim parametreleri	34
Tablo 13. 3. sistem için PSO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri	37
Tablo 14. 1. sistem için RHO benzetim parametreleri	37
Tablo 15. 1. sistem için RHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri	40
Tablo 16. 2. sistem için RHO benzetim parametreleri	40
Tablo 17. 2. sistem için RHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri	43
Tablo 18. 3. sistem için RHO benzetim parametreleri	43
Tablo 19. 3. sistem için RHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri	46
Tablo 20. 1. sistem için DRHO benzetim parametreleri	46
Tablo 21. 1. sistem için DRHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri	49
Tablo 22. 2. sistem için DRHO benzetim parametreleri	49
Tablo 23. 2. sistem için DRHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri	52
Tablo 24. 3. sistem için DRHO benzetim parametreleri	52
Tablo 25. 3. sistem için DRHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri	55

Tablo 26. 1. sistem için FG benzetim parametreleri	55
Tablo 27. 1. sistem için FG ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımların değerleri	58
Tablo 28. 2. sistem için FG benzetim parametreleri	58
Tablo 29. 2. sistem için FG ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımların değerleri	61
Tablo 30. 3. sistem için FG benzetim parametreleri	61
Tablo 31. 3. sistem için FG ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımların değerleri	64
Tablo 32. 1. sistem için GA benzetim parametreleri	64
Tablo 33. 1. sistem için GA ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımların değerleri	67
Tablo 34. 2. sistem için GA benzetim parametreleri	67
Tablo 35. 2. sistem için GA ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımların değerleri	70
Tablo 36. 3. sistem için GA benzetim parametreleri	70
Tablo 37. 3. sistem için GA ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımların değerleri	73
Tablo 38. 1. sistem için IAE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	73
Tablo 39. 2. sistem için IAE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	74
Tablo 40. 3. için IAE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	74
Tablo 41. 1. sistem için ISE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	75
Tablo 42. İkinci sistem için ISE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	75
Tablo 43. Son sistem için ISE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	76
Tablo 44. 1. sistem için ITAE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	76
Tablo 45. 2. sistem için ITAE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	77
Tablo 46. 3. sistem için ITAE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	77
Tablo 47. 1. sistem için ITSE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	78
Tablo 48. 2. sistem için ITSE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	78
Tablo 49. 3. sistem için ITSE performans kriterine göre algoritmaların karşılaştırılması	79

SEMBOLLER DİZİNİ

a	: Alt limit vektörü
b	: Üst limit vektörü
BDZG	: Birinci dereceden zaman gecikmeli
BPSO	: Basitleştirilmiş parçacık sürüsü optimizasyonu
BT	: Benzetimli tavlama
$C(s)$	: Denetleyicinin transfer fonksiyonu
C_1	: 1. ağırlıklandırma sabiti
C_2	: 2. ağırlıklandırma sabiti
cp	: Merkez nokta
C_r	: Çaprazlama oranı
D	: Boyut
d	: Rastgele parametre indeks değeridir.
DKD	: Doğrusal karesel düzenleyici
DMK	: Dahili model kontrolü
DOİT	: Değiştirilmiş oransal integral türevsel
DOOİT	: Doğrusal olmayan oransal integral
DZN	: Değiştirilmiş Ziegler-Nichols
e	: Hata
F	: Ağırlıklandırma sabiti
$F(s)$	: Filtre transfer fonksiyonu
FDAM	: Fırçasız doğru akım motorunun
FG	: Farksal gelişim
GA	: Genetik algoritma
g_{best}	: Sürünün en iyi uygunluk değerini veren konumu
GFG	: Geliştirilmiş farksal gelişim
GPSO	: Geliştirilmiş parçacık sürüsü optimizasyonu
HKT	: Hata karesinin toplamı,
I	: İntegral eylemini,
i	: Parçacık/birey indisi

$\dot{IDZG}$	: İkinci dereceden zaman gecikmeli
j	: Boyut indisi
k	: Yineleme indisi
KA	: Kültürel algoritma
KDOİT	: Kesir dereceli oransal integral türevsel
KHT	: Karesel hata toplamı
K_i	: İntegral kazanç sabitini
k_{max}	: Yineleme indisinin üst sınırı
K_p	: Oransal kazanç sabiti
KPSO	: Kaotik parçacık sürüsü optimizasyonu
K_s	: Statik kazanç
K_u	: Esas kazanç
L	: Zaman gecikmesi
MGNT	: Maksimum güç noktası takipçisi
MHT	: Mutlak hata toplamı
NGBT	: Nicel geri besleme teorisi
O	: Oransal eylem
OİT	: Oransal integral türevsel
$P(s)$	: Sistemin transfer fonksiyonu
p_{best}	: Parçacığın en iyi uygunluk değerini veren konumu
PSO	: Parçacık sürüsü optimizasyonu
r	: Referans değer
$rand_1$	: 0 ile 1 arasında uniform dağılımlı rastgele reel üretici
$rand_2$	: 0 ile 1 arasında uniform dağılımlı rastgele reel üretici
REA	: Rastgele eylemsizlik ağırlığı
RHO	: Radyal hareket optimizasyonu
SMDAM	: Sabit mıknatıslı doğru akım motor
t	: Zamanı göstermektedir.
T	: Zaman sabiti
T_1	: 1. zaman sabiti
T_2	: 2. zaman sabiti
T_u	: Esas periyot
u	: Kontrol sinyali

U	: Mutant matrisi
UEA	: Uyarlanır eylemsizlik ağırlığı
UPSO	: Uyarlanır parçacık sürüsü optimizasyonu
v	: Mutant vektörü
V	: Deneme matrisi
v_i	: hız vektörü
V_{ij}	: Hız matrisi
$V_{max(j)}$	: Parçacığın j boyutundaki maksimum hızı
W	: Eylemsizlik ağırlığı
W_{max}	: Eylemsizlik ağırlığının üst sınırı
W_{min}	: Eylemsizlik ağırlığının alt sınırı
X	: Konum matrisi
x	: Gen
x_i	: Konum vektörü
$X_{max(j)}$	: Parçacığın j boyutunun üst sınırı ve
$X_{min(j)}$	: Parçacığın j boyutunun alt sınırı,
y	: Kontrol edilen değişken
YMİKO	: Yaklaşık M-sınırlı integral kazancı optimizasyonu ()
z	: Kontrol edilen değişkeni
ZAKHT	: Zaman ağırlıklı hata karesi toplamı
ZAMHT	: Zaman ağırlıklı mutlak hata toplamı
ZN	: Ziegler-Nichols
β	: Kazancı sabiti
κ	: Bağlı ölü zaman
λ	: Ayar parametresi
λ_{IMC}	: DMK yönteminin ayar parametresi
ϕ_1	: 1. öğrenme sabiti
ϕ_2	: 2. öğrenme sabiti

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte otomatik kontrol sistemlerine duyulan gereksinim önemli ölçüde artmıştır. Bu sistemler, üretim süreçlerinin hızını, doğruluğunu ve güvenilirliğini artırırken, aynı zamanda maliyetleri de azaltmaktadır. Uygulama kolaylığı ve basitliğinden dolayı en yaygın kullanılan kontrol yöntemlerinden biri açık-kapalı kontroldür (Gille & Paquet, 1962; Jing vd., 2011; Koswara & Nagy, 2017). Bu teknikte, sistemi denetlemek için iki kademeli bir son kontrol elemanı yeterlidir. Ancak bu yaklaşımda, sistem çıkışı referans değere tam olarak sabitlenemez, çünkü son kontrol elemanının yalnızca tamamen açık ya da kapalı olması, süreç değişkenini ayar noktasına getirmek için yeterli değildir. Bu nedenle, sistem çıkışı, referans değer etrafında denetim süreci boyunca salınım yapar. Son kontrol elemanlarının oransal olarak çalıştığı sistemlerde oransal denetim yapmak mümkündür. Literatürde çok sayıda oransal kontrol yöntemi mevcuttur ve bunlar arasında en yaygın kullanılanı, Oransal integral türevsel (*Proportional Integral Derivative*, PID) kontroldür (Zhang & Furusho, 2000; Ho & Tu, 2006; Chee vd., 2004). Üç kontrol eylemini de bir arada içerdiği için bu yöntem "*üç modlu kontrol*" olarak da adlandırılır. PID kontrol, hata tabanlı bir yöntem olduğu için denetlenecek sistemin matematiksel modelinin bilinmesine gerek duymaz. Bu yöntemde oransal bileşen (P) sistem hatasının genliğine, integral bileşeni (I) hata alanına ve türevsel bileşen (D) ise hatanın değişimine göre kontrol işaretine katkıda bulunur. İntegral eylemi, sistem hatasının geçmişini, oransal bileşen anlık değerini ve türevsel eylem ise hatanın geleceğini referans alır. Böylece PID denetleyici, hatanın geçmişi, şu anki değeri ve geleceğine göre uygun kontrol sinyallerini üretir. PID denetimin başarımı, kazanç faktörlerine bağlıdır. Uygun şekilde seçilen kazanç faktörleri etkin bir denetim sağlarken, hatalı değerler sistemin kararsız hale geçmesine neden olabilir. Bu faktörlerin doğru belirlenmesi deneme-yanılma yöntemiyle yapılabileceği gibi genetik algoritmalar (Trebi-Ollennu & White, 1997; Mills vd., 2015), farksal gelişim (Thangaraj vd., 2011; Fokas, 2002), yapay karınca kolonisi (Sethi & Singhal, 2017; Boudardara & Gorkemli, 2018), yapay arı kolonisi (dos Santos & Alotto, 2011; Zhang vd., 2018), yapay sinir ağları (Turkmen & Guney, 2004; Aggarwal & Song, 1997) ve parçacık sürüsü optimizasyonu

(Zhang & Wu, 2012; Lee, 2008) gibi sezgisel optimizasyon algoritmalarıyla da gerçekleştirilebilir.

Bu yüksek lisans tezinde, belirlenen üç farklı test sisteminin kontrolü PID denetleyici ile gerçekleştirilmiştir. PID denetleyicinin performansını artırmak için kazanç parametreleri, Ziegler-Nichols (ZN) adım cevabı, *parçacık sürüsü optimizasyonu* (PSO), *radyal hareket optimizasyonu* (RHO), *değiştirilmiş radyal hareket optimizasyonu* (DRHO), *farksal gelişim* (FG) ve *genetik algoritma* (GA) ile optimize edilmiştir. Sezgisel optimizasyon algoritmalarında uygunluk fonksiyonu olarak, *mutlak hata toplamı* (IAE), *hata karesi toplamı* (ISE), *zaman ağırlıklı mutlak hata toplamı* (ITAE) ve *zaman ağırlıklı hata karesi toplamı* (ITSE) olmak üzere dört farklı performans metriği kullanılmıştır. Öncelikle bu beş optimizasyon algoritması destekli PID denetleyicinin başarımı belirlenen hata kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. Ardından optimizasyon yöntemlerinin performansları birbirleriyle kıyaslanmış ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Literatürde PID denetleyici parametrelerinin PSO, FG, GA ve RHO algoritmaları ile optimize edilmesine yönelik çok sayıda çalışma mevcuttur. Ancak PID kazanç sabitlerinin DRHO yöntemiyle optimize edilmesine yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yenilik sunulan tez çalışmasının literatüre sağladığı en önemli katkıdır.

1.2. Literatür Özeti

(Meshram & Kanojiya, 2012)'de Ziegler-Nichols ve değiştirilmiş Ziegler-Nichols (DZN) ayarlama yöntemleri kullanılarak PID denetleyicisi tasarlanmıştır. (Yadaiah & Malladi, 2013)'te PID denetleyiciler için yeni bir ayarlama stratejisi önerilmiş olup, DZN yönteminden farklı olarak bu stratejide integral ve türev zamanları sabit alınmamış olup, dinamik olarak ayarlanmıştır. (Anto vd., 2016)'da ZN yöntemi ile parametre ayarlamalı farklı PID kontrol stratejileri önerilmiş ve böylece şebekeye maksimum güç noktası takipçisi üzerinde bağlı güneş panellerinin başarım değerlerinde artış sağlanmıştır. (Arif vd., 2018)'de bir deniz aracının hareket kontrolünde ZN yöntemi ile parametreleri optimize edilmiş PID denetleyicisi kullanılmıştır. (Li, 2017)'de PID denetleyicinin anlık olarak parametrelerinin ayarlaması için PSO kullanılmıştır. (Solihin, 2018)'de PSO kullanılarak otomatik vinç kontrolü için yeni bir PID ayarlama yöntemi önerilmiştir. (Oi vd., 2008)'de kontrol edilen tesisin istenen adım tepkisini vermesi için gerekli olan PID denetleyicinin parametreleri PSO destekli yeni bir optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir. (Sharaf & El-

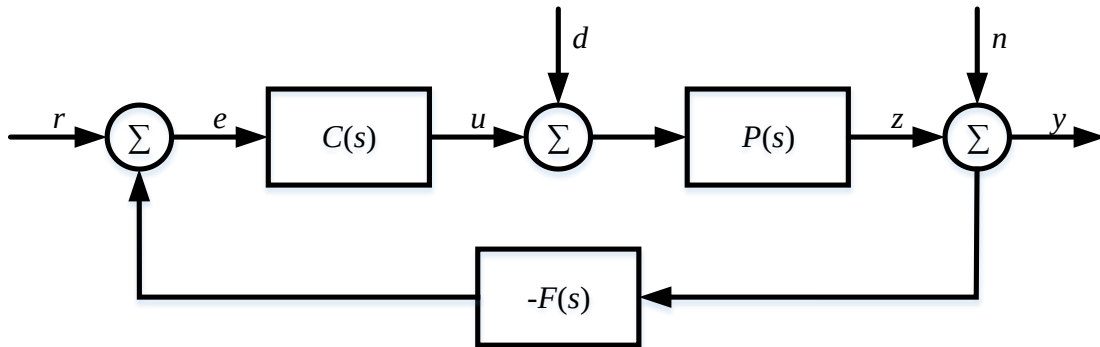
Gammal, 2009)'da büyük güçlü endüstriyel sabit mıknatıslı doğru akım motor sürücülerinin, hız denetimi için PSO destekli bir çoklu çevrimli değiştirilmiş oransal integral türevsel denetleyici önerilmiştir. Bu yöntemde altı adet darbe kontrollü tristörün ateşleme açıları PSO yöntemi ile hız, akım, akım dalgalanması ve hata karesinin toplamı kriterleri dikkate alınarak bulunmuştur. (Fang & Chen, 2009)'da genel amaçlı bir kontrol sistemi için PID parametreleri geliştirilmiş parçacık sürüsü optimizasyonu (GPSO) ve diğer PSO varyantları ile ayarlanmıştır. (Sridhar vd., 2010)'da denetleyici yapısı ve parametreleri PSO kullanılarak optimize edilmiş bir PI denetleyici önerilmiş ve tek makineli sonsuz bara sistemlerindeki dalgalanmaları bastırmak amacıyla kullanılmıştır. (Chen vd., 2011)'de PID denetleyicinin çevrimiçi parametre ayarı için PSO yaklaşımı sunulmuştur. Böylece denetleyicinin, ayar noktası veya yük değişiminin oluşturduğu bozucu etkilere rağmen giriş sinyalini takip edebildiği görülmüştür. (Bingul & Karahan, 2011)'de robot rota kontrolünde PSO ile parametreleri ayarlanmış üç denetim yöntemi birbirleri ile kıyaslanmıştır. (Geetha vd., 2012)'de PID denetleyicinin parametreleri ZN, GA ve PSO ile ayarlanmıştır. (Jaafar vd., 2012)'de doğrusal olmayan vinç kontrol sistemlerinde kullanılan optimum PID denetleyicilerin gelişimi sunulmuştur. Ayrıca PID denetleyicinin parametreleri PSO kullanılarak ayarlanmıştır. (Nema & Padhy, 2013)'te iki girişli ve iki çıkışlı bir sistem için PSO ile yeni bir PID denetleyici yaklaşımı sunulmuştur. (Nirmal & Auxillia, 2013)'te otomatik voltaj regülatörlerinin istenilen değere hızla ve en az hata ile gelmesini sağlamak amacıyla bir PID denetleyici tasarlanmıştır. Optimum başarımların elde edilmesi için PID denetleyicinin parametreleri PSO, basitleştirilmiş parçacık sürüsü optimizasyonu (BPSO) ve uyarlanırlı parçacık sürüsü optimizasyonu (UPSO) kullanılarak ayarlanmıştır. (Queen & Auxillia, 2013)'te iki damıtılmalı bir kolon tesisi için çok değişkenli bir PID denetleyici tasarlanmıştır. Oturma zamanını düşürmek için PID parametreleri PSO, ayrık ikili parçacık sürüsü optimizasyonu ve basitleştirilmiş ayrık ikili parçacık sürüsü optimizasyonu kullanılarak ayarlanmıştır. (Alrijadjis vd., 2013)'te bir ultrasonik servo motor sisteminin kontrolünde optimum PID kazanç değerleri DPSO algoritması ile bulunmuştur. Ayrıca PSO algoritmasının başarımı önerilen uyarlanırlı eylemsizlik ağırlığı ve rastgele eylemsizlik ağırlığı stratejileri ile artırılmıştır. (Mirzaei & Mojallali, 2013)'te bir yükselten dönüştürücünün optimum başlangıç cevabının elde edilmesi için sayısal PID denetleyicinin parametreleri kaotik parçacık sürüsü optimizasyonu ile ayarlanmıştır. (Bamasak & Bensenouci, 2014)'te güç sistemlerinin geçiş kararlılığını arttırmak amacıyla kesir dereceli oransal integral türevsel

(KDPID) denetleyici tasarlanmıştır. Ardında KDPID denetleyicinin parametreleri PSO kullanılarak optimize edilmiştir. (Pano & Ouyang, 2014)'da dış hat izleme uygulamaları için zaman konum bölgesi PID denetleyicinin kazanç değerleri PSO algoritması kullanılarak ayarlanmıştır. Kazanç ayarı için dış hat hatası istatistiğine dayalı yeni bir uygunluk fonksiyonu önerilmiştir. (Pano & Ouyang, 2015)'te dış hat takip edici robotik işleticilerin denetimi için PID denetleyici kazanç değerleri FG, GA ve PSO optimizasyon yöntemleri kullanılarak bulunmuştur. (Rajesh & Ananda, 2015)'te kamera konumlandırmada kullanılan bir dengeleme mekanizmasının kontrolü PID ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca geleneksel ve PSO algoritmasıyla parametre ayarı yapılmış PID denetleyicilerin başarımları kıyaslanmıştır. (Chen vd., 2016)'de fırçasız doğru akım motorunun kontrolünde kullanılan PID denetleyicinin optimum kazanç ağılıkları PSO ile bulunmuştur. (Medewar & Munje, 2016)'da ITSE başarımları kriteri kullanılarak PID denetleyicinin parametreleri PSO ile ayarlanmıştır. (Sumardi vd., 2017)'de seyrüsefer için kendinden ayarlamalı PID denetleyici parametreleri PSO kullanılarak ayarlanmıştır. (Xie & Zhang, 2019)'da zaman gecikmeli kararsız tesislerin denetimi için PID parametrelerinin ayarlanması amacıyla GPSO tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. (Rahmani & Yusof, 2014)'te doğrusal olmayan problemler için yeni bir stokastik global optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Optimum çözümü bulmak için vektör arama uzayında küresel sınırları kullanan sürü tabanlı bir tekniktir. Bu algoritmanın başlıca özellikleri, az parametre içermesi, gürbüz ve hızlı olması, düşük hafıza alanı gerektirmesi ve lokal optimumlara takılmaması olarak gösterilebilir (Rahmani vd., 2015). (Li vd., 2012)'de PID parametrelerinin ayarlanmasında geliştirilmiş farksal gelişim (GFG) algoritması kullanılmıştır. (Pano & Ouyang, 2019)'da robotik işleticilerin dış hat takip başarımlarını arttırmak için PID kazanç değerleri FG ile en iyileştirilmiştir. (Shekhar vd., 2016)'da düzensiz ortamlarda birbirine bağlı üç alanlı bir karma güç sistemi için otomatik üretim kontrol şemasını verilmiştir. Ayrıca sistemin kontrolünü sağlayan PID denetleyicinin kazanç faktörleri ISE kriterine göre GA, kültürel algoritma (KA) ve FG kullanılarak ayarlanmıştır. (Alyoussef & Kaya, 2019)'da biyolojik hücre zarı potansiyellerinin dinamiğine dayalı yeni bir doğrusal olmayan oransal integral denetleyici (DOPID) sunulmuştur. Ayrıca hem DOPID ve hem de PID denetleyici parametreleri FG algoritması ile ayarlanmıştır. (Aldebraz vb., 2016)'da gezinme modunda çift rotorlu çok girişli çok çıkışlı bir titreşim bastırma ve katı gövde hareketi için artırılmış bir PID kontrol şemasının geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar sunulmuş ve denetleyici parametreleri GA

algoritması ile optimize edilmiştir. (Zhang, 2011)'de iyi ve sabit voltaj kontrol performansı sağlayabilen, deniz dizel jeneratörü uyarımı için bir PID denetleyici tasarlanmıştır. Ayrıca denetleyicinin kazanç ağırlıkları GA ile belirlenmiştir. (Zhang, 2011)'de doğrusal olmayan birleştirilmiş küresel tank işlemi için gelişmiş PID denetleyicinin performansı gerçek zamanlı olarak elde edilmiştir. Ayrıca denetleyici parametreleri ZN, GA ve FG algoritması kullanılarak ayarlanmıştır. (Pradeepkannan & Sathiyamoorthy, 2014)'te bir uçağın eğim kontrolü için doğrusal karesel düzenleyici (DKD) ve PID denetleyici tasarlanmıştır. Ayrıca DKD ve PID denetleyici parametreleri GA ile ayarlanmıştır. (Pongfai & Assawinchaichote, 2017)'de bir FDAM kontrolü için kazanç değerleri GA ile optimize edilmiş bir PID denetleyici sunulmuştur. (Hussain vd., 2018)'de birbiri ile ilişkili üç silindirik tank sisteminin içindeki sıvıların seviyesinin kontrolü PID denetleyici ile sağlanmış ve PID denetleyicinin kazanç faktörleri GA, benzetimli tavlama (BT) ve nicel geri besleme teorisi (NGBT) ile ayarlanmıştır. (Zennir vd., 2019)'da bir insansız hava aracının yön kontrolü klasik PID ve parametreleri GA ile optimize edilmiş PID kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1.3. Kapalı Çevrim Sistemler

Şekil 1'de tek girişli ve çıkışlı kapalı çevrim bir sistem görülmektedir. Şekilde süreç ($P(s)$), denetleyici ($C(s)$) tarafından kontrol edilmektedir. Amaç kontrol edilen değişkeni (z) istenen referans değerde (r) en az hata (e) ile tutmaktır. Süreç bozucu etki (d) altında olup, ayrıca kontrol edilen değişkenden alınan ölçümlerde (y) gürültü bulunmaktadır. Kontrol sinyalinin (u), gürültüden en az etkilenmesi için alınan ölçümlerin filtrelenmesi ($F(s)$) gerekmektedir.



Şekil 1. Kapalı çevrim kontrol sistemi

Referans değeri sıfır ($r = 0$) alındığında sistem (1), (2) ve (3) ile ifade edilebilir.

$$Z(s) = \frac{P(s)}{1 + P(s)C(s)F(s)} D(s) - \frac{P(s)C(s)F(s)}{1 + P(s)C(s)F(s)} N(s) \quad (1)$$

$$Y(s) = \frac{P(s)}{1 + P(s)C(s)F(s)} D(s) + \frac{1}{1 + P(s)C(s)F(s)} N(s) \quad (2)$$

$$U(s) = -\frac{P(s)C(s)F(s)}{1 + P(s)C(s)F(s)} D(s) - \frac{C(s)F(s)}{1 + P(s)C(s)F(s)} N(s) \quad (3)$$

1.4. PID Kontrol

Geri beslemeli denetim, sistem çıkışında elde edilen bilgilerin kullanıldığı bir kontrol mekanizmasıdır. Bu sistemlerde, kontrol işleminin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi için sistemin çıkışının mutlaka ölçülmesi gerekir. Geri besleme kontrolünün iki temel yapısı bulunmaktadır:

1. Pozitif geri besleme
2. Negatif geri besleme

Negatif geri beslemeli sistemler genellikle daha kararlı bir çalışma sergiler. Negatif geri besleme temelli bir denetim yöntemi olan PID kontrol, ilk kez 1939 yılında geliştirilmiştir ve günümüzde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. PID denetleyici, hata sinyalinin geçmişi, mevcut durumu ve geleceğine dayalı olarak uygun kontrol sinyallerini üretmektedir. PID denetleyici oluşturan üç temel bileşen şunlardır:

1. Oransal (*Proportional*, P) eylem
2. İntegral (*Integral*, I) eylemi
3. Türevsel (*Derivative*, D) eylem

1.4.1. Oransal Eylem

PID denetleyici, oransal, integral ve türevsel eylemlerin toplamına göre kontrol sinyalleri üretmektedir. Bu üç eylemin, denetleyici üzerinde etkisi ağırlıklandırma sabitleri ile belirlenmektedir. Genelde oransal eylem için K_p kazanç sabiti kullanılmaktadır. Oransal eylem hatanın anlık değerine göre denetleyicinin oluşturduğu kontrol sinyaline katkı

vermektedir. Bu etkinin PID denetleyicideki ağırlığını belirleyen K_p kazanç değeri arttıkça kalıcı hata azalmaktadır. Ancak K_p değerinin büyük seçilmesi, denetleyicinin açık-kapalı denetleyici gibi çalışmasına yol açmaktadır. Oransal eylem (4)'deki gibi tanımlanabilir.

$$P = K_p e(t) \quad (4)$$

Burada, P oransal eylemi, K_p oransal kazancı, $e(t)$ zaman bağlı sistem hatasını ve t zamanı göstermektedir. Oransal kazanç küçük seçildiğinde, sistem girişinde büyük bir değişim olduğunda bile denetleyici bu değişime küçük bir tepki üretecektir. Bu durumda, denetleyici bozucu etkilere karşı yeterli düzeltici eylemi üretemeyecek ve hata oluşacaktır. Oransal kazanç sabiti arttırıldıkça yükselme zamanı ve kalıcı hata azalmaktadır. Ancak kalıcı hata ortadan kaldırılamamaktadır.

1.4.2. İntegral Eylemi

İntegral eylemi, sistem hatasının hem genliği ve hem de süresi ile orantılıdır. Bu eylem kontrol işleminin başlangıcından o ana kadar olan hatanın alanıdır. Bu açıdan sistemin geçmişi olarak da düşünülebilir. İntegral eylemi kalıcı hatayı ortadan kaldırmaktadır. Ancak sistem tepkisi üzerinde bozucu etki oluşturmaktadır. Alt sönümlü sistemlerde en büyük hata ve son değer etrafındaki dalgalanmayı arttırmaktadır. Bu eylem matematiksel olarak (5)'te verildiği gibi tanımlanabilir.

$$I = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

Burada, I integral eylemini ve K_i integral kazanç sabitini göstermektedir. K_i aynı zamanda PID denetimde, integral eyleminin ağırlıklandırılmasını sağlamaktadır. Bu açıdan integral ağırlıklandırma sabiti olarak da tanımlanmaktadır.

1.4.3. Türevsel Eylem

Türevsel eylem, sistem hatasının eğimi ile türevsel kazancın çarpımı olarak ifade edilebilir. Hatanın geleceği ile ilgili bilgi vermektedir. Bu eylem denetleyici çıkışının değişim oranını azaltmaktadır. Ayrıca sistemin kararlılığını arttırmakta ve en büyük hatayı

azaltmaktadır. Bu açıdan sistemin geçiş tepkisini iyileştirmektedir. Türevsel eylem (6)'da ki gibi tanımlanabilir.

$$D = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

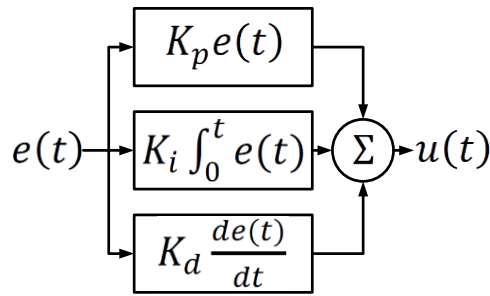
Burada, D türevsel eylemini ve K_d türevsel kazancı göstermektedir.

1.4.4. PID Denetleyici

Yukarı kısaca anlatılan üç eylem toplandığında PID denetleyici elde edilmektedir. PID denetleyicinin genel yapısı Şekil 2'de ve matematiksel ifadesi (7)'de verilmiştir.

$$PID = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

PID denetleyici üç eylemi de içerdiği için *üç modlu kontrol* olarak da ifade edilmektedir. Denetleyicinin sistem üzerindeki etkisi bu üç bileşenin ağırlıklarına bağlıdır. Bu kazanç faktörlerinin doğru seçimi istenilen sistem tepkisinin elde edilmesini sağlamakta ve yanlış belirlenmesi ise sistemin kararsız hale geçmesine yol açabilmektedir. Tablo 1'de kazanç sabitlerinin (K_p , K_i ve K_d) sistem tepkisi üzerindeki etkileri özetlenmiştir.



Şekil 2. PID denetleyicinin blok şeması

Şekil 2'de $u(t)$ kontrol sinyalini ve Σ toplama işlemini göstermektedir. PID denetleyicinin ürettiği kontrol sinyali zaman bölgesinde (8)'deki ve s bölgesinde ise (9)'daki gibi tanımlanmaktadır.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

$$U(s) = K_p E(s) + K_i \frac{E(s)}{s} + K_d E(s)s = E(s) \left\{ K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right\} \quad (9)$$

Tablo 1. Kazanç sabitlerinin sistem tepkisi üzerindeki etkisi

Parametre	Yükselme Zamanı	Aşma	Oturma Zamanı	Kalıcı Hata
K_p	Azaltır	Arttırır	Kısmen değiştirir	Azaltır
K_i	Azaltır	Arttırır	Arttırır	Azaltır
K_d	Kısmen azaltır	Kısmen arttırır	Kısmen azaltır	Etkisiz

Sonuç olarak PID denetleyiciyi oluşturan üç eylemin işlevi şu şekilde özetlenebilir:

- Oransal eylem, temel kontrol sinyalini üretir.
- İntegral eylemi, kalıcı hatayı yok eder.
- Türevsel eylem, sistemin geçiş tepkisini iyileştirir.

1.5. Süreç Modelleri ve Süreç Modellerinin Sınıflandırılması

Birinci dereceden zaman gecikmeli (BDZG) sistemler denetleyici tasarımından yaygın olarak kullanılmaktadır. BDZG sistemler matematiksel olarak (10)'daki gibi tanımlanabilir.

$$P(s) = \frac{K_s}{sT + 1} e^{-sL} \quad (10)$$

Burada K_s statik kazanç, T zaman sabiti ve L zaman gecikmesidir. K sistemin girişi ve çıkışı arasındaki ilişkiyi vermektedir. Sürecin tepki hızı T 'ye bağlı olup, T küçüldükçe artmaktadır. Son olarak sistemin girişi ile çıkışı arasındaki gecikme L ile ifade edilmektedir. Denetleyici tasarımında yaygın olarak kullanılan bir diğer model ikinci dereceden zaman gecikmeli (İDZG) sistemler olup (11) ile tanımlanmaktadır.

$$P(s) = \frac{K_s}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)} e^{-sL} \quad (11)$$

Burada T_1 ve T_2 zaman sabitleri olup, sistemin girişindeki değişimlere gösterdiği cevabın şeklini değiştirmektedir.

1.6. Kıyas Modelleri

Hägglund ve Åström, 2004 yılında endüstride yaygın olarak kullanılan süreçleri modellemek amacıyla 134 kıyas modeli tanımlamıştır (Hägglund & Åström, 2004). Bu modeller Tablo 2’de listelenmiştir. Bu tez kapsamında, PID parametrelerinin ayarlanmasında Tablo 2’de yer alan $P_1(s)$, $P_2(s)$ ve $P_6(s)$ modelleri kullanılmıştır

Tablo 2. 134 kıyas süreç modeli

Transfer Fonksiyonu	Parametre
$P_1(s) = \frac{e^{-s}}{1 + sT}$	$T = \{0,02 \ 0,05 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,5 \ 0,7 \ 1,0 \ 1,3 \ 1,5 \ 2 \ 4 \ 6 \ 8 \ 10 \ 20 \ 50 \ 100 \ 200 \ 500 \ 1000\}$
$P_2(s) = \frac{e^{-s}}{(1 + sT)^2}$	$T = \{0,01 \ 0,02 \ 0,05 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,5 \ 0,7 \ 1,0 \ 1,3 \ 1,5 \ 2 \ 4 \ 6 \ 8 \ 10 \ 20 \ 50 \ 100 \ 200 \ 500\}$
$P_3(s) = \frac{e^{-s}}{(1 + s)(1 + sT)^2}$	$T = \{0,005 \ 0,01 \ 0,02 \ 0,05 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,5 \ 2 \ 5 \ 10\}$
$P_4(s) = \frac{1}{(1 + s)^n}$	$N = \{3, 4, 5, 6, 7, 8\}$
$P_5(s) = \frac{1}{(1 + s)(1 + \alpha s)(1 + \alpha^2 s)(1 + \alpha^3 s)}$	$A = \{0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,5 \ 0,6 \ 0,7 \ 0,8 \ 0,9\}$
$P_6(s) = \frac{1}{s(1 + sT)} e^{-sL}$	$L = \{0,01 \ 0,02 \ 0,05 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,5 \ 0,7 \ 0,9 \ 1,0\}$ $T + L = 1$
$P_7(s) = \frac{1}{(1 + sT)(1 + sT_1)} e^{-sL}$	$T = 1, 2, 5, 10$ $T_1 + L = 1$
$P_8(s) = \frac{1 - \alpha s}{(1 + s)^3}$	$L = \{0,01 \ 0,02 \ 0,05 \ 0,1 \ 0,3 \ 0,5 \ 0,7 \ 0,9 \ 1,0\}$ $\alpha = \{0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,5 \ 0,6 \ 0,7 \ 0,8 \ 0,9 \ 1,0 \ 1,1\}$
$P_9(s) = \frac{1}{(1 + s)((sT)^2 + 1,4sT + 1)}$	$T = \{0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,5 \ 0,6 \ 0,7 \ 0,8 \ 0,9 \ 1,0\}$

1.7. Hata Alanı Tabanlı Performans Metrikleri

Hata alanı, sistem yanıtı ile istenen (referans) değer arasındaki farkın oluşturduğu alan olarak tanımlanabilir. PID kazanç faktörlerinin optimize edilmesinde, hata alanı bir uygunluk fonksiyonu olarak kullanılabilir. Literatürde yaygın olarak kullanılan hata alanı metrikleri (12) – (15)’te tanımlanmıştır. Bu kriterler temel olarak, hatanın mutlak değerinin toplamına, hatanın güç toplamına (enerjisi), zaman ağırlıklı genlik toplamına ve zaman ağırlıklı enerjisine dayanmaktadır.

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (12)$$

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt \quad (13)$$

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (14)$$

$$ITSE = \int_0^T t \cdot e^2(t) dt \quad (15)$$

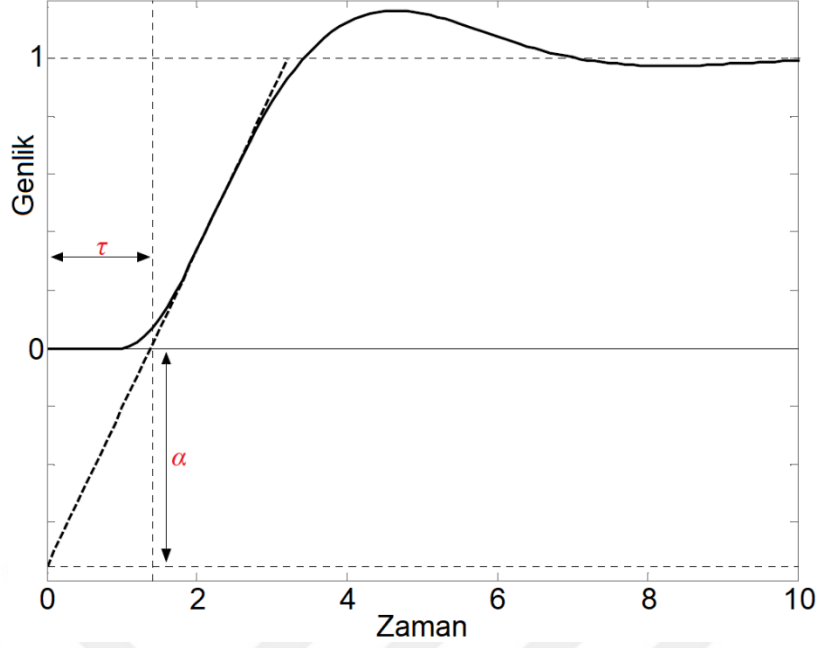
Burada, IAE mutlak hata toplamı, ISE hata karesi toplamı, ITAE zaman ağırlıklı mutlak hata toplamı, ITSE zaman ağırlıklı hata karesi toplamı, T anlık zaman ve $|\cdot|$ mutlak değer işlemidir.

1.8. PID Kazanç Sabitlerinin Ayarlanması

PID denetleyicinin başarımı kazanç sabitlerine oldukça bağlıdır. İyi belirlenmiş ağırlıklandırma faktörleri ile denetleyici yüksek başarımda çalışmakta iken bu parametrelerin yanlış seçimi sistemin kararsız hale geçmesine yol açabilmektedir. Bu kısımda başlıca parametre belirleme yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir.

1.8.1. Ziegler-Nichols Yöntemi

Ziegler-Nichols adım tepkisi ve frekans tepkisi yöntemleri, 1942 yılında sunulmuş olup (Ziegler & Nichols, 1942), PID parametrelerinin ayarlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Åström & Hägglund, 1995). Adım tepkisi yöntemi, sistemin açık çevrim adım cevabına dayalı olup, sistemin kararlı olmasını gerektirmektedir. Sistemin adım cevabı α ve τ parametreleri ile karakterize edilmektedir. Bu parametreler Şekil 3'te görüldüğü gibi, adım tepkisinin eğiminin en fazla olduğu noktada çizilen bir tanjant çigisi ile bulunmaktadır. Bu hattın x ekseninin kestiği nokta τ ve y ekseninin kestiği nokta da α parametresini vermektedir. α ve τ değerleri kullanılarak bulunan PID denetleyici parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Ziegler-Nichols yöntemi ile PID parametrelerinin belirlenmesi

Tablo 3. Ziegler-Nichols adım cevabı ile bulunan kazanç sabitleri

Denetleyici	K	T_i	T_d
P	$1/\alpha$	-	-
PI	$0,9/\alpha$	3τ	-
PID	$1,2/\alpha$	2τ	$\tau/2$

Tablo 3'te K oransal kazancı, T_i integral zamanını ve T_d türev zamanını göstermektedir. PID parametreleri (16) – (18) ile kolaylıkla hesaplanabilir.

$$K_p = K \quad (16)$$

$$K_i = K/T_i \quad (17)$$

$$K_d = KT_d \quad (18)$$

İkinci yöntem olan frekans tepkisi yöntemi de ilk teknik gibi iki parametre ile tanımlanmaktadır. Bunlar K_u esas kazanç ve T_u esas periyottur. Esas kazanç ve periyot bulunurken denetleyici türü olarak oransal kontrolör seçilir. Ardından K_p kazancı arttırılarak, sistemin kritik osilasyona girmesi sağlanır. Sistemi kritik osilasyona girmesini

sağlayan K_p değeri esans kazanç ve bu osilasyonun periyodu esas periyottur. Ziegler-Nichols frekans cevabı ile bulunana denetleyici parametreleri Tablo 4'te verilmiştir (Åström & Hägglund, 1995).

Tablo 4. Ziegler-Nichols frekans cevabı ile bulunan kazanç sabitleri

Denetleyici	K	T_i	T_d
P	$0,5K_u$	-	-
PI	$0,4K_u$	$0,8T_u$	-
PID	$0,6K_u$	$0,5T_u$	$0,125T_u$

1.8.2. Cohen-Coon Yöntemi

Cohen-Coon yönteminin temel amacı yükün sistem üzerinde oluşturduğu bozucu etkiyi en aza indirmektedir (Cohen & Coon, 1953). Yöntem (10)'da verilen BDZG sistem üzerine kuruludur. Bu yöntemin uygulanabilmesi için sistemin kararlı olması ve sistem modelinin (10) ile uyumlu olması gereklidir. Yöntem, baskın kutupları konumlandırarak, çeyrek genlik azalması oranını sağlar. Bu yöntem de β kazancı ve κ bağıl ölü zaman ile karakterize edilir. β kazancı (19) ve κ ölü zamanı (20) eşitlikleri ile (10)'da verilen Tablo 5'te verildiği gibi BDZG parametreleri cinsinden ifade edilebilir.

Tablo 5. Cohen-Coon yöntemi ile bulunan PID parametreleri

Denetleyici	K	T_i	T_d
P	$\frac{1}{\beta} \left(1 + \frac{0,35\kappa}{1-\kappa} \right)$	-	-
PI	$\frac{0,9}{\beta} \left(1 + \frac{0,092\kappa}{1-\kappa} \right)$	$\frac{3,3-3\kappa}{1+1,2\kappa} L$	-
PID	$\frac{1,35}{\beta} \left(1 + \frac{0,18\kappa}{1-\kappa} \right)$	$\frac{2,5-2\kappa}{1-0,39\kappa} L$	$\frac{0,37-0,37\kappa}{1-0,81\kappa} L$

$$\beta = K_s L / T \quad (19)$$

$$\kappa = L / (L + T) \quad (20)$$

1.8.3. PID Parametrelerinin Dahili Model Kontrolü ile Belirlenmesi

Dahili model kontrolü (DMK) model tabanlı bir denetim yöntemi olup, aynı zamanda PID parametrelerinin bulunmasında da kullanılmaktadır. Bu yöntem genelde sabit gecikmeli sistemlerde uygulanmaktadır. Ancak değişken zaman gecikmeli sistemlerde de kullanılabilir (Casini vd., 2004). Bu yöntem kullanılarak oransal kazanç (21), integral zamanı (22) ve türev zamanı (23) ile hesaplanır.

$$K = \frac{T}{K_s(\lambda_{IMC} + L)} \left(1 + \frac{L}{2T}\right) \quad (21)$$

$$T_i = T + \frac{L}{2} \quad (22)$$

$$T_d = \frac{TL}{2T + L} \quad (23)$$

Burada λ_{IMC} DMK yönteminin ayar parametresidir. Bu parametre kontrol edilen sistemin başarımı üzerinde çok belirleyicidir.

1.8.4. Lamda Ayarlama Yöntemi

Lamda ayarlama yöntemi kutup yerleştirme tasarımının özel bir durumu olup, 1968 yılında Dahlin tarafından önerilmiştir (Olsen & Bialkowski, 2002). Yöntemde, öncelikle denetlenecek sistemin BDZG bir sistem olarak modellenmesi ve zaman gecikmesinin Taylor serisine açma tekniği kullanılarak kestirilmelidir. Lamda yöntem ile oransal kazanç (24), integral zamanı (25) ve türev zamanı (26) ile bulunur.

$$K = \frac{1}{K_s} \frac{T + L/2}{\lambda + L/2} \quad (24)$$

$$T_i = T + \frac{L}{2} \quad (25)$$

$$T_d = \frac{TL}{2T + L} \quad (26)$$

Burada λ ayar parametresi olup, kapalı çevrim sistemin tepki hızını göstermektedir.

1.8.5. Yaklaşık M-Sınırlı İntegral Kazancı Optimizasyonu

Yaklaşık M-sınırlı integral kazancı optimizasyonu (YMİKO) Astrom ve Hagglund tarafında klasik PID denetleyiciler için geliştirilmiştir (Casini vd., 2004; Åström & Hägglund, 2005). Yöntem, Ziegler-Nichols parametre ayarlama tekniğinden esinlenilerek kararlı veya yarı kararlı sistemleri için önerilmiş olup, oransal kazanç (27), integral zamanı (28) ve türev zamanı (29) ile bulunur.

$$K = \frac{1}{K_s} (0,2 + 0,45 T/L) \quad (27)$$

$$T_i = \frac{0,8T + 0,4L}{0,1T + L} L \quad (28)$$

$$T_d = \frac{0,5TL}{T + 0,3L} \quad (29)$$

1.9. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

PSO bireylerin sosyal etkileşimleri temelinde geliştirilmiş bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntemin ilk simülasyonu, Heppner ve Grenander'in çalışmasına (Heppner & Grenander, 1990) dayalı olarak 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından gerçekleştirilmiştir (Kennedy & Eberhart, 1995). Daha sonra PSO yöntemi geliştirilerek bir optimizasyon tekniği olarak tanıtılmıştır (Kennedy & Eberhart, 1997; Eberhart & Kennedy, 1995; Eberhart vd., 1996).

PSO'da, bir sürü, problemin olası çözümlerini temsil eden parçacıklardan oluşur. Parçacıklar, arama uzayına düzenli veya rastgele bir şekilde dağıtılır. Her parçacık, hem kendi elde ettiği en iyi uygunluk değerine (kişisel en iyi) hem de sürünün genelinde elde edilen en iyi uygunluk değerine (küresel en iyi) göre hareket eder. Bu süreç yinelandığında, parçacıklar bir kuş sürüsünün yiyecek arama davranışına benzer şekilde hareket ederek optimum çözüme ulaşır.

Her parçacığın boyutu çözülmek istenen problemle aynıdır. Parçacıklar üç temel vektörle tanımlanır. Bunlar:

1. x_i vektörü: Parçacığın mevcut konumunu temsil eder ve çözüm uzayında bir noktadır.
2. p_i vektörü: Parçacığın o ana kadar ulaştığı en iyi konumdur ve uygunluk değeri $pbest_i$ değişkeninde saklanır.
3. v_i vektörü: Parçacığın hızını temsil eder ve bir sonraki konumunu belirler.

Her yinelemede, parçacığın mevcut konumu (x_i) kullanılarak uygunluk değeri hesaplanır. Eğer bu uygunluk değeri, parçacığın daha önceki en iyi uygunluk değerinden daha iyi ise, mevcut konumu p_i vektörüne atanır ve uygunluk değeri $pbest_i$ olarak güncellenir. Parçacığın yeni konumu, mevcut hız vektörünün (v_i) mevcut konum vektörüne (x_i) eklenmesiyle hesaplanır. Ayrıca, sürünün genelindeki en iyi uygunluk değeri $gbest$ olarak adlandırılır ve bu değere karşılık gelen konum p_g vektöründe tutulur. Parçacıkların hız vektörü (v_i), hem kendi p_i vektörüne hem de sürünün genelindeki p_g vektörüne göre ayarlanır. Bu dinamik, parçacıkların topluca hareket ederek problemin yerel minimumlarına takılmadan global minimuma ulaşmasını sağlar.

PSO algoritması, maksimum yineleme sayısına, minimum/maksimum uygunluk değerine veya uygunluk değeri değişiminin belirli bir eşik seviyesinin altına inmesine dayalı sonlandırma kriterlerinden biri sağlandığında sona erer. Bu durumda, p_g vektörü, problemin optimum çözümünü temsil eder.

PSO'nun algoritması Tablo 6'da özetlenmiştir. Hız vektörü (30) ve konum vektörü (31) ile elde edilmektedir.

$$v_i = v_i + \varphi_1 rand_1(p_i - x_i) + \varphi_2 rand_2(p_g - x_i) \quad (30)$$

$$x_i = x_i + v_i \quad (31)$$

Burada φ_1 ve φ_2 öğrenme sabitleri, $rand_1$ ve $rand_2$ 0 ile 1 arasında uniform dağılımlı rastgele reel üreteçlerdir.

Tablo 6. PSO algoritması

Adım	İşlem
1	Tüm parçacıkların konum ve hız vektörlerine rastgele ilk değerlerini ver.
2	<i>Döngüye başla</i>
3	Her parçacığın mevcut konumuna göre uygun değerini hesapla
4	Her parçacığın uygunluk değerini $pbest_i$ ile karşılaştır. Eğer uygunluk değeri $pbest_i$ 'den daha küçük ise parçacığın mevcut konumunu p_i vektörüne ata ($p_i = x_i$)
5	$pbest_i$ uygunluk değerleri içerisinde en iyi uygunluk değerini $gbest$ değişkeninde sakla ve bu değeri veren parçacık konumunu p_g vektörüne ata ($p_g = p_i$)
6	Parçacığın hızını (30) ve konumunu (31) ile hesapla
7	Durma koşulu (maksimum yinleme, en iyi uygunluk değeri veya minimum en iyi uygunluk değeri değişimi) test et. Eğer koşul sağlanmışsa döngüden çık
8	<i>Döngüyü sonlandır</i>

1.10. Radyal Hareket Optimizasyonu

Radyal Hareket Optimizasyonu (RHO), sürü tabanlı stokastik bir optimizasyon algoritmasıdır (Rahmani & Yusof, 2014; Rahmani vd., 2015). PSO ve farksal gelişim (FG) yöntemlerine bazı yönlerden benzerlik gösterse de en önemli farkı, parçacıkların hareket dinamiğidir. RHO'da parçacıklar, bir merkez noktasının çevresinde radyal hareket yapar ve bu merkez noktası her yinelemede güncellenir.

Bir problem üç parametrelili bir yapıya sahipse, RHO'da parçacıklar merkez noktaya eşit uzaklıkta, ancak farklı hızlarla hareket eder. Her yinelemede, parçacıkların mevcut konumları problemin uygunluk fonksiyonuna giriş olarak uygulanır ve her parçacık için bir uygunluk değeri hesaplanır.

Her yinelemede, en iyi uygunluk değerine sahip parçacığın konumu $Rbest$ değişkeninde tutulur. Ayrıca, tüm yinelemelerde elde edilen en iyi uygunluk değerine sahip parçacığın konumu $Gbest$ olarak adlandırılır. Başka bir ifade ile mevcut yineleme için en iyi çözüm $Rbest$ ve tüm yinelemelerdeki en iyi çözüm $Gbest$ değişkeninde saklanır.

RHO algoritması, maksimum yinleme sayısına ulaşılması, en iyi uygunluk değerinin belirlenmesi veya uygunluk değerindeki değişimin belirli bir eşik seviyesinin altına inmesi gibi durma kriterlerinden biri karşılandığında sona erer. Bu durumda *Gbest*, problemin optimal çözümünü vermektedir.

1.10.1. RHO Algoritmasında Parçacıklara İlk Değerlerinin Verilmesi

Diğer stokastik optimizasyon yöntemlerinde olduğu gibi problemin çözümüne geçmeden önce parçacıklara ilk değerlerinin verilmesi gerekmektedir. Parçacık konumları X_{ij} matrisinde tutulmaktadır. Bu matrisin indisinin ilk değişkeni (i) parçacık insidir. Parçacık sayısı çözülmek istenen probleme göre belirlenmekte olup kesin bir kuralı yoktur. Parçacık sayısının artması başarıyı yükseltmekle birlikte işlem yükünü de arttırmaktadır. İkinci bileşen (j) ise boyut indisidir. Boyut indisi çözülmek istenen problemin boyutuna eşittir. Örneğin oransal denetleyicinin kazanç sabiti optimize edilmek isteniyorsa boyut bir veya PID denetleyicinin ağırlıklandırma faktörleri belirleniyorsa boyut üçtür.

Parçacık sayısı ve boyut belirlendikten sonra parçacıklar arama uzayına düzenli veya rastgele dağıtılabilir. (32) kullanılarak parçacıklar kolaylıkla arama uzayını kapsayacak şekilde serpiştirilebilir.

$$X_{ij} = X_{\min(j)} + rand(0, 1)(X_{\max(j)} - X_{\min(j)}) \quad (32)$$

Burada X parçacık konum matrisi, i parçacık indisi, j boyut indisi, $X_{\min(j)}$ parçacığın j boyutunun alt sınırı, $X_{\max(j)}$ parçacığın j boyutunun üst sınırı ve $rand(0, 1)$ 0 ile 1 arasında düzgün dağılımlı reel sayı üreticidir.

Eğer parçacıklar arama uzayına düzgün dağıtılmak isteniyorsa (33) kullanılabilir.

$$adım_j = \frac{X_{\max(j)} - X_{\min(j)}}{\text{parçacık sayısı}}$$

$$X_{1j} = X_{\min(j)} \quad (33)$$

$$X_{ij} = X_{i-1,j} + adım_j$$

$$i = 2 \dots \text{parçacık sayısı}, j = 1 \dots \text{problem boyutu}$$

1.10.2. RHO Algoritmasında Parçacıkların Hareketi

Parçacıkları hareket ettirmeden önce merkez noktanın (cp) belirlenmesi gerekmektedir. Merkez nokta seçildikten sonra parçacıklar bu merkezden belirli bir uzaklıkta rastgele hareket etmektedirler. Her yinelemede tüm parçacıkların hızları V_{ij} matrisinde tutulmaktadır. Bu matrisin indisleri ve boyutu X_{ij} konum matrisi ile aynıdır ($V_{\text{parçacık sayısı} \times \text{problem boyutu}}$). Parçacık hızları her yinelemede (34) ile rastgele olarak belirlenir.

$$V_{ij} = rand(0, 1) \times V_{\max(j)} \quad (34)$$

$$V_{\max(j)} = \frac{X_{\max(j)} - X_{\min(j)}}{N}$$

Burada V_{ij} hız matrisi, i parçacık indisi, j boyut indisi, $V_{\max(j)}$ parçacığın j boyutundaki maksimum hızı, $rand(0, 1)$ 0 ile 1 arasında düzgün dağılımlı reel sayı üretici ve N 0'dan büyük pozitif bir tamsayıdır.

Eğer parçacık hızlarının yineleme indisine bağlı olarak azalacak şekilde belirlenmesi isteniyorsa (35) kullanılabilir. Bu durumda parçacıklar yineleme sayısı arttıkça birbirlerine daha yakın hareket etmeye başlayacaklar ve daha hassas arama yapacaklardır.

$$W_k = W_{\max} - \left(\frac{W_{\max} - W_{\min}}{k_{\max}} \right) k \quad (35)$$

$$V_{ij}^k = W_k rand(0, 1) V_{\max(j)}$$

Burada W eylemsizlik ağırlığı, $W_{\max}$ eylemsizlik ağırlığının üst sınırı, $W_{\min}$ eylemsizlik ağırlığının alt sınırı, k yineleme indisi ve $k_{\max}$ yineleme indisinin üst sınırıdır. Parçacık hızları belirlendikten sonra parçacıkların konumlar (36) ile hesaplanır.

$$X_{ij} = V_{ij} + cp_j \quad (36)$$

Burada cp merkez noktadır. Parçacıkların hesaplanan yeni konumlarına göre uygunluk değerleri bulunur. Bu uygunluk değerlerine göre $Rbest$ ve $Gbest$ değişkenleri güncellenir. Ardından cp değişkeninin değeri (37) ve (38) kullanılarak bulunur.

$$cp^{k+1} = cp^k + up \quad (37)$$

$$up = C_1(Gbest - cp^k) + C_2(Rbest - cp^k) \quad (38)$$

Burada C_1 ve C_2 ağırlıklandırma sabitleridir. Bu sabitler yeni merkez noktasının bulunmasında mevcut iterasyon ile o ana kadar gerçekleştirilen iterasyonlarda elde edilen en iyi çözümlerin yeni merkez noktasının hesaplanmasındaki etkisini belirlemektedir. Bu sabitleri genellikle 0,4 ile 0,9 aralığında seçilmektedir. Ayrıca C_2 sabitinin C_1 'de büyük alınması önerilmektedir.

1.11. Farksal Gelişim Algoritması

Farksal Gelişim (FG), popülasyona dayalı bir doğrudan arama algoritmasıdır (Price, 1999). FG ile problem çözümü sırasında, diğer sürü tabanlı optimizasyon algoritmalarında olduğu gibi bir başlangıç popülasyon matrisi oluşturulmaktadır. Bu matriste yer alan bireyler, çözüm uzayını kapsayacak şekilde eşit aralıklı veya rastgele bir şekilde yerleştirilebilir (Price vd., 2005; Price & Storn, 1997). (39) ile bireyler arama uzayına rasgele dağıtılabilir.

$$X_{ij} = a_i + rand_j(0,1) \times (a_j - b_j), \quad i = 1, 2, \dots, N_p, \quad j = 1, 2, \dots, D \quad (39)$$

Burada X popülasyon matrisi, a alt sınır vektörü, b üst sınır vektörü, $rand(0,1)$ 0 ile 1 arasında düzgün dağılımlı rastgele bir reel sayı, i birey indisi, j boyut indisi N_p birey sayısı ve D boyuttur.

x_i vektörünü problemin aday çözümü kabul edelim. Bu durumda ardışık bireyler, rastgele seçilen iki vektörün ağırlıklandırılmış farkı ile üçüncü bir vektörün toplamı ile bulunur. Şimdi klasik FG algoritmasında kullanılan mutasyon, çaprazlama ve seçim işlemlerini kısaca açıklayalım.

1.11.1. FG Algoritmasında Mutasyon İşlemi

FG algoritmasında her yinelemede her bir x_i vektörü için (40)'da verilen bir v_i mutant vektörü oluşturulur.

$$v_i^k = x_a^k + F(x_c^k - x_b^k) \quad (40)$$

Burada v mutant vektörü, F ağırlıklandırma sabiti, i birey indisi, k yineleme indisi ve a , b ve c birbirlerinden farklı rastgele tam sayılardır. (40)'da verilen ifadenin sağlanması için yöntemde en az dört bireyin olması ($N_p \geq 4$) gerekmektedir.

Ağırlıklandırma sabiti F , 0 ile 2 arasında değer alan bir reel sayıdır. Bu sabit büyük seçilmesi her yinelemede oluşturulan popülasyonun çeşitliliğini arttırmaktadır. Küçük belirlenmesi ise daha hızlı yakınsamayı sağlamaktadır.

1.11.2. FG Algoritmasında Çaprazlama İşlemi

Çaprazlama işlemi, iki rakip vektörü karıştırarak yeni bir çözüm vektörünün elde edilmesini sağlamaktadır. Bu işlem aynı zamanda popülasyonun çeşitliliğini arttırmaktadır. Klasik FG algoritmasında ikili çaprazlama kullanılmakta ve bu işlem sonucunda deneme vektörü elde edilmektedir. Bu işlem (41) ve (42)'de verilmiştir.

$$u_i^k = (u_{i1}^k, u_{i2}^k, \dots, u_{iD}^k) \quad (41)$$

$$U_{ij}^k = \begin{cases} V_{ij}^k, & \text{eğer } \text{rand}_j(0,1) \leq C_r \text{ veya } j = d \\ X_{ij}^k, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (42)$$

Burada U mutant matrisi, V deneme matrisi, C_r önceden tanımlanmış çaprazlama oranı ve d rastgele parametre indeks değeridir. Çaprazlama oranı 0 ile 1 arasında düzgün dağılımlı rastgele bir reel sayı olup, genelde 0,4 ile 1 aralığında seçilmektedir (Price & Storn, 1997). Benzer şekilde d parametre indisi de 0 ile D arasında düzgün dağılımlı bir rastgele tam sayıdır.

1.11.3. FG Algoritmasında Seçme İşlemi

Seçme işlemi ile bir sonraki yinelemedeki yeni bireylerin mutant veya popülasyon matrislerinde hangisinin bir üyesi olacağını belirlemektedir. En küçük değerin bulunması gereken optimizasyon problemlerinde, uygunluk değeri en küçük vektör seçilmektedir.

FG’de yeni bir popülasyon oluşturmak için *mutasyon*, *çaprazlama* ve *seçim* işlemleri, her iterasyonda birey sayısı kadar tekrarlanmalıdır. Bu döngü, önceden belirlenen durma koşulu sağlanıncaya kadar devam eder. Durma koşulu, problemin karakteristiğine bağlı olarak belirlenir ve genellikle şu kriterlerden biri kullanılır:

- En iyi uygunluk değerine ulaşılması,
- Belirlenen maksimum yineleme sayısına erişilmesi.

Döngü tamamlandığında, en iyi uygunluk değerine sahip birey, problemin optimal çözümünü verir.

1.12. Genetik Algoritmalar

Genetik algoritmalar (GA) ilk kez John Holland tarafında tanıtılmış ve kısa zamanda oldukça yaygınlaşmıştır (Deb, 1999). GA doğrudan ve paralel bir optimizasyon yöntemidir (Popov, 2005). GA başlatıldıktan sonra durma koşulu sağlanıncaya kadar *değerlendirme*, *seçim*, *genetik değişim*, *mutasyon* ve *seçkinleştirme* işlemlerini devamlı olarak tekrarlar.

1.12.1. Genetik Algoritmalarda Kromozom Kodlama

GA yönteminde kromozomlar genlerden oluşmaktadır (Popov, 2005). Her gen çözülmek istenen problemin olası bir çözümüdür. Çok boyutlu problemlerin optimizasyonunda kromozom (43)’te verildiği gibi bir matris olarak tanımlanmaktadır.

$$X_{ij} = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, K, \quad j = 1, 2, 3, \dots, D \quad (43)$$

Burada X kromozom, x gen, i gen indisi, j boyut indisi, K gen sayısı ve D boyutu göstermektedir. Çok parametrelili problemlerin çözümünde genler vektör ve kromozom matris olarak tanımlanır.

1.12.2. Genetik Algoritmalarda Başlatma İşlemi

GA değişkenlere ilk değerlerinin verilmesi ile başlatılmaktadır. Bu aşamada kromozomlara rastgele değerler verilmektedir. Rastgele değer atamasında kromozomların

tüm arama bölgesine mümkün olduğunca düzenli bir şekilde dağıtılması yöntemin başarımını arttırmaktadır.

1.12.3. Genetik Algoritmalarla Seçim İşlemi

Bu optimizasyon yönteminde farklı seçim teknikleri bulunmakla beraber turnuva seçimi en yaygın kullanılanıdır (Goldberg & Deb, 1991; Miller & Goldberg, 1995). Turnuva seçimi üç aşamalı olarak gerçekleştirilmektedir. Bunlar:

1. Havuzdan rasgele m adet birey seç. Burada m turnuva boyutu olup ikiden büyük veya eşit olmalıdır.
2. m adet turnuva bireyi için uygunluk değerlerini hesapla.
3. Yeni bir havuz oluşturmak için en iyi uygunluk değerine sahip bireyleri seç.

1.12.4. Genetik Algoritmalarla Genetik Değişim İşlemi

Genetik değişim, yeniden üretimin ilk adımıdır. Bu işlemde yeni bir kromozom üretmek için ebeveynlerin genleri kullanılmaktadır. Literatürde çok sayıda çaprazlama yöntemi mevcut olup, bu kısımda benzetilmiş ikili genetik değişim (BİGT) kullanılmıştır (Agrawal vd., 1994; Deb vd., 2002).

BİGT, tek noktalı genetik değişim yöntemine benzemekle beraber daha iyi başarımlar sağlamaktadır. Bu yöntemden, özellikle çok sayıda optimum değere sahip karmaşık problemlerin çözümünde sıkça yararlanılmaktadır.

Bu değişim tekniğinde, iki ebeveyn rasgele yayılım sabiti kullanılarak iki yeni çocuk türetilir. Bu işlem (44) ve (45) ile gerçekleştirilir.

$$c_1 = \bar{x} - \frac{1}{2} \bar{\beta}(p_2 - p_1) \quad (44)$$

$$c_2 = \bar{x} - \frac{1}{2} \bar{\beta}(p_2 - p_1) \quad (45)$$

1.12.5. Genetik Algoritmalarla Mutasyon İşlemi

Mutasyon işlemi, popülasyondaki bir veya daha fazla genin değerini rasgele olarak değiştirir. Bu işlem hataların ebeveyn genlerinden çocuklara kopyalandığı doğal süreci

temsil etmektedir. Genelde mutasyon işlemi, genetik değişimden sonra yapılır. Öncelikle mutasyona uğratılacak gen rastgele seçilir ve mutasyon işleminin rastgele olmasını garantilemek için gen BİGT kullanılarak rastgele bir sayı ile ilişkilendirilir.

1.12.6. Genetik Algoritmalarda Değerlendirme İşlemi

Değerlendirme işlemi ile her kromozoma uygunluk değeri atanır. Böylece gen performansı belirlenir ve genler sıralanır. Bir kromozomun nesilden nesille gelişimi uygunluk değeri ile yönlendirilir. Bu adımda, çözülmek istenen problem için belirlenen uygunluk fonksiyonu hesaplanarak bu değer ilişkili gene atanır.

1.12.7. Genetik Algoritmalarda Ekleme İşlemi

Turnuva seçimi, gen değişimi ve mutasyon işlemlerinden sonra yeni bir birleşme havuzu elde edilmiş olur. Ekleme işlemi, bir sonraki jenerasyon havuzunu üretmek için yeni birleşme havuzunu, bir önceki havuza ekler.

1.12.8. Genetik Algoritmalarda Sonlandırma İşlemi

Seçilen maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında GA sonlandırılır. Bu aşamada, en iyi uygunluk değerine sahip kromozom problemin çözümünü vermektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

2.1. Giriş

Bu kısımda, PID denetleyicinin parametreleri ZN, PSO, RHO, FG ve GA kullanılarak ayarlanmıştır. Seçilen optimizasyon algoritmalarının için hata alanı tabanlı uygunluk fonksiyonları (12), (13), (14) ve (15)'te tanımlanmıştır. Farklı ayarlama yöntemleri ile kazanç değerleri optimize edilen PID denetleyici Tablo 2'de verilen kıyas modellerinden $P_1(s)$, $P_2(s)$ ve $P_6(s)$ kullanılarak test edilmiş ve başarımların değerleri elde edilmiştir. Kıyas modellerinde zaman sabiti $T = 0,1$ s alınmış ve modeller (46), (47) ve (48)'de verilmiştir. Parametre ayarlama yöntemlerinin performansları hata alanı başarımlarına göre ayrı ayrı bulunmuş ve analiz edilmiştir. Ardından her bir başarımların kriteri için optimizasyon yöntemleri birbirleri ile kıyaslanmıştır.

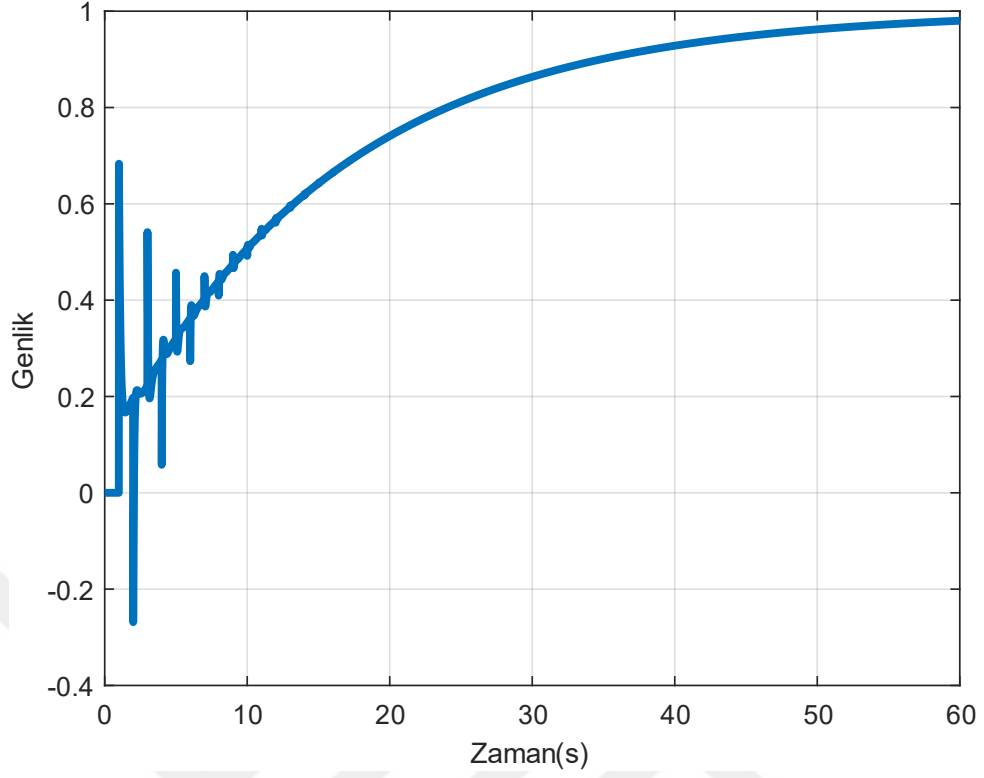
$$P_1(s) = \frac{e^{-s}}{1 + 0,1s} \quad (46)$$

$$P_2(s) = \frac{e^{-s}}{(1 + 0,1s)^2} \quad (47)$$

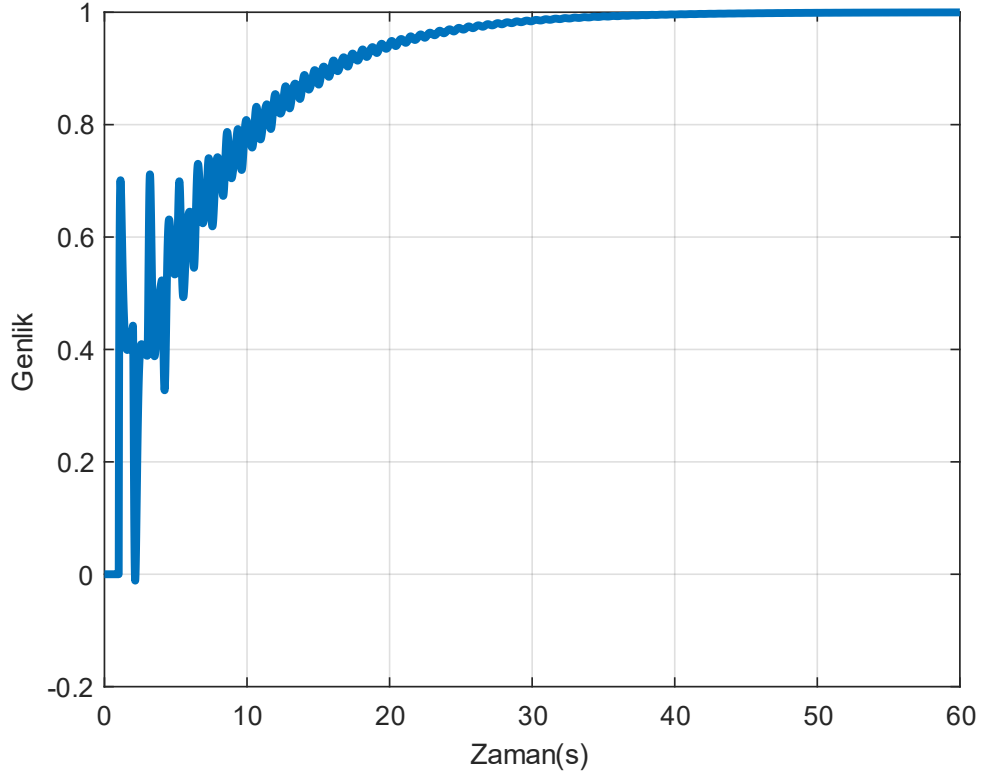
$$P_6(s) = \frac{1}{s(1 + 0,1sT)} e^{-0,9s} \quad (48)$$

2.2. Ziegler-Nichols Yöntemi ile PID Parametrelerinin Ayarlanması

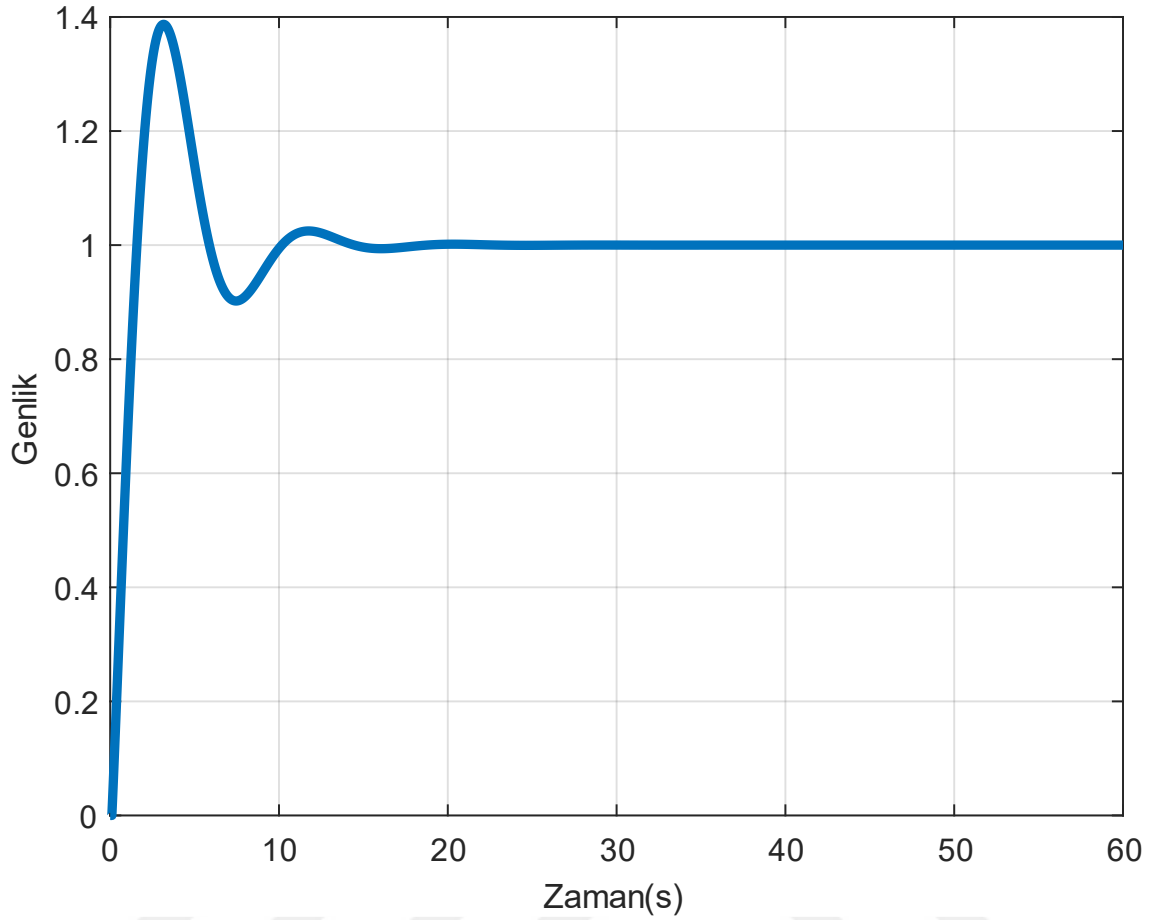
Seçilen üç test sistemi için PID denetleyicinin ağırlıklandırma faktörleri (K_p , K_i ve K_d) ZN basamak cevabı yöntemi ile Tablo 7'deki gibi bulunmuştur. Ardından denetleyicinin başarımların değerlerini elde etmek için birim adım fonksiyonuna üç test sisteminin verdikleri tepkiler elde edilmiştir. Benzetimler MATLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve üç sistem için de benzetim süresi 60 s ve örnekleme periyodu 10 ms alınmıştır. 6001 örnek noktası için elde edilen sistem çıkışları Şekil 4 – Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 4. Kazanç faktörleri Ziegler-Nichols adım tepkisi tekniğiyle hesaplanan PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin adım tepkisi



Şekil 5. Kazanç faktörleri Ziegler-Nichols adım tepkisi tekniğiyle hesaplanan PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin adım tepkisi



Şekil 6. Kazanç faktörleri Ziegler-Nichols adım tepkisi tekniğiyle hesaplanan PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin adım tepkisi

Şekil 4'te sistem çıkışının kararlı olduğu ve çıkışın referans değeri aşmadığı görülmektedir. Dolayısıyla birinci sistem çıkışı aşırı sönümlüdür. Benzer şekilde Şekil 5 incelendiğinde, çıkışın kararlı ve aşma yapmadığı görülmektedir. Bu durumda ikinci sistem de aşırı sönümlü tepki vermektedir. Şekil 6'da adım cevabı referans değer etrafında sönümlenerek salınım yaptığı için alt sönümlüdür.

Tablo 7. Ziegler-Nichols yöntemi ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar

Parametre	Sistem 1	Sistem 2	Sistem 3
Oransal Kazanç	0,1367	0,3181	1,2000
İntegral Kazancı	0,0684	0,1547	0,6000
Türevsel Kazanç	0,0683	0,1635	0,6000
Yükselme Süresi (s)	31,2731	14,2845	1,1576
Oturma Süresi (s)	47,3144	28,0006	12,6219
Maksimum Aşma (%)	0,0000	0,0000	38,7042

Tablo 7’de verilen başarımlar değerlerine göre en hızlı sistem cevabına 3. sistem sahiptir. Ayrıca 3. sistem en kısa sürede kararlı hale geçmiştir. Ancak sistem cevabı alt sönümlü olduğu için başlangıçta referans değeri aşılmış ve maksimum aşma hatası oluşmuştur.

2.3. PID Denetleyici Parametrelerinin PSO ile Optimize Edilmesi

PSO ile ilk test sistemi için parametre optimizasyonu gerçekleştirilirken, benzetim parametreleri Tablo 8’deki gibi alınmıştır. Benzetim, maksimum yineleme sayısına ulaşıldığında sonlandırılmıştır. Bu aşamada, G_{best} vektörü PID denetleyicisinin kazanç değerlerini vermektedir. Parametre optimizasyonunda parçacıkların, belirlenen maksimum hızı aşması ve arama bölgesinin sınırlarının dışına çıkması engellenmiştir.

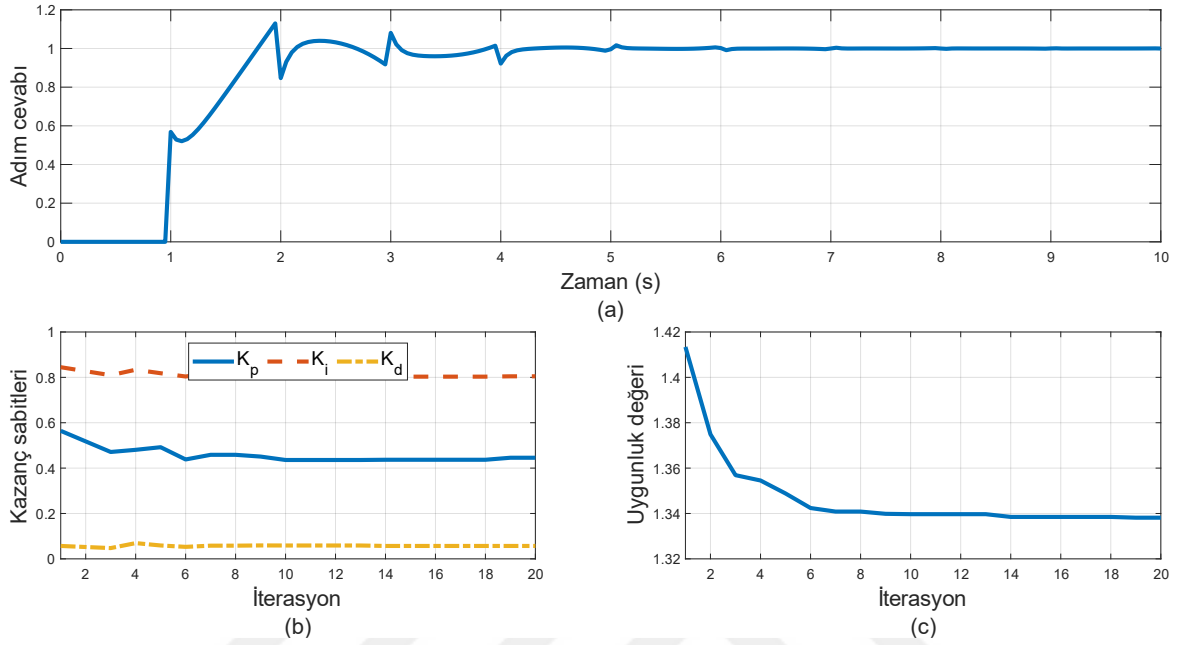
Simülasyon sonuçlarında, 100 bağımsız deneme için elde edilen en iyi uygunluk değerini veren sistem tepkisi, kazanç faktörü eğrileri ve uygunluk değeri eğrisi çizdirilmiştir. Ayrıca K_p , K_i , K_d , uygunluk değeri, maksimum aşma hatası, yükselme süresi ve oturma süresi tablolar halinde sunulmuştur. Tablolarda benzetim süresi 100 bağımsız denemenin toplam zamanını göstermektedir.

Tablo 8. Birinci sistem için PSO simülasyon parametreleri

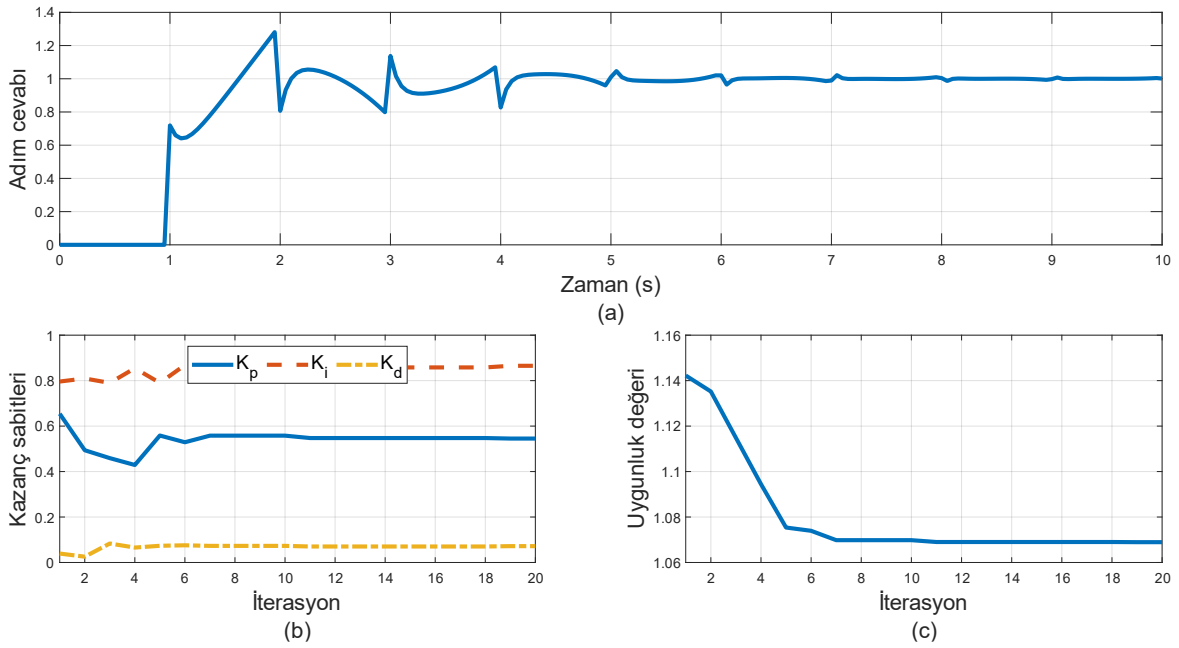
PSO Parametresi	Değer
C_1	2
C_2	2
Parçacıkların Sayısı	50
Parçacıkların Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 1
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 0,1
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	10 s
Örnekleme Periyodu	50 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100

Şekil 7 – Şekil 10’da kazanç faktörleri PSO algoritması ile optimize edilmiş PID denetleyici kullanılarak kontrol edilen ilk sistemin adım tepkisi, kazanç faktörlerinin ve

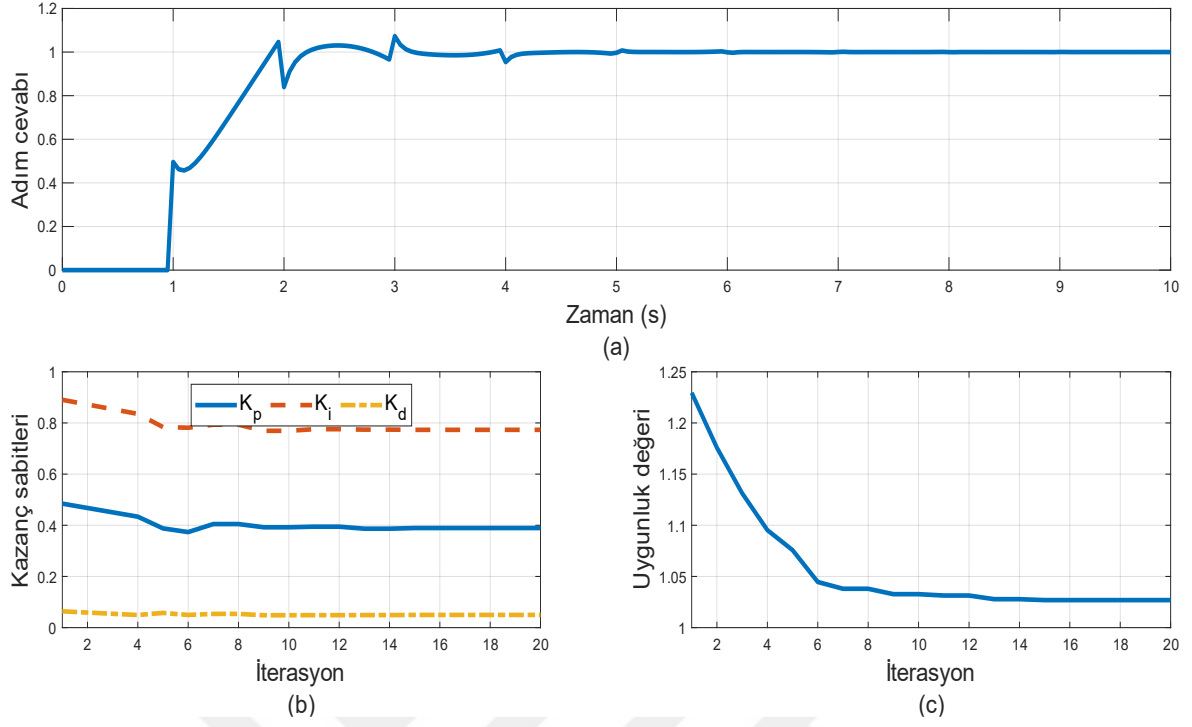
uygunluk değerin yinelemeye bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 7 – Şekil 10’da sistem çıkışlarının kararlı ve alt sönümlü olduğu görülmektedir.



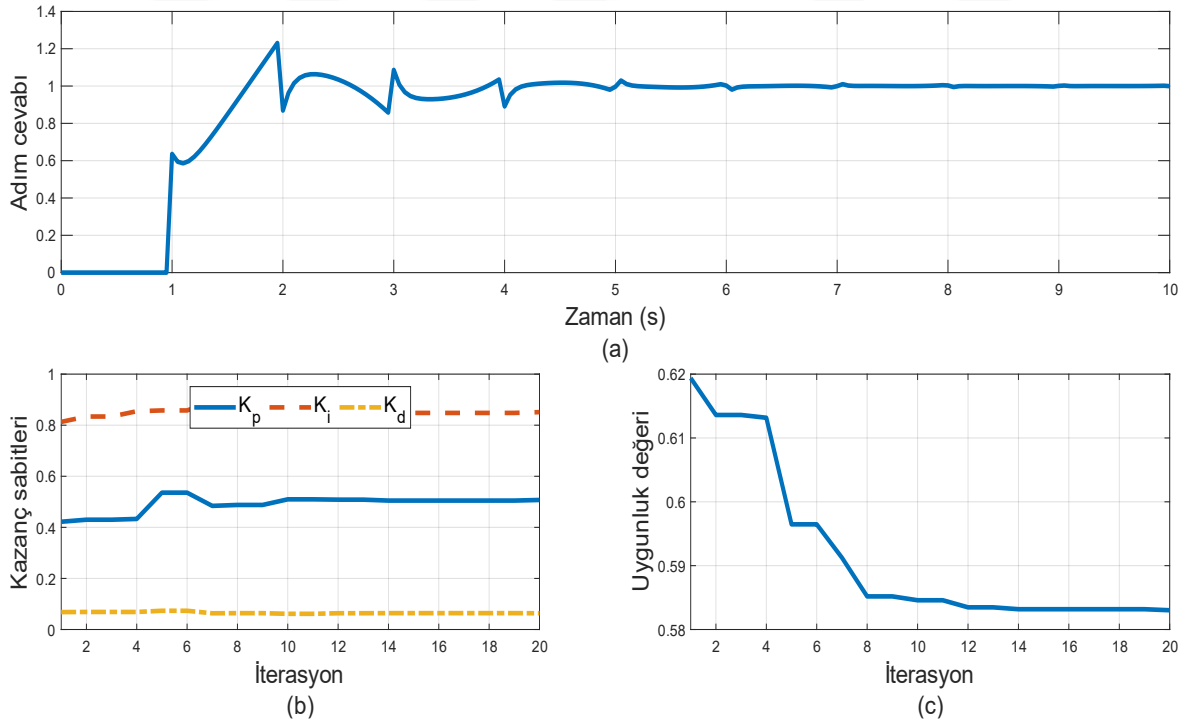
Şekil 7. Kazanç faktörleri PSO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 8. Kazanç faktörleri PSO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 9. Kazanç faktörleri PSO ile ITAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 10. Kazanç faktörleri PSO ile ITSE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 9. 1. sistem için PSO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri

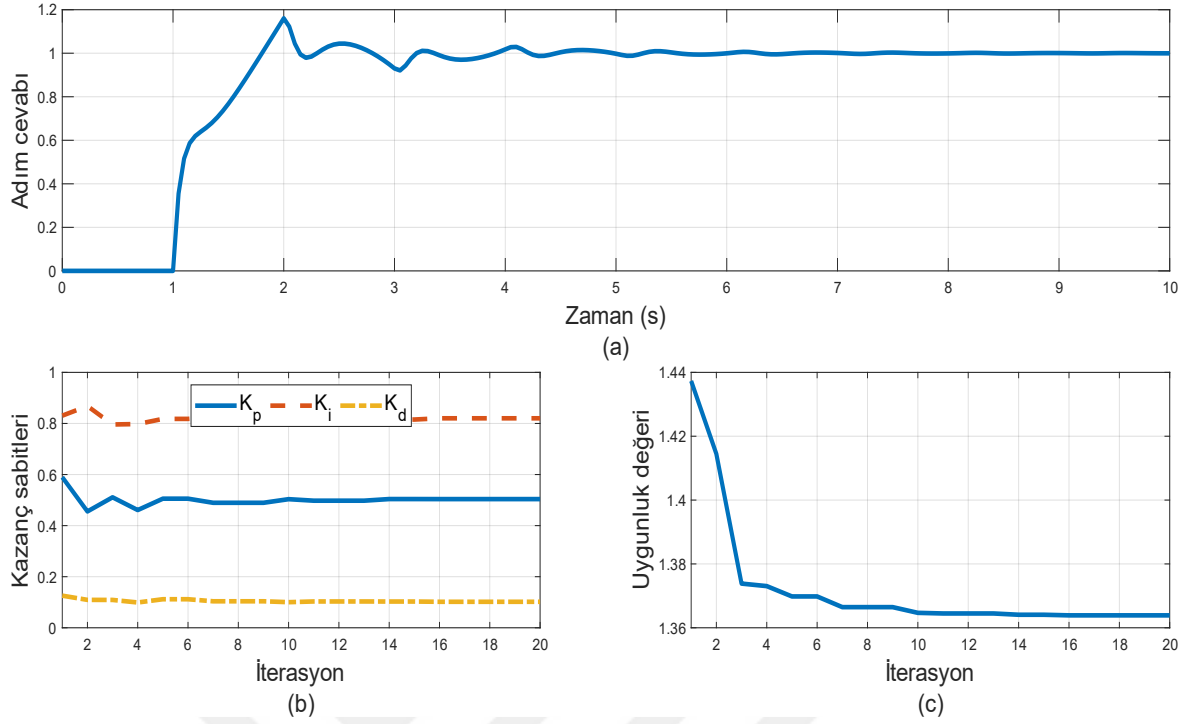
Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	0,4457	0,5452	0,3893	0,5072
İntegral Kazancı	0,8046	0,8653	0,7731	0,8512
Türevsel Kazanç	0,0568	0,0719	0,0496	0,0636
Yükselme Süresi (s)	0,7052	0,5524	0,8002	0,6019
Oturma Süresi (s)	4,0955	7,0517	4,0626	5,0774
Maksimum Aşma (%)	12,9905	27,9302	7,3486	23,1627
Uygunluk Değeri	1,3381	1,0689	1,0269	0,5830
Benzetim Süresi (s)	922,4376	807,1248	804,5624	808,7500

Tablo 9’da ilk sistem için bulunan kazanç faktörleri ve elde edilen başarımlar değerleri görülmektedir. Tabloda, her bir hata alanı kriteri için farklı kazanç değerleri bulunmuştur. En hızlı sistem tepkisi ISE kriteri ile elde edilmiştir. Eğer sistemin en az aşma ile en kısa sürede kararlı hale geçmesi isteniyorsa PID denetleyici parametreleri ITAE’ye göre belirlenmelidir. İlave olarak ITAE performans kistasına için yapılan optimizasyon daha kısa sürede sonuçlanmıştır.

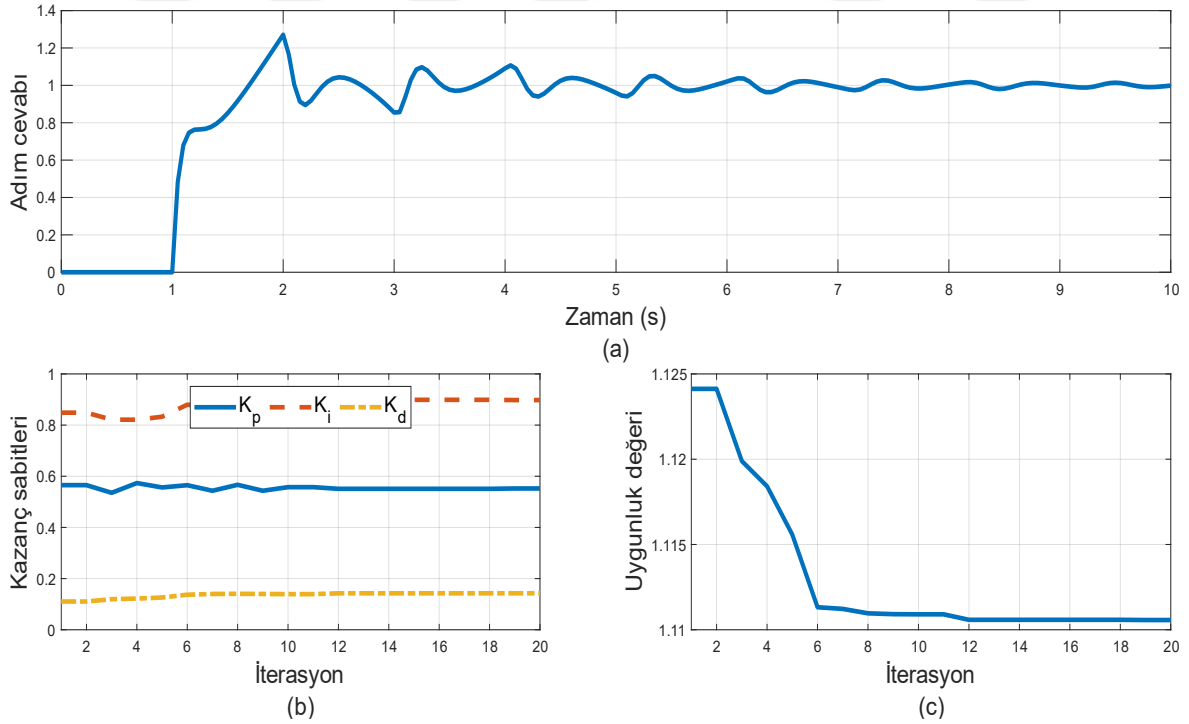
Tablo 10’da ikinci sistem için PSO benzetim parametreleri verilmiştir. Benzetim sonucunda elde edilen sistem çıkışı, kazanç faktörleri ve uygun değeri eğrileri Şekil 11 – Şekil 14’te görülmektedir. Sistem tepkilerine göre bulunan başarımlar değerleri ise Tablo 11’de özetlenmiştir.

Tablo 10. 2. sistem için PSO benzetim parametreleri

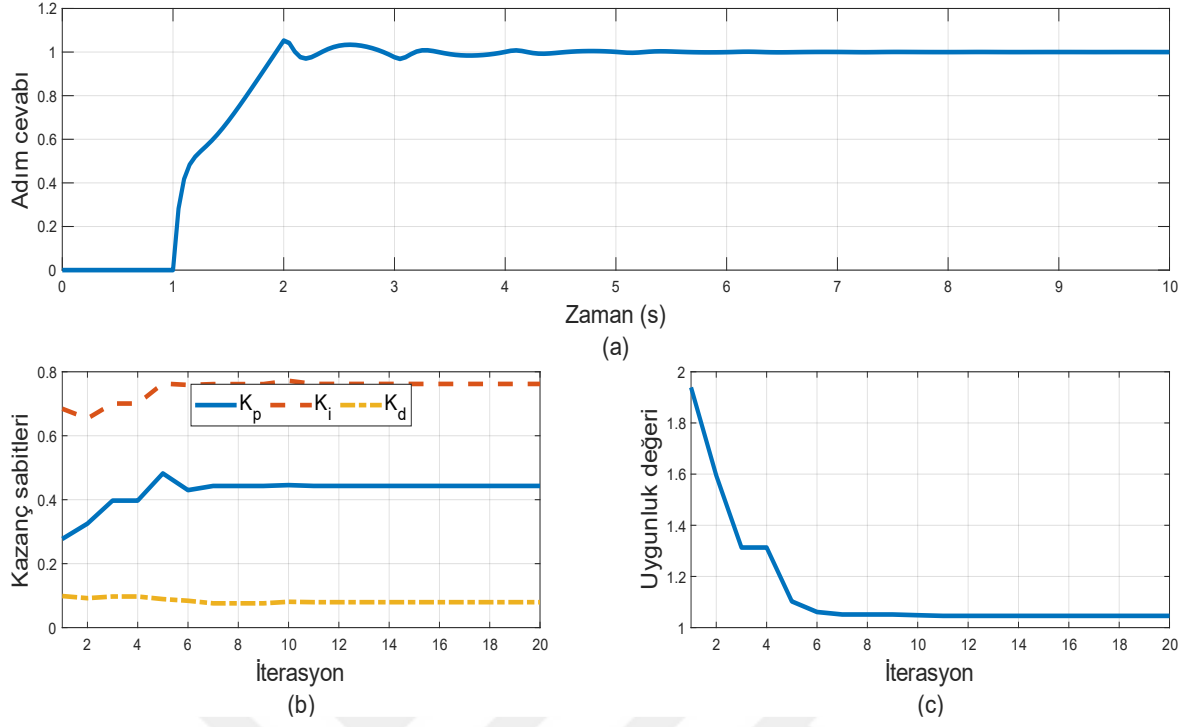
PSO Parametreleri	Değer
C_1	2
C_2	2
Parçacıkların Sayısı	50
Parçacıkların Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 1
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 0,2
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	10 s
Örnekleme Periyodu	50 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



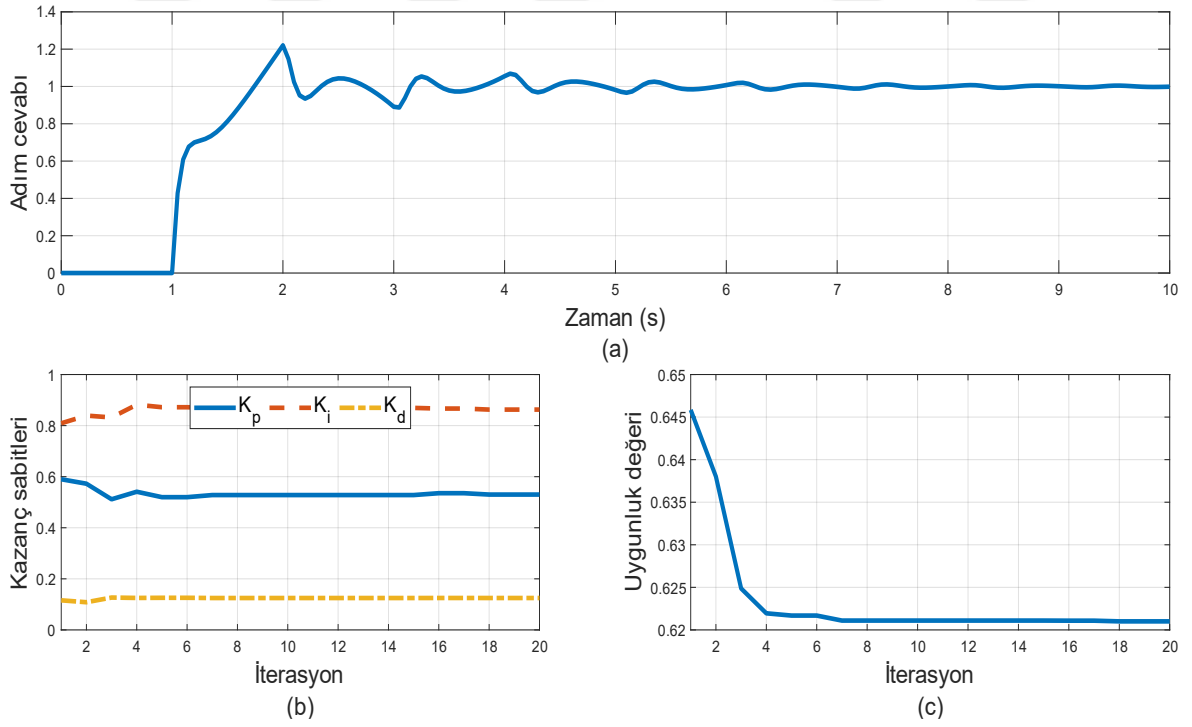
Şekil 11. Kazanç faktörleri PSO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 12. Kazanç faktörleri PSO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 13. Kazanç faktörleri PSO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 14. Kazanç faktörleri PSO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 11. İkinci sistem için PSO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar

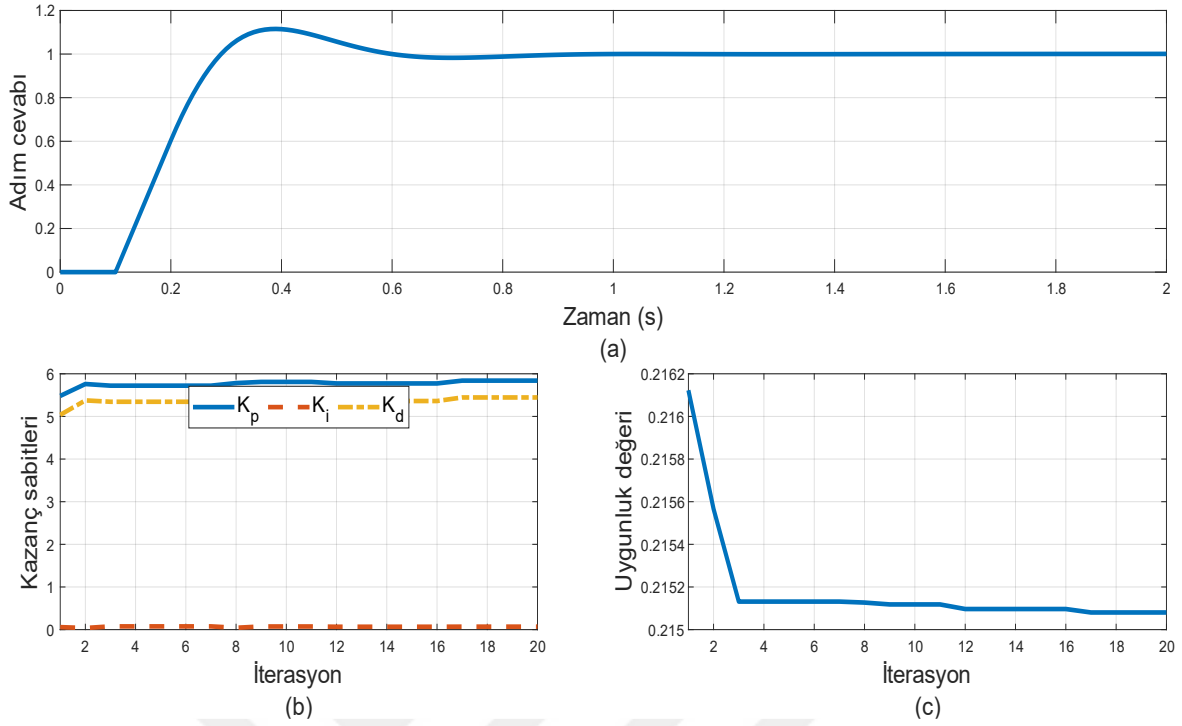
Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	0,5038	0,5522	0,4431	0,5300
İntegral Kazancı	0,8202	0,8978	0,7620	0,8626
Türevsel Kazanç	0,1018	0,1426	0,0795	0,1249
Yükselme Süresi (s)	0,6632	0,5557	0,7805	0,6044
Oturma Süresi (s)	4,1454	7,4921	3,1126	6,1581
Maksimum Aşma (%)	16,0742	27,2618	5,2881	22,2105
Uygunluk Değeri	1,3639	1,1106	1,0459	0,6210
Benzetim Süresi (s)	840,1876	842,3124	830,9376	835,0624

Tablo 11’de ilk sistemde olduğu gibi en hızlı sistem tepkisi ISE tabanlı uygunluk fonksiyonu ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca sistemin en kısa zamanda en hızlı şekilde kararlı hale geçmesi amaçlanıyorsa ITAE uygunluk fonksiyonu kullanılmalıdır. İlave olarak ITAE kriterine göre yapılan optimizasyon en kısa sürede tamamlanmıştır.

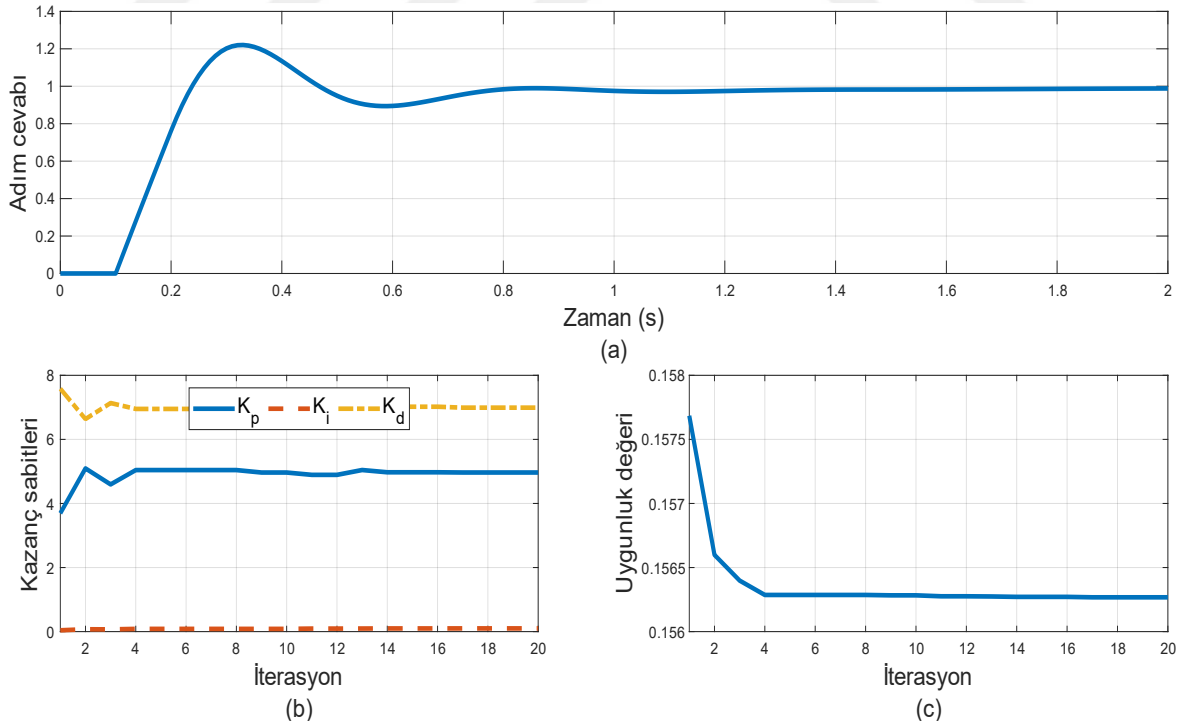
Tablo 12’de son sistem için benzetim parametreleri verilmiştir. Dört hata alanı tabanlı uygunluk fonksiyonu kullanılarak bulunan kazanç değerleri ile yapılan denetimle elde edilen adım cevabı, kazanç faktörleri ve uygunluk değeri eğrileri Şekil 15 – Şekil 18’de görülmektedir. İlk iki sistemde olduğu gibi, sistem çıkışı kararlı ve alt sönümlüdür. Ayrıca kalıcı hata oluşmamıştır.

Tablo 12. 3. sistem için PSO benzetim parametreleri

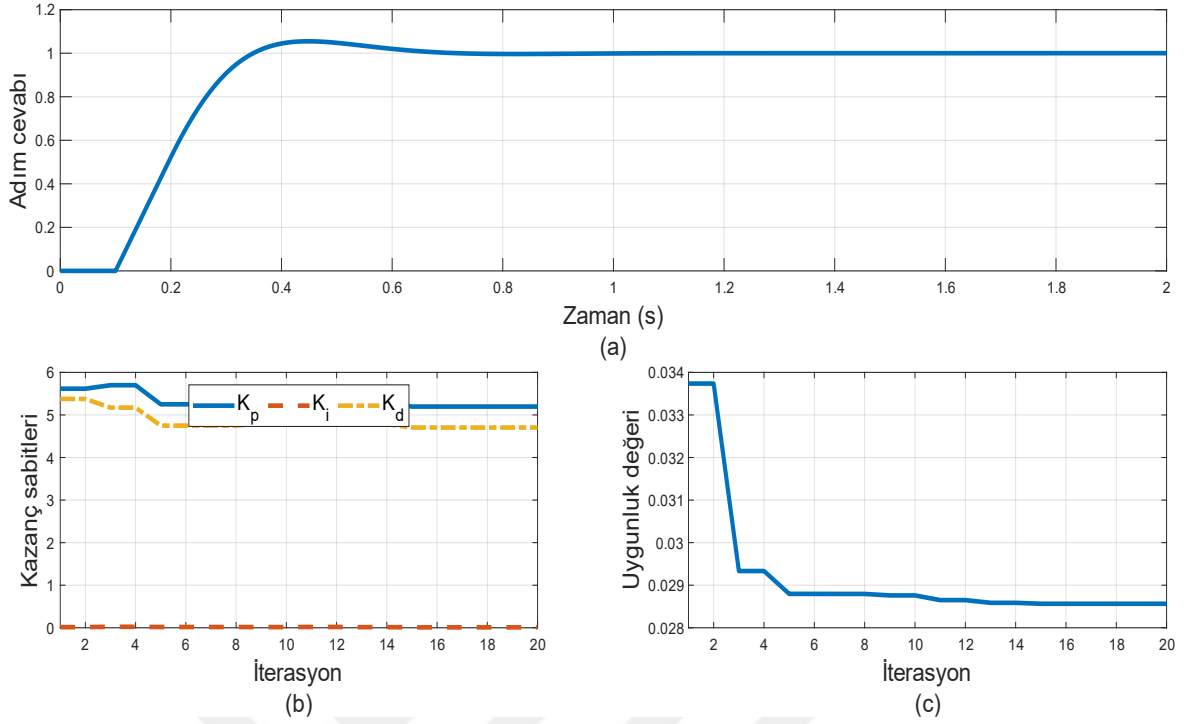
Parametre	Değer
C_1	2
C_2	2
Parçacıkların Sayısı	50
Parçacıkların Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 10
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 0,1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 10
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	2 s
Örnekleme Periyodu	10 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



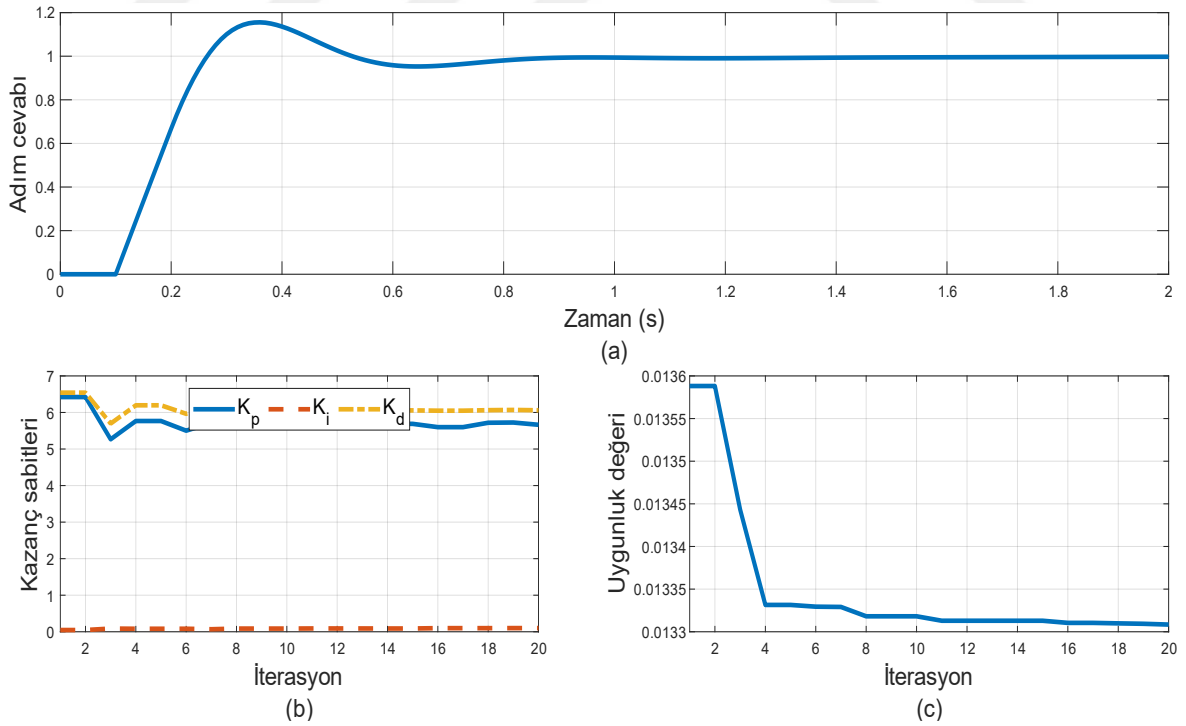
Şekil 15. Kazanç faktörleri PSO ile IAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 16. Kazanç faktörleri PSO ile ISE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 17. Kazanç faktörleri PSO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 18. Kazanç faktörleri PSO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 13. 3. sistem için PSO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri

Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	5,8395	4,9664	5,1970	5,6630
İntegral Kazancı	0,0694	0,1000	0,0102	0,1000
Türevsel Kazanç	5,4446	6,9906	4,7043	6,0599
Yükselme Süresi (s)	0,1438	0,1058	0,1778	0,1257
Oturma Süresi (s)	0,5554	0,7530	0,5992	0,7849
Maksimum Aşma (%)	11,4340	23,4676	5,4648	15,8266
Uygunluk Değeri	0,2151	0,1563	0,0286	0,0133
Benzetim Süresi (s)	756,6876	757,6876	761,5000	758,8124

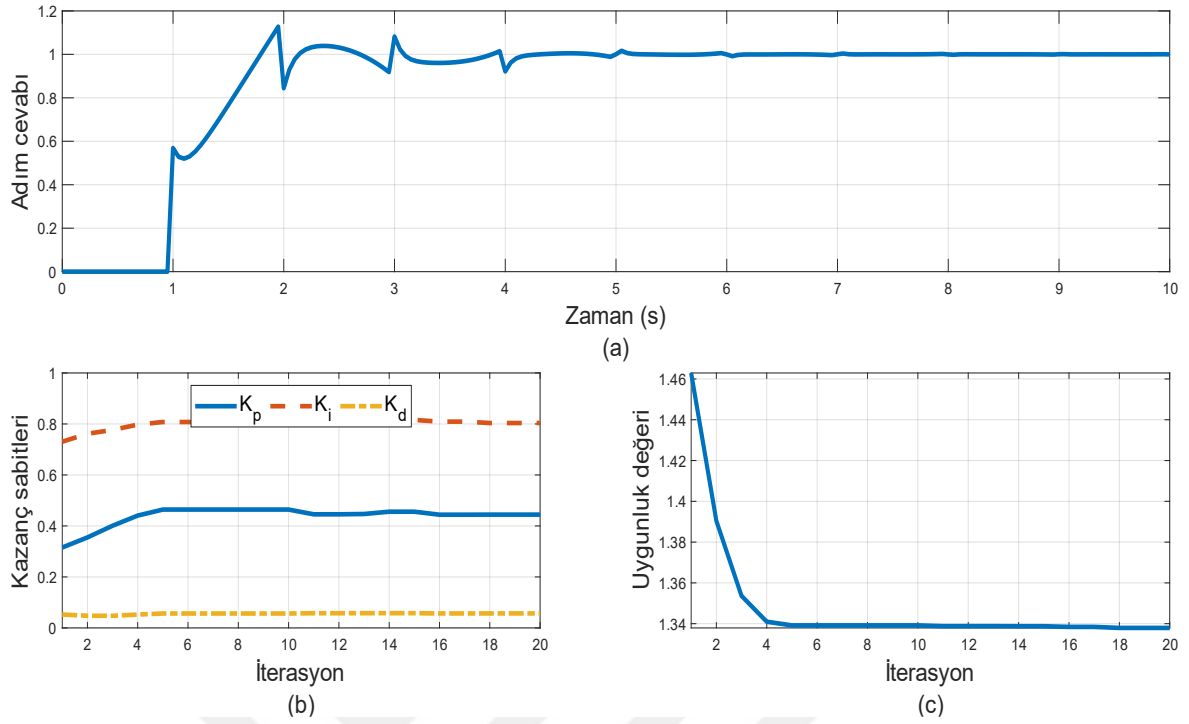
Tablo 13'te en hızlı sistem cevabı ISE, en erken kararlı duruma geçiş ve en düşük benzetim süresi IAE ve en az aşma hatası ITAE uygunluk fonksiyonu ile elde edilmiştir.

2.4. PID Denetleyici Parametrelerinin RHO ile Optimize Edilmesi

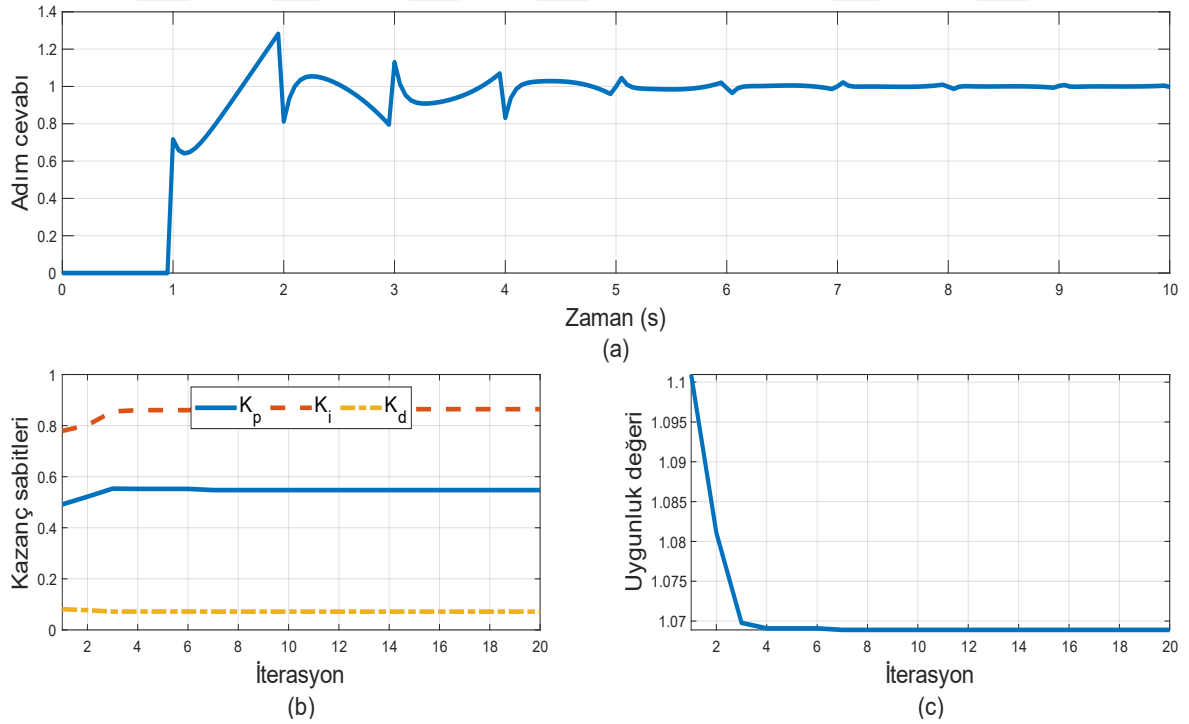
RHO algoritması PSO ile oldukça benzer özelliklere sahip güncel bir optimizasyon yöntemidir. İlk sistem için benzetim parametreleri Tablo 14'te verilmiştir. Ayrıca Şekil 19 – Şekil 22'de sistem çıkışı, kazanç faktörleri ve uygunluk değeri eğrileri verilmiştir.

Tablo 14. 1. sistem için RHO benzetim parametreleri

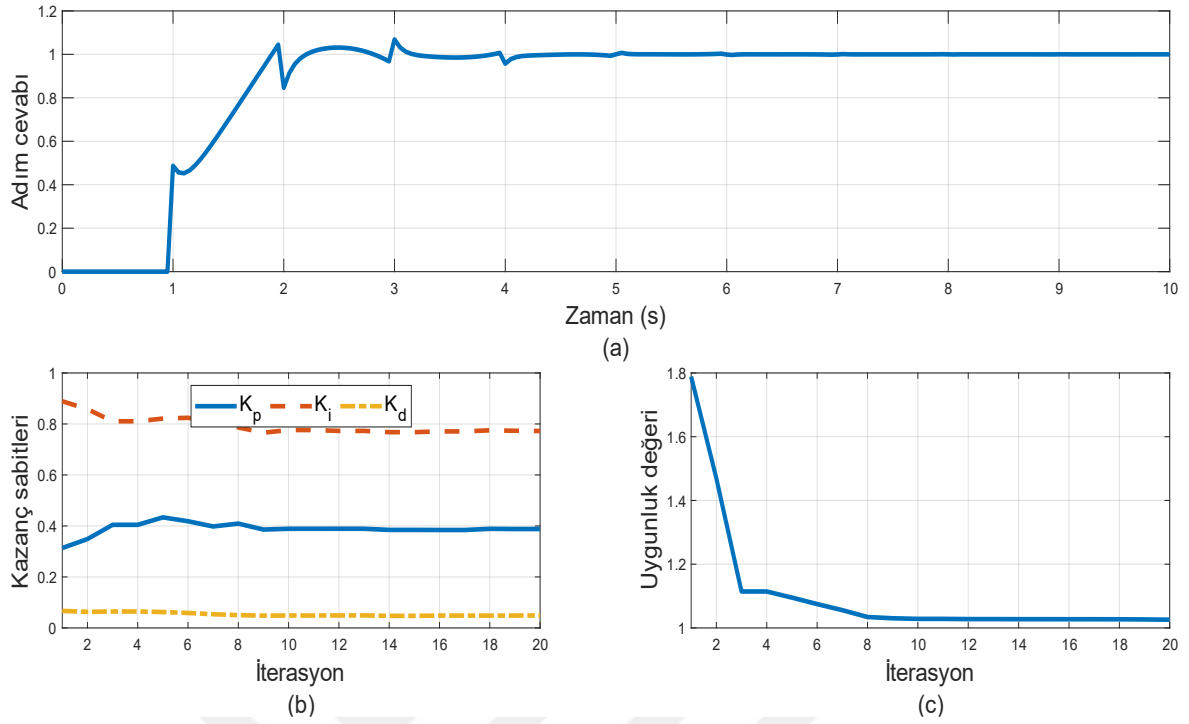
Parametre	Değer
C_1	0,7
C_2	0,8
W_{max}	1
W_{min}	0
Parçacıkların Sayısı	50
Parçacıkların Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 1
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 0,1
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	10 s
Örnekleme Periyodu	50 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



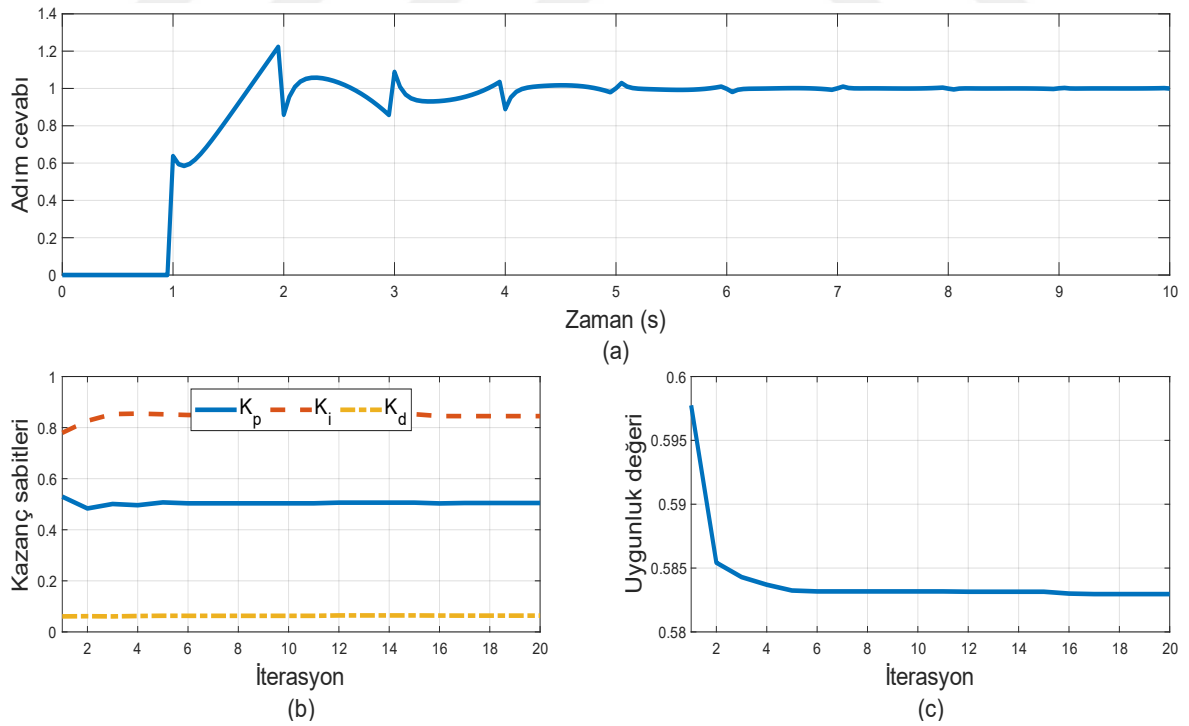
Şekil 19. Kazanç faktörleri RHO ile IAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 20. Kazanç faktörleri RHO ile ISE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 21. Kazanç faktörleri RHO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 22. Kazanç faktörleri RHO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 15. 1. sistem için RHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri

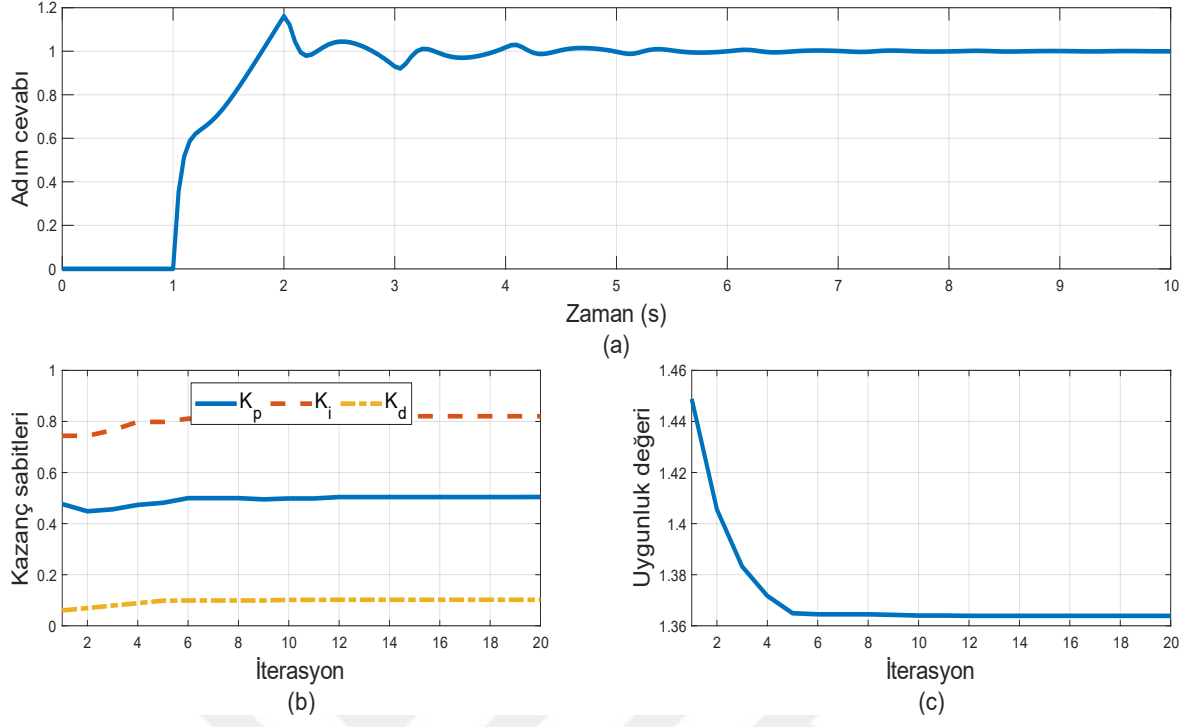
Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	0,4444	0,5475	0,3880	0,5048
İntegral Kazancı	0,8037	0,8643	0,7724	0,8450
Türevsel Kazanç	0,0569	0,0717	0,0487	0,0637
Yükselme Süresi (s)	0,7073	0,5465	0,8024	0,6083
Oturma Süresi (s)	4,0946	7,0613	4,0601	5,0756
Maksimum Aşma (%)	12,8067	28,5219	6,9066	22,3768
Uygunluk Değeri	1,3379	1,0689	1,0258	0,5830
Benzetim Süresi (s)	810,8752	815,7500	803,7500	797,3752

Tablo 15'te en hızlı sistem cevabının ISE, en düşük oturma zamanı ve en az aşma hatasının ITAE ve en kısa benzetim süresinin ITSE uygun fonksiyonu kullanılarak elde edildiği görülmektedir.

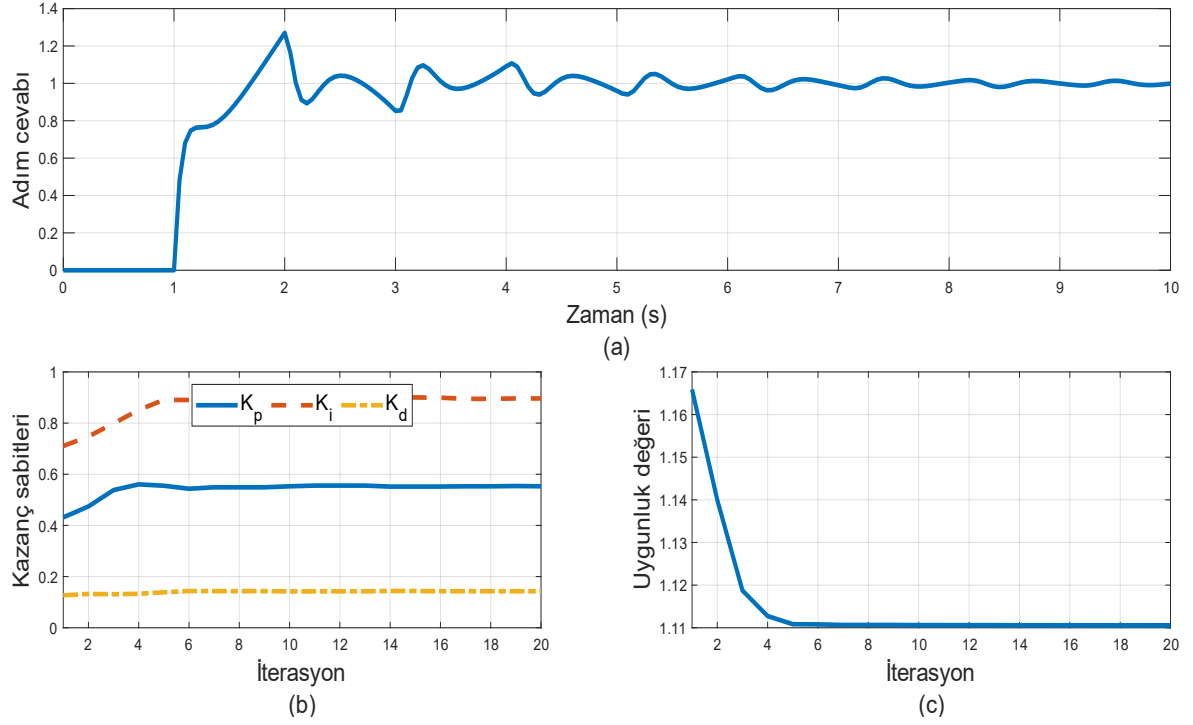
Tablo 16'da ikinci sistem için RHO benzetim parametreleri verilmiştir. İlk sistemde olduğu gibi Şekil 23 – Şekil 26'da görülen adım cevapları kararlı ve alt sönümlüdür. Ayrıca kalıcı hata oluşmamıştır.

Tablo 16. 2. sistem için RHO benzetim parametreleri

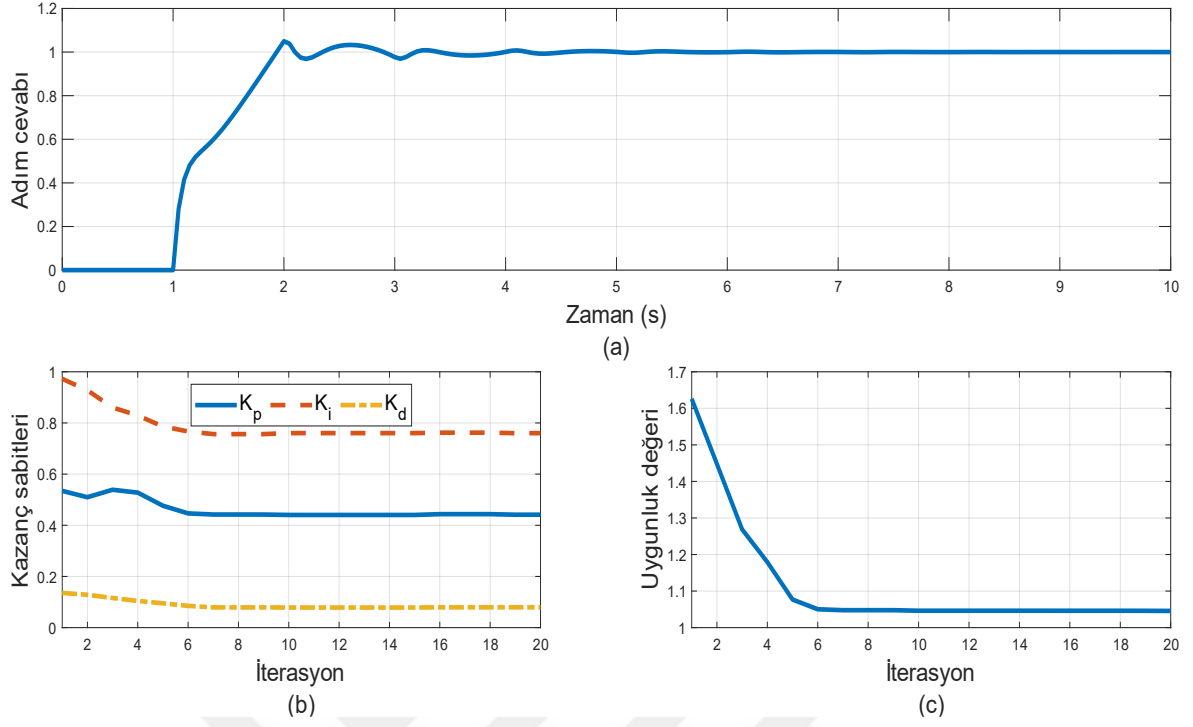
Parametre	Değer
C_1	0,7
C_2	0,8
W_{max}	1
W_{min}	0
Parçacıkların Sayısı	50
Parçacıkların Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 1
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 0,2
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	10 s
Örnekleme Periyodu	50 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



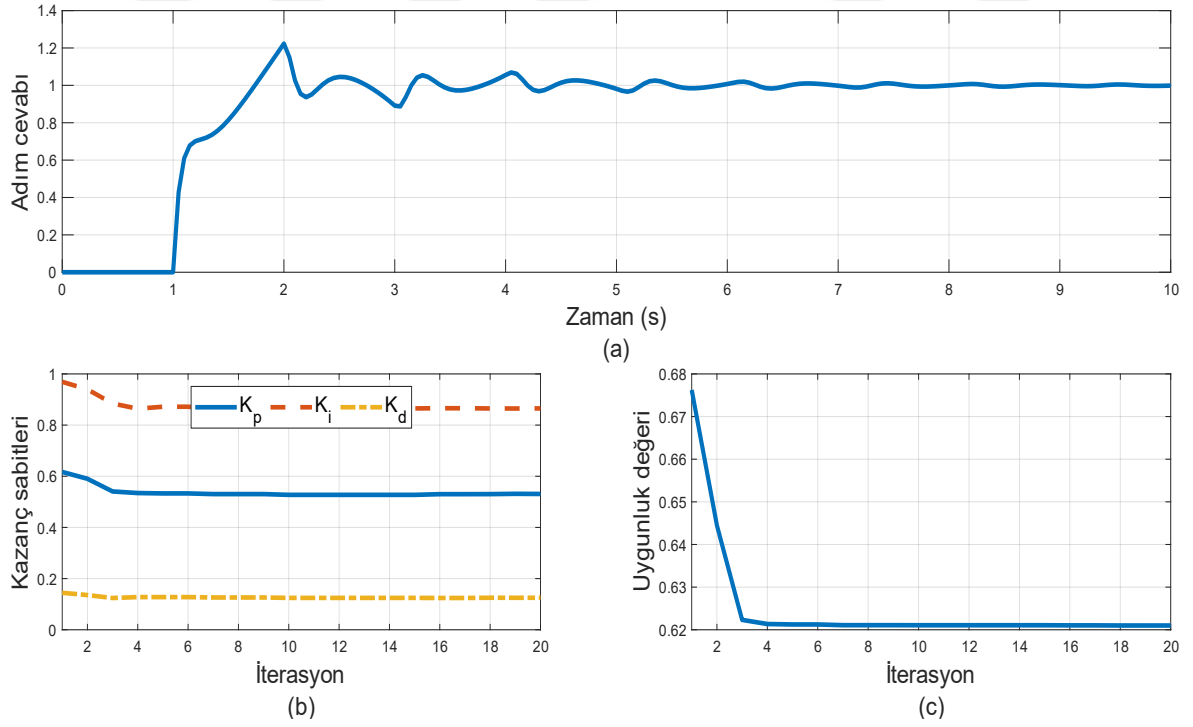
Şekil 23. Kazanç faktörleri RHO ile IAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 24. Kazanç faktörleri RHO ile ISE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 25. Kazanç faktörleri RHO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 26. Kazanç faktörleri RHO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 17. 2. sistem için RHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar

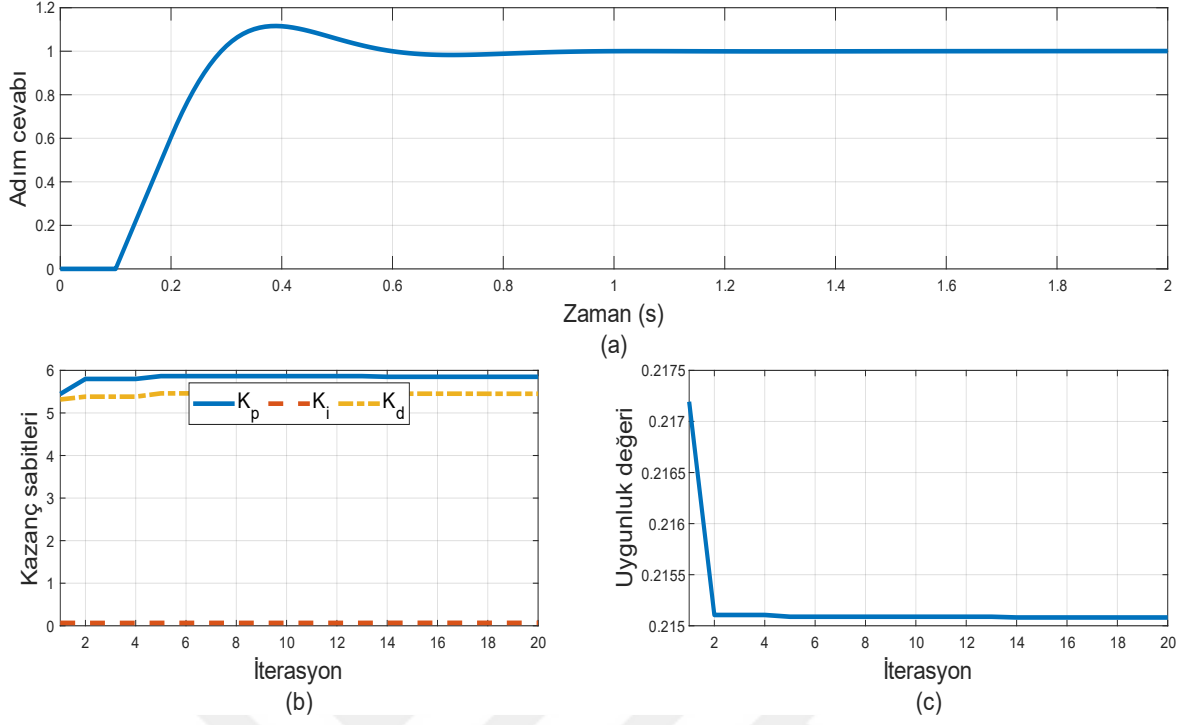
Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	0,5042	0,5529	0,4413	0,5308
İntegral Kazancı	0,8203	0,8963	0,7601	0,8652
Türevsel Kazanç	0,1018	0,1426	0,0792	0,1251
Yükselme Süresi (s)	0,6627	0,5555	0,7842	0,6021
Oturma Süresi (s)	4,1457	7,4930	3,1110	6,1592
Maksimum Aşma (%)	16,1239	27,2128	4,9687	22,4982
Uygunluk Değeri	1,3639	1,1106	1,0457	0,6210
Benzetim Süresi (s)	822,1248	815,4376	805,6876	825,4376

İlk sistemde olduğu gibi Tablo 17’de görüldüğü gibi en hızlı sistem tepkisi için ISE, en az aşma hatası, en kısa zamanda kararlı hale geçiş ve en düşük benzetim süresi için ITAE tabanlı uygunluk fonksiyonu kullanılmalıdır.

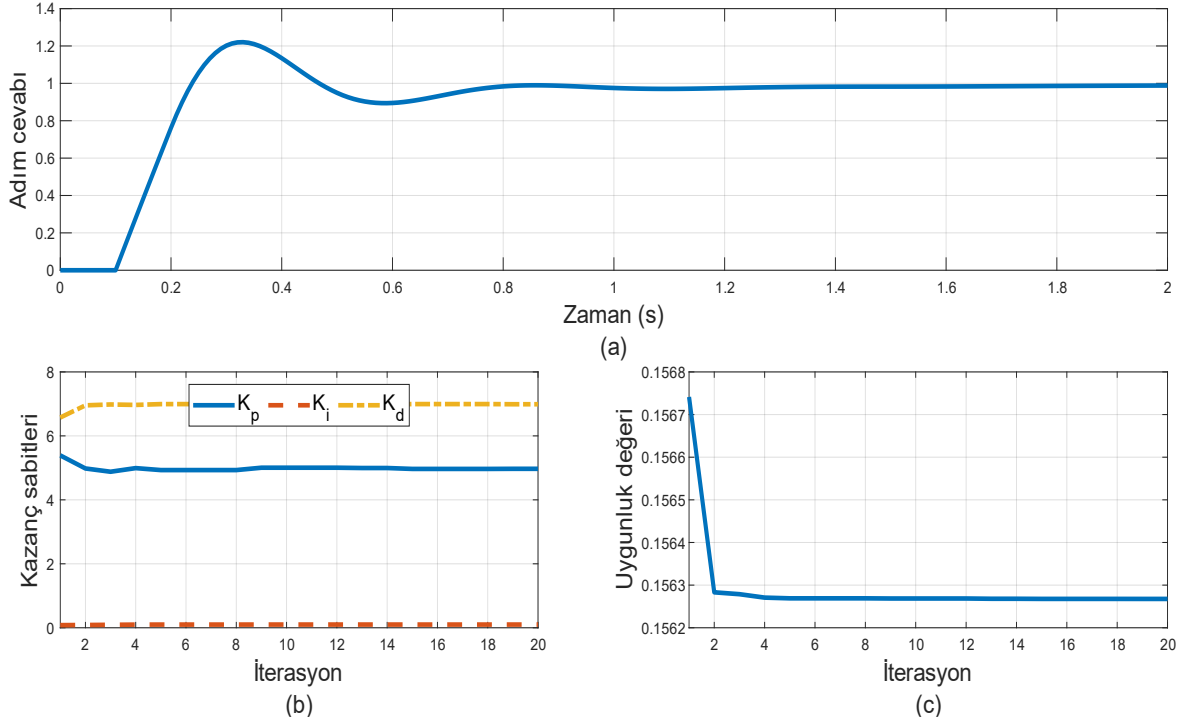
Son sistem için benzetim parametreleri Tablo 17 ve benzetim sonuçları Şekil 27 – Şekil 30’da verilmiştir. Şekillerde sistem çıkışlarının kararlı ve alt sönümlü olduğu görülmektedir.

Tablo 18. 3. sistem için RHO benzetim parametreleri

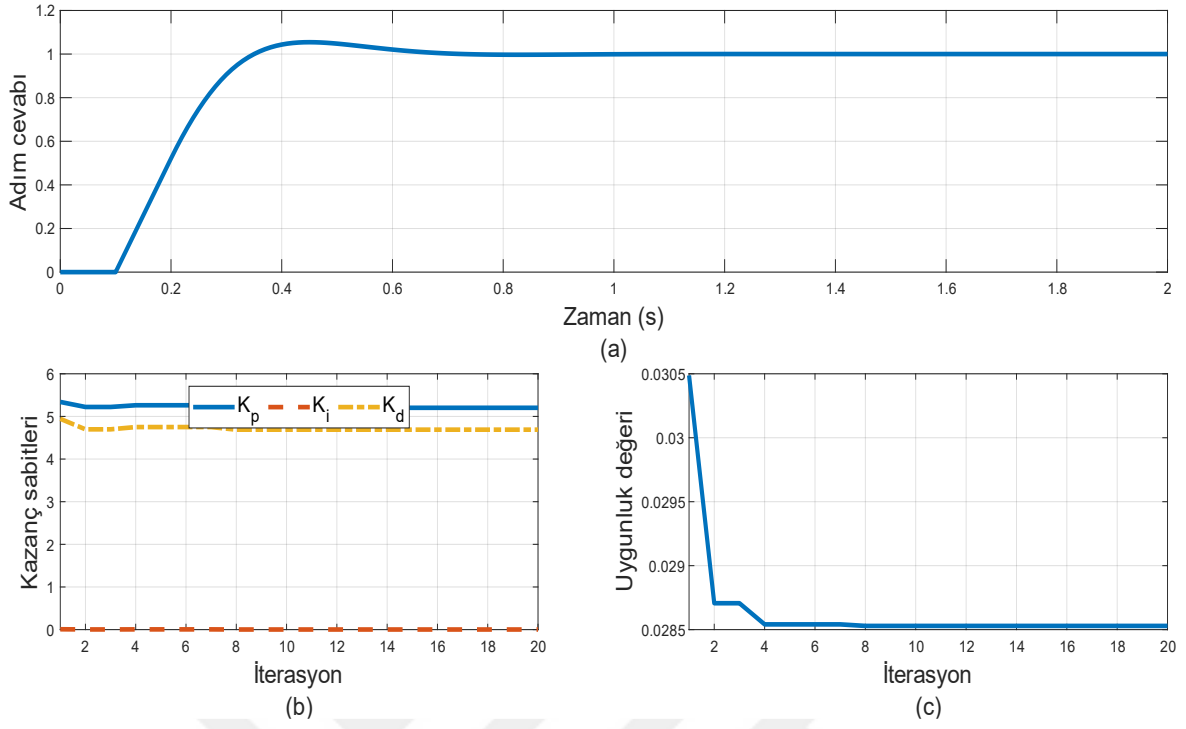
Parametre	Değer
C_1	0,7
C_2	0,8
W_{max}	1
W_{min}	0
Parçacıkların Sayısı	50
Parçacıkların Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 10
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 0,1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 10
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	2 s
Örnekleme Periyodu	10 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



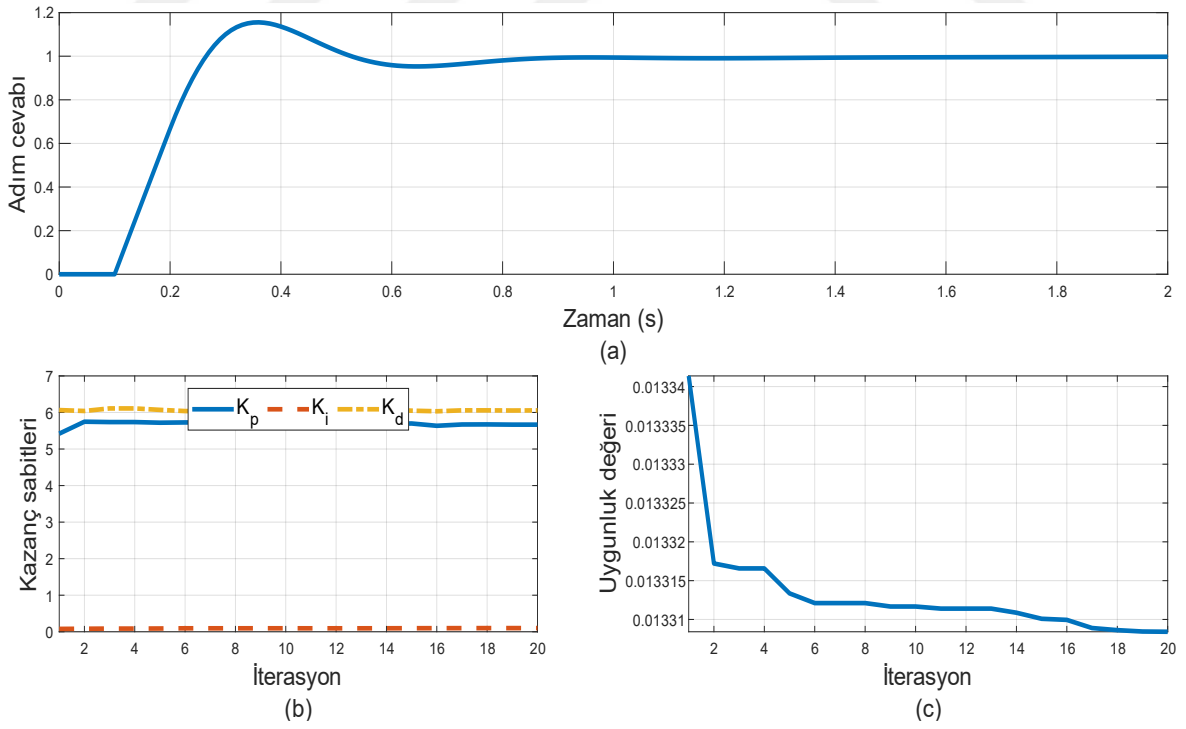
Şekil 27. Kazanç faktörleri RHO ile IAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 28. Kazanç faktörleri RHO ile ISE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 29. Kazanç faktörleri RHO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 30. Kazanç faktörleri RHO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 19. 3. sistem için RHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri

Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	5,8491	4,9704	5,2023	5,6667
İntegral Kazancı	0,0685	0,1000	0,0025	0,1000
Türevsel Kazanç	5,4506	6,9894	4,6893	6,0569
Yükselme Süresi (s)	0,1435	0,1059	0,1785	0,1257
Oturma Süresi (s)	0,5552	0,7530	0,6025	0,7848
Maksimum Aşma (%)	11,5001	23,4600	5,4299	15,8083
Uygunluk Değeri	0,2151	0,1563	0,0285	0,0133
Benzetim Süresi (s)	760,5624	758,4376	758,6248	734,8124

Tablo 19’da parametreleri RHO algoritması kullanılarak optimize edilen PID denetleyicinin başarımlar değerleri sunulmuştur. Tabloda görüldüğü gibi en hızlı sistem tepkisi ISE, en hızlı kararl duruma geçiş IAE, en düşük aşma ITAE ve en kısa benzetim süresi ITSE ile elde edilmiştir.

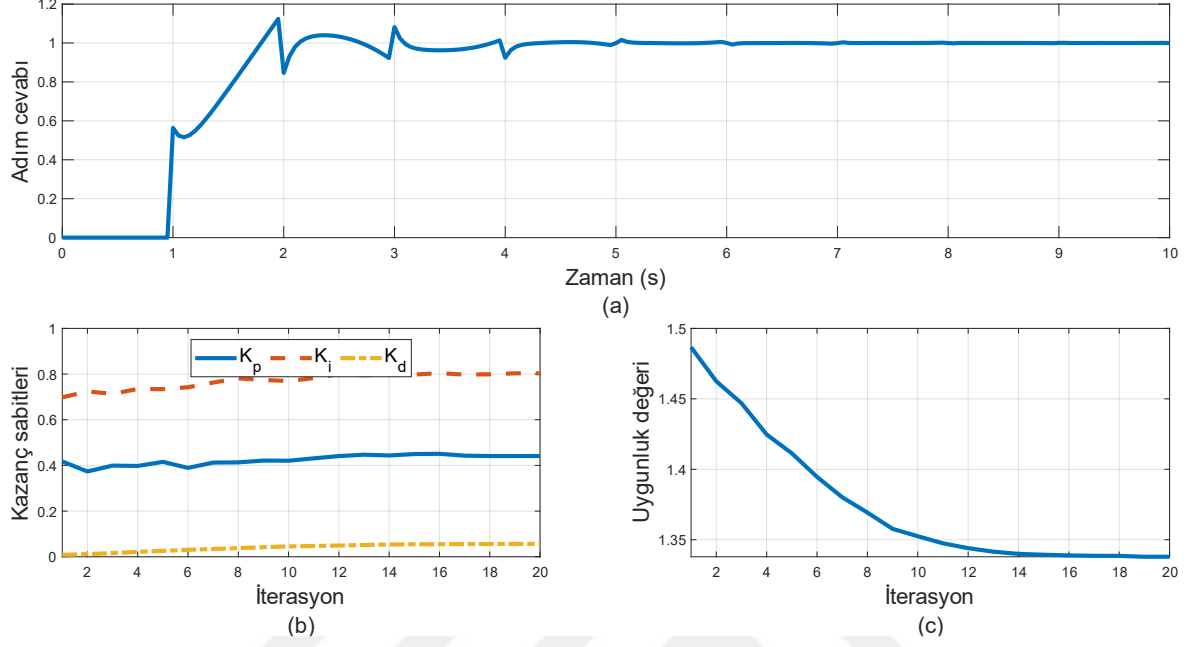
2.5. PID Denetleyici Parametrelerinin DRHO ile Optimize Edilmesi

DRHO algoritması RHO yönteminin bir varyantı olup, bu yöntemde C_1 ve C_2 ağırlıklandırma sabitleri her yinelemede parçacığın konum hesaplanırken 0,4 ile 0,9 aralığında rastgele alınmıştır. Bildiğimiz kadarı ile DRHO algoritması daha önce PID kazanç faktörlerinin optimize edilmesinde kullanılmamış olup, ilk kez bu yüksek lisans tezinde kullanılmıştır.

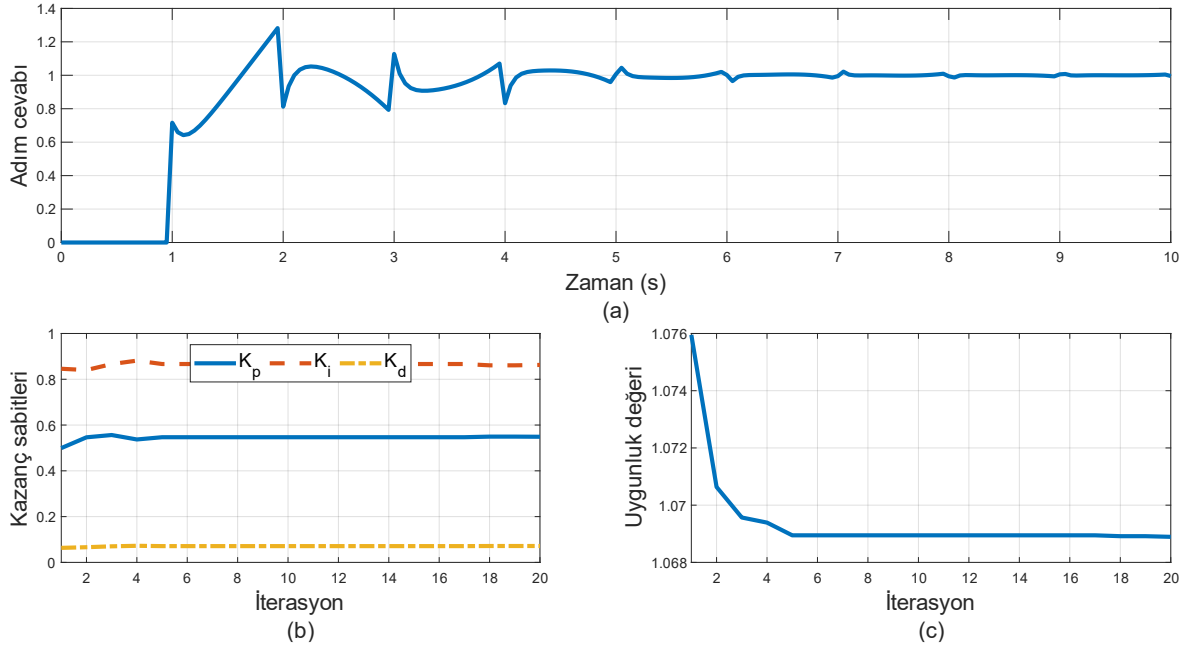
Tablo 20. 1. sistem için DRHO benzetim parametreleri

Parametre	Değer
W_{max}	1
W_{min}	0
Parçacıkların Sayısı	50
Parçacıkların Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 1
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 0,1
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	10 s
Örnekleme Periyodu	50 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100

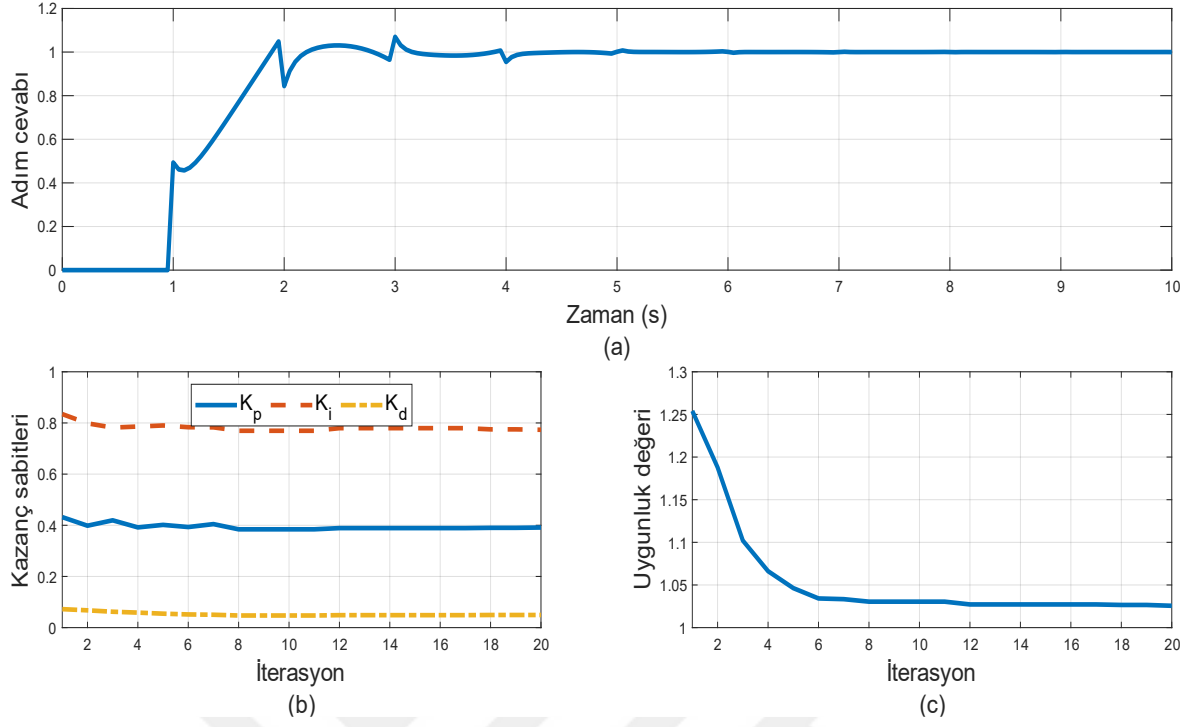
Tablo 20’de ilk sistem için benzetim parametreleri ve Şekil 31 – Şekil 34’te sistem çıkışı, kazanç faktörleri ve uygunluk değeri eğrileri verilmiştir.



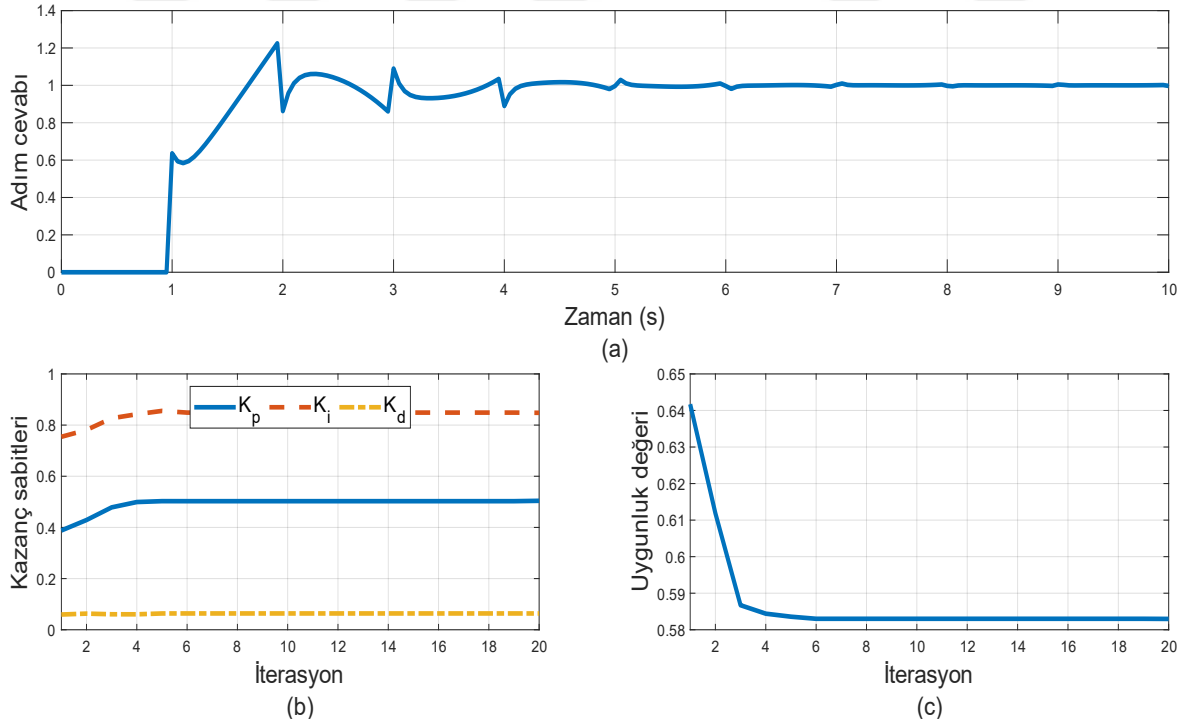
Şekil 31. Kazanç faktörleri DRHO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 32. Kazanç faktörleri DRHO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 33. Kazanç faktörleri DRHO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 34. Kazanç faktörleri DRHO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 21. 1. sistem için DRHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri

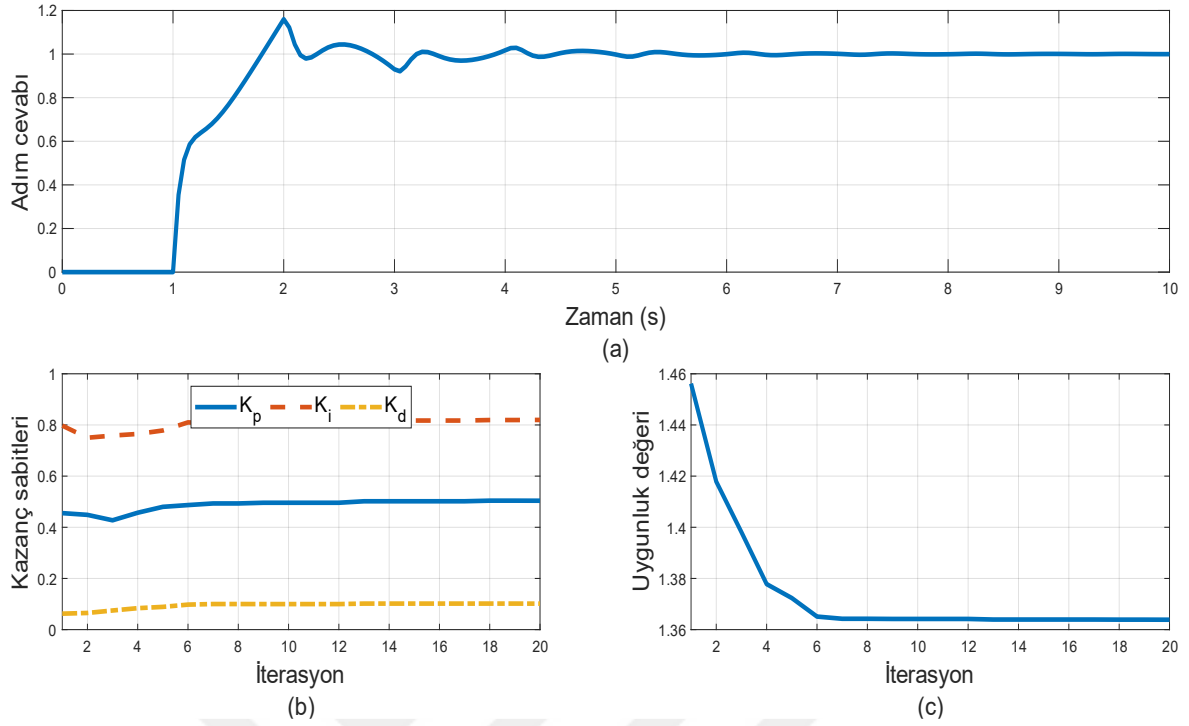
Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	0,4411	0,5488	0,3913	0,5041
İntegral Kazancı	0,8033	0,8626	0,7733	0,8480
Türevsel Kazanç	0,0564	0,0716	0,0494	0,0637
Yükselme Süresi (s)	0,7116	0,5437	0,7975	0,6049
Oturma Süresi (s)	4,0940	7,0674	4,0653	5,0829
Maksimum Aşma (%)	12,4425	28,7689	7,0003	22,8686
Uygunluk Değeri	1,3379	1,0689	1,0256	0,5830
Benzetim Süresi (s)	1033,6876	1069,5000	927,5624	949,4376

Tablo 21’de PID kazanç faktörleri, en hızlı sistem tepkisi için ISE, en düşük oturma zamanı, en az aşma hatası ve en kısa benzetim süresi için ITAE tabanlı uygun fonksiyonu kullanılarak optimize edilmesi gerektiği görülmektedir.

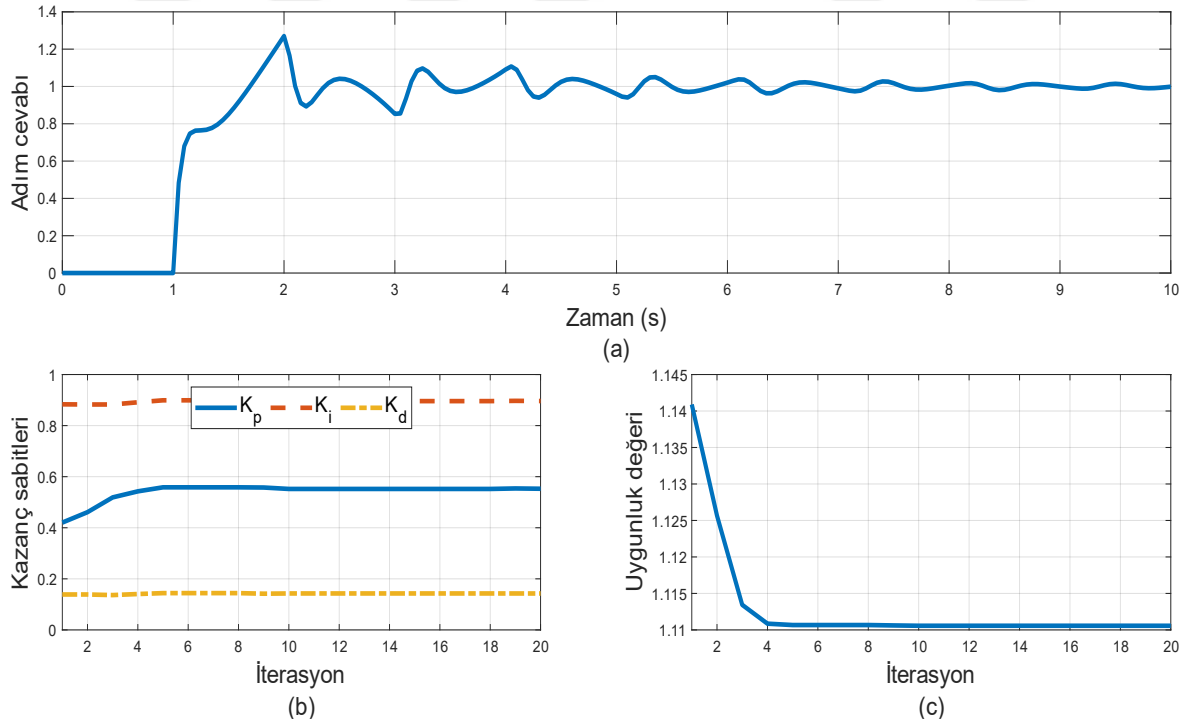
Tablo 22’de 2. Sistem için DRHO benzetim parametreleri verilmiştir. İlk sistemde olduğu gibi Şekil 35 – Şekil 38’de görülen sistem çıkışları kararlı ve alt sönümlüdür. Ayrıca kalıcı hata oluşmamıştır.

Tablo 22. 2. sistem için DRHO benzetim parametreleri

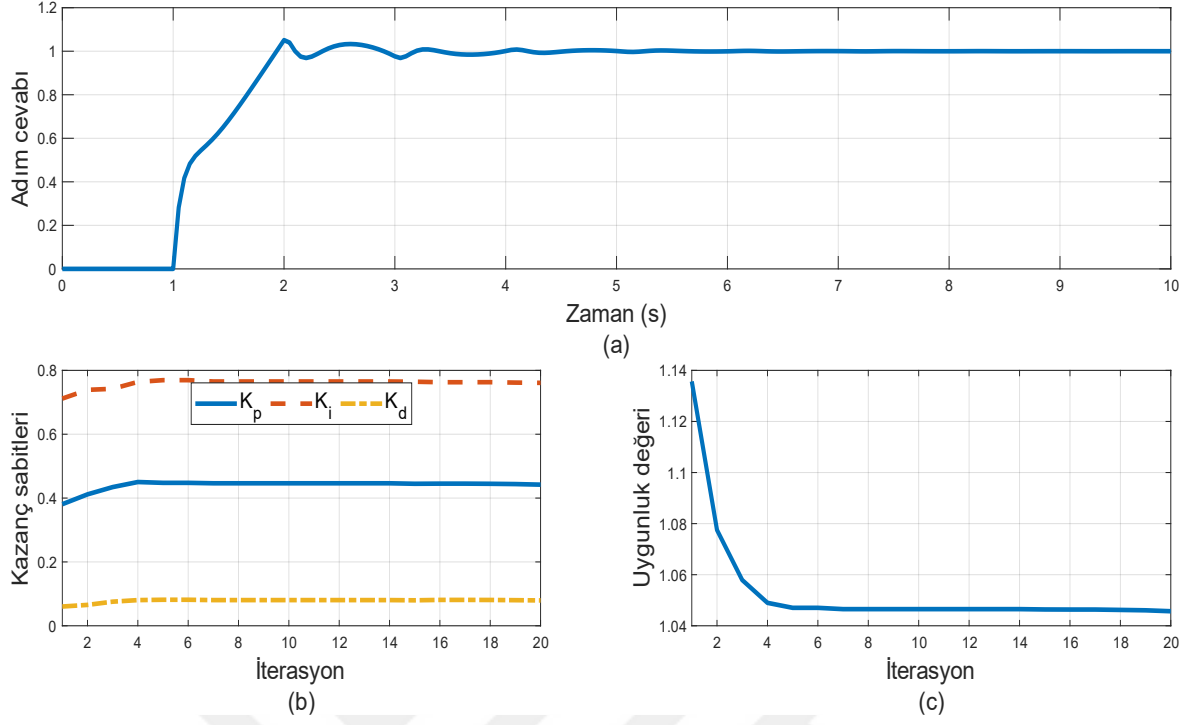
Parametre	Değer
W_{max}	1
W_{min}	0
Parçacıkların Sayısı	50
Parçacıkların Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 1
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 0,2
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	10 s
Örnekleme Periyodu	50 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



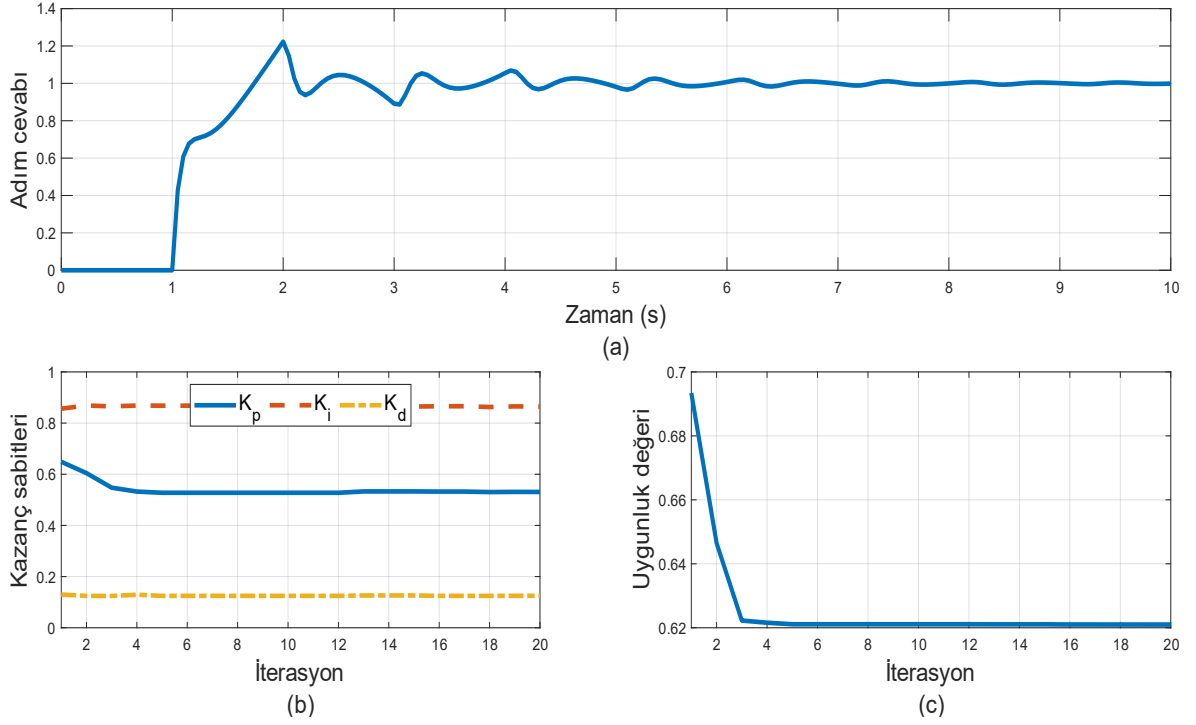
Şekil 35. Kazanç faktörleri DRHO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 36. Kazanç faktörleri DRHO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 37. Kazanç faktörleri DRHO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 38. Kazanç faktörleri DRHO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 23. 2. sistem için DRHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri

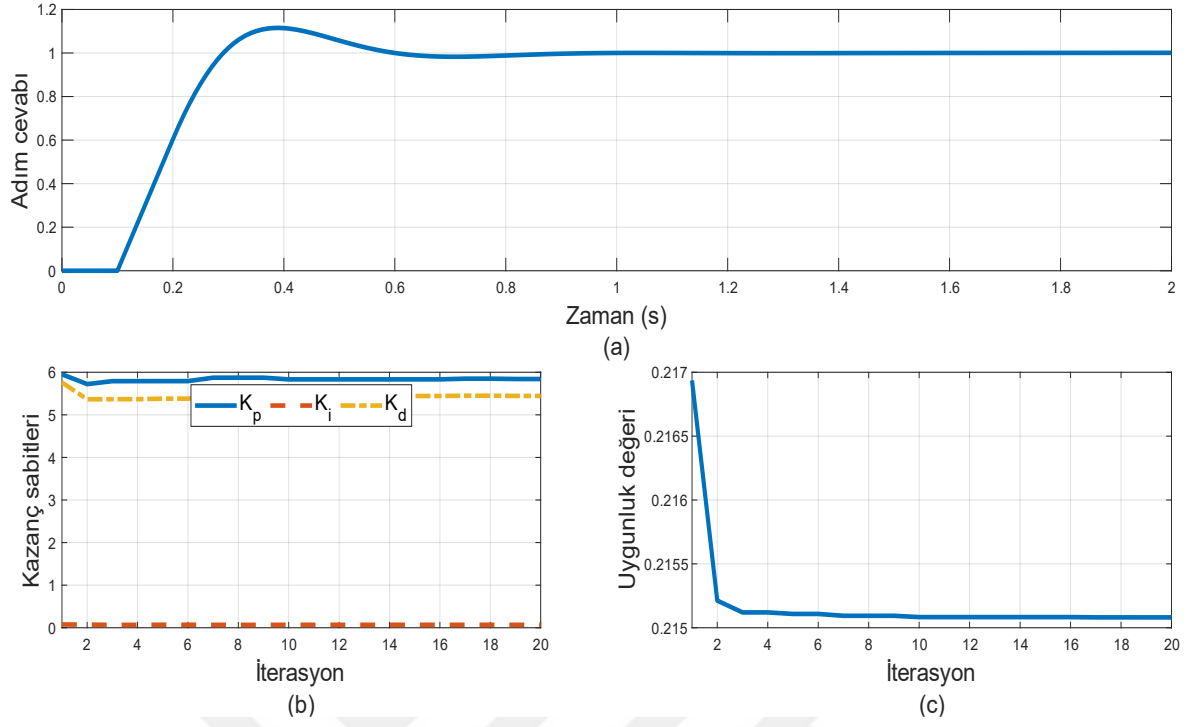
Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	0,5038	0,5528	0,4420	0,5309
İntegral Kazancı	0,8196	0,8962	0,7609	0,8647
Türevsel Kazanç	0,1015	0,1426	0,0794	0,1250
Yükselme Süresi (s)	0,6636	0,5558	0,7827	0,6022
Oturma Süresi (s)	4,1445	7,4928	3,1117	6,1586
Maksimum Aşma (%)	16,0234	27,1905	5,1022	22,4650
Uygunluk Değeri	1,3639	1,1106	1,0457	0,6210
Benzetim Süresi (s)	989,0000	1017,8124	999,8124	997,8124

İlk sistemde olduğu gibi Tablo 23'te en hızlı sistem tepkisi için ISE, en az hata ile en kısa zamanda kararlı hale geçiş için ITAE ve en düşük benzetim süresi için IAE tabanlı uygunluk fonksiyonu kullanılmalıdır.

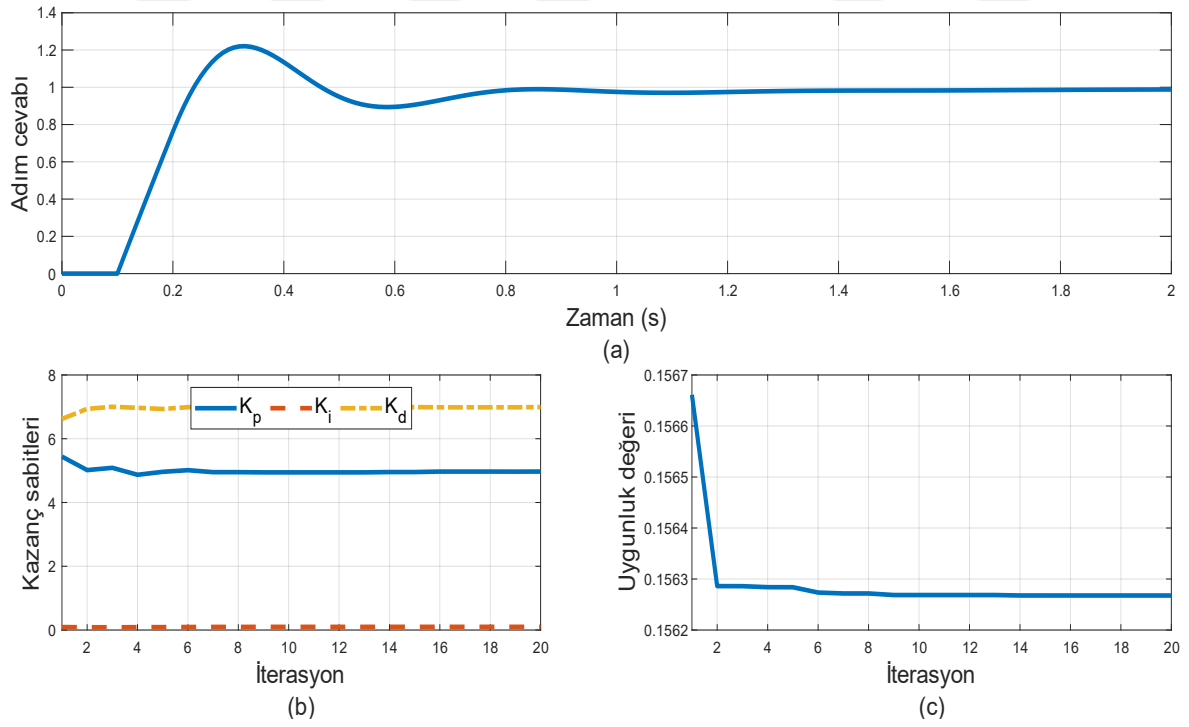
Son sistem için benzetim parametreleri Tablo 24 ve benzetim sonuçları Şekil 39 – Şekil 42'de sunulmuştur. Şekillerde sistem çıkışlarının kararlı ve alt sönümlü olduğu görülmektedir.

Tablo 24. 3. sistem için DRHO benzetim parametreleri

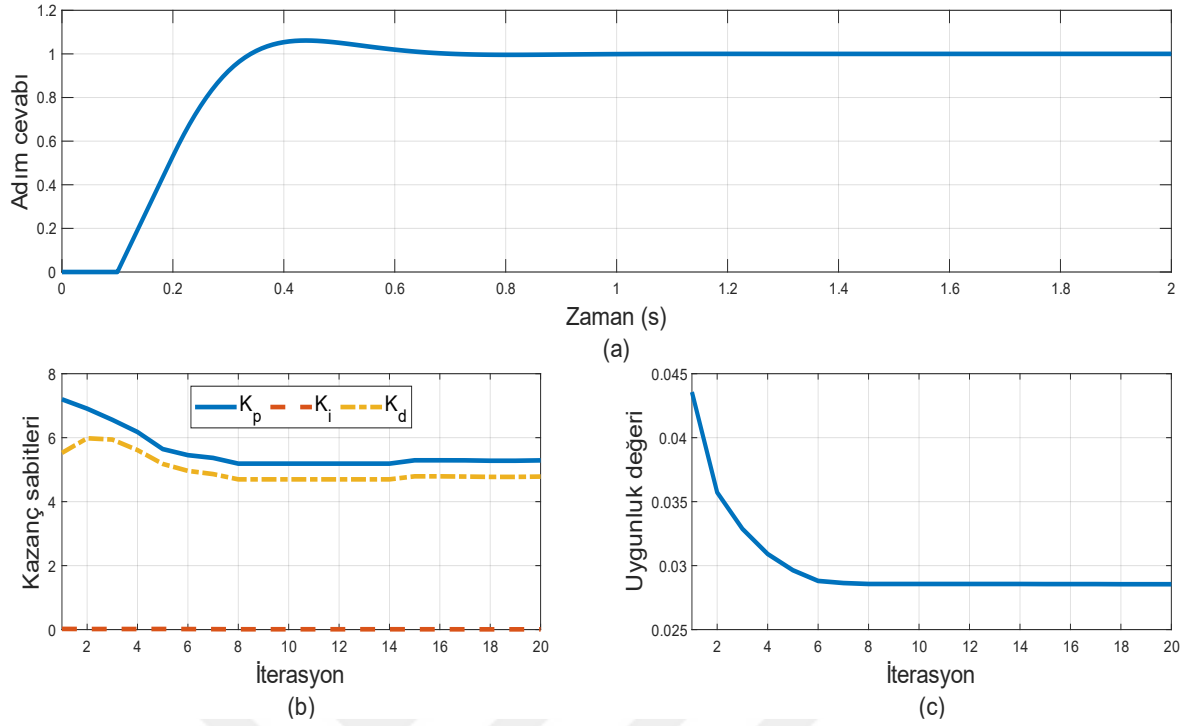
Parametre	Değer
W_{max}	1
W_{min}	0
Parçacıkların Sayısı	50
Parçacıkların Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 10
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 0,1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 10
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	2 s
Örnekleme Periyodu	10 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



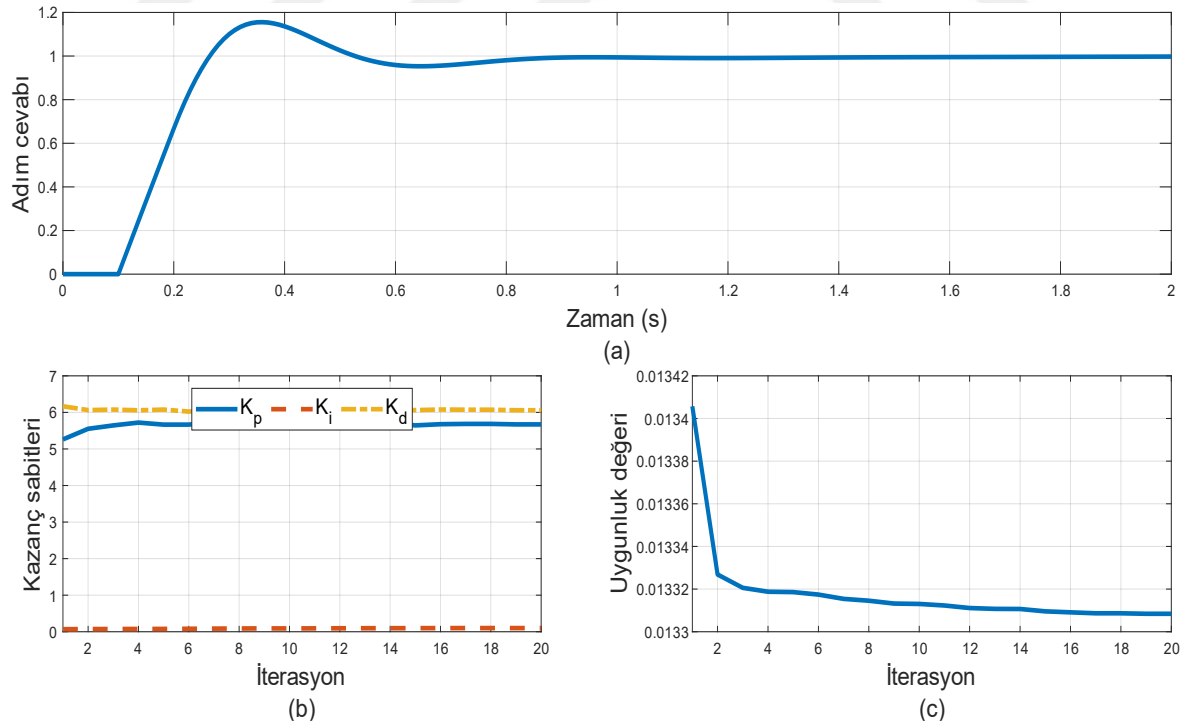
Şekil 39. Kazanç faktörleri DRHO ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 40. Kazanç faktörleri DRHO ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 41. Kazanç faktörleri DRHO ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 42. Kazanç faktörleri DRHO ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 25. 3. sistem için DRHO ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri

Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	5,8417	4,9707	5,2903	5,6717
İntegral Kazancı	0,0685	0,1000	0,0084	0,1000
Türevsel Kazanç	5,4445	6,9928	4,7836	6,0583
Yükselme Süresi (s)	0,1438	0,1058	0,1732	0,1257
Oturma Süresi (s)	0,5555	0,7528	0,5977	0,7846
Maksimum Aşma (%)	11,4402	23,4928	6,1171	15,8286
Uygunluk Değeri	0,2151	0,1563	0,0285	0,0133
Benzetim Süresi (s)	215,5469	186,7500	217,4688	219,7344

Tablo 25'te hata alanı tabanlı uygunluk fonksiyonları ile parametreleri DRHO algoritması kullanılarak optimize edilen PID denetleyicinin başarımlar değerleri verilmiştir. Son sistemde, en hızlı sistem tepkisi ve en kısa benzetim süresi ISE, en düşük aşma ITAE ve en hızlı kararlı duruma geçiş IAE ile elde edilmiştir.

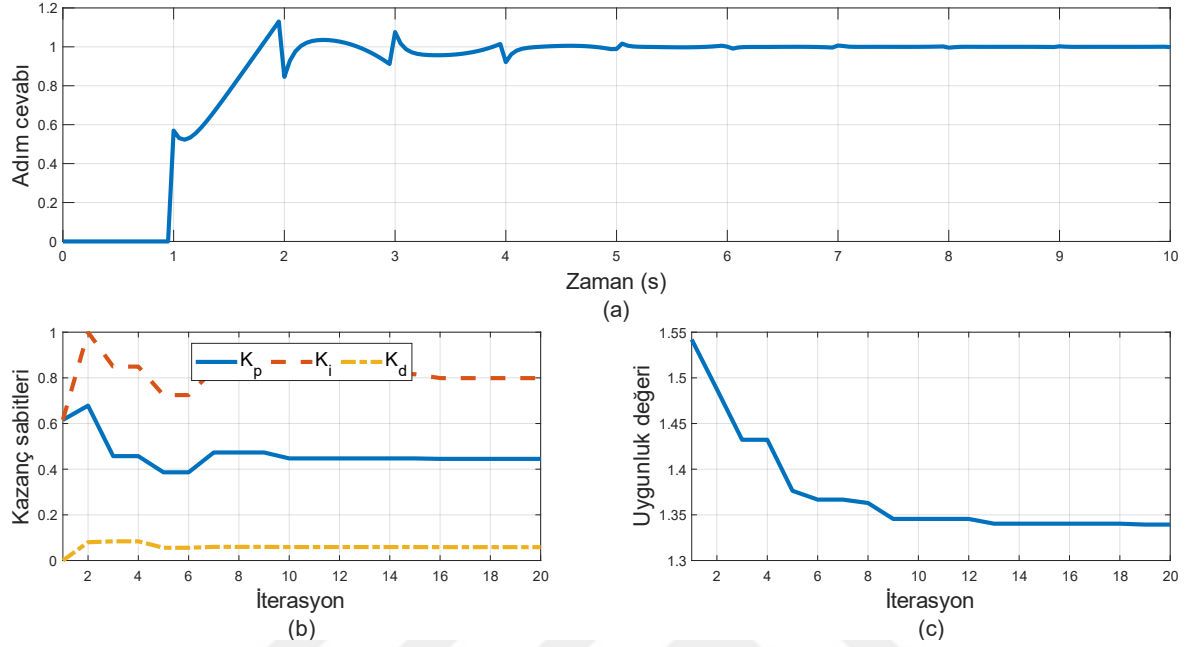
2.6. PID Kazanç Faktörlerinin FG ile Optimize Edilmesi

FG algoritması, PSO, RHO ve DRHO gibi sürü davranışlarına dayalı stokastik bir optimizasyon tekniğidir. PSO, RHO ve DRHO algoritmalarında olası çözümler parçacık olarak adlandırılırken FG algoritmasında birey olarak isimlendirilmektedir. FG algoritması için kullanılan benzetim parametreleri Tablo 26'da verilmiştir.

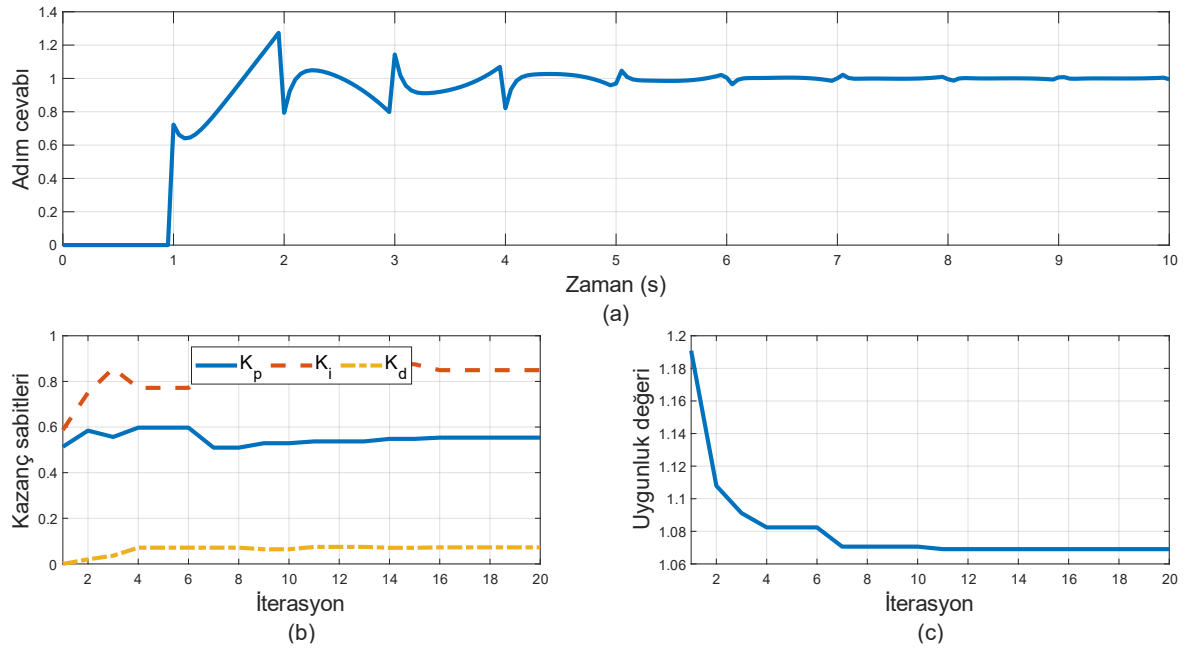
Tablo 26. 1. sistem için FG benzetim parametreleri

Parametre	Değer
F	0,8
C_R	0,9
Bireylerin Sayısı	50
Bireylerin Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 1
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 0,1
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	10 s
Örnekleme Periyodu	50 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100

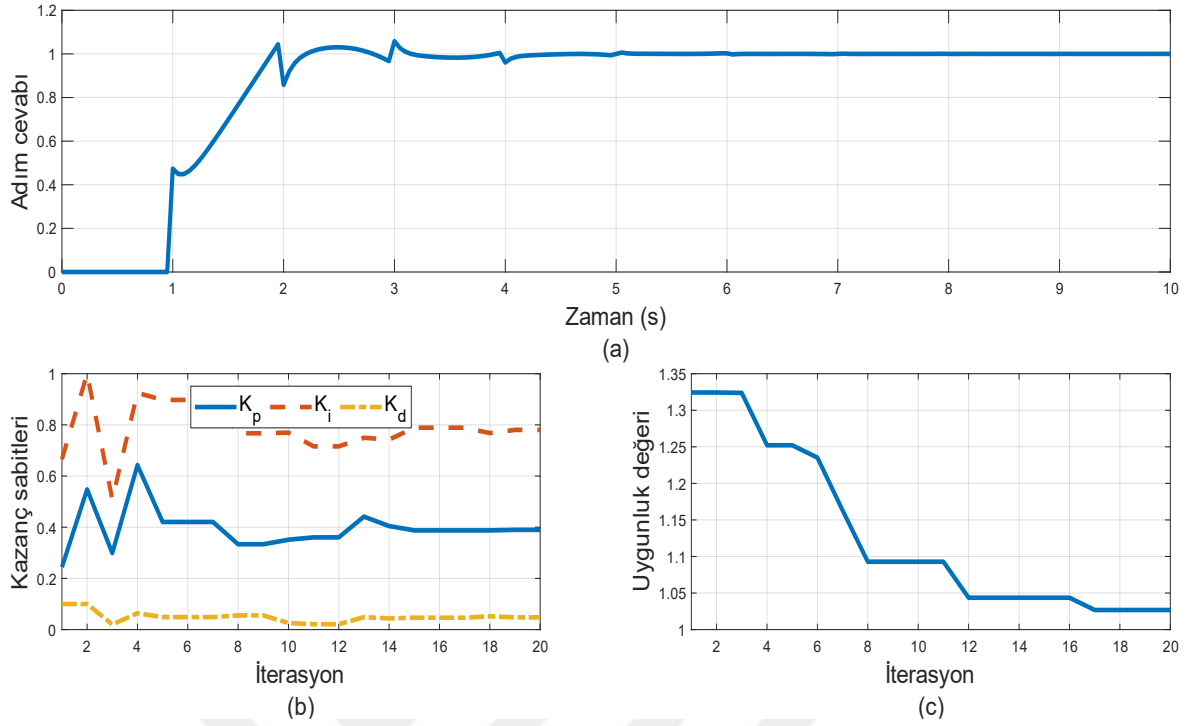
Şekil 43 – Şekil 46’da benzetim sonuçları görülmektedir. Diğer üç optimizasyon yönteminde olduğu gibi sistem çıkışları kararlı ve alt sönümlüdür.



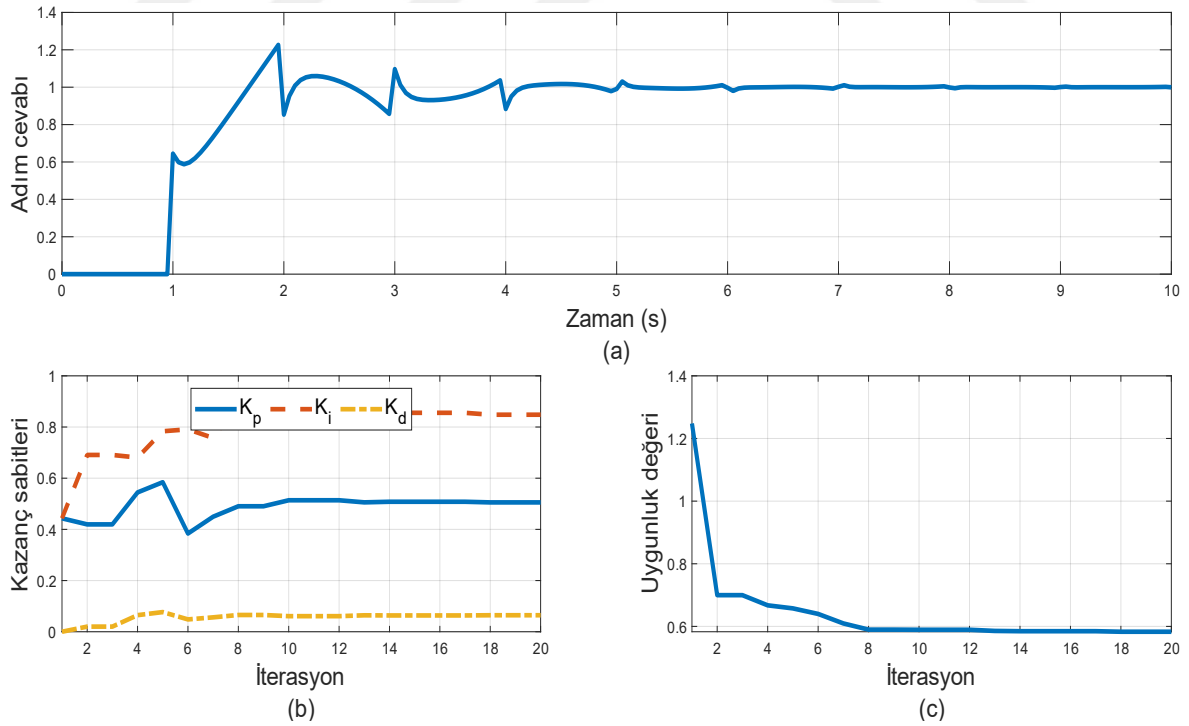
Şekil 43. Kazanç faktörleri FG ile IAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 44. Kazanç faktörleri FG ile ISE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 45. Kazanç faktörleri FG ile ITAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 46. Kazanç faktörleri FG ile ITSE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 27. 1. sistem için FG ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri

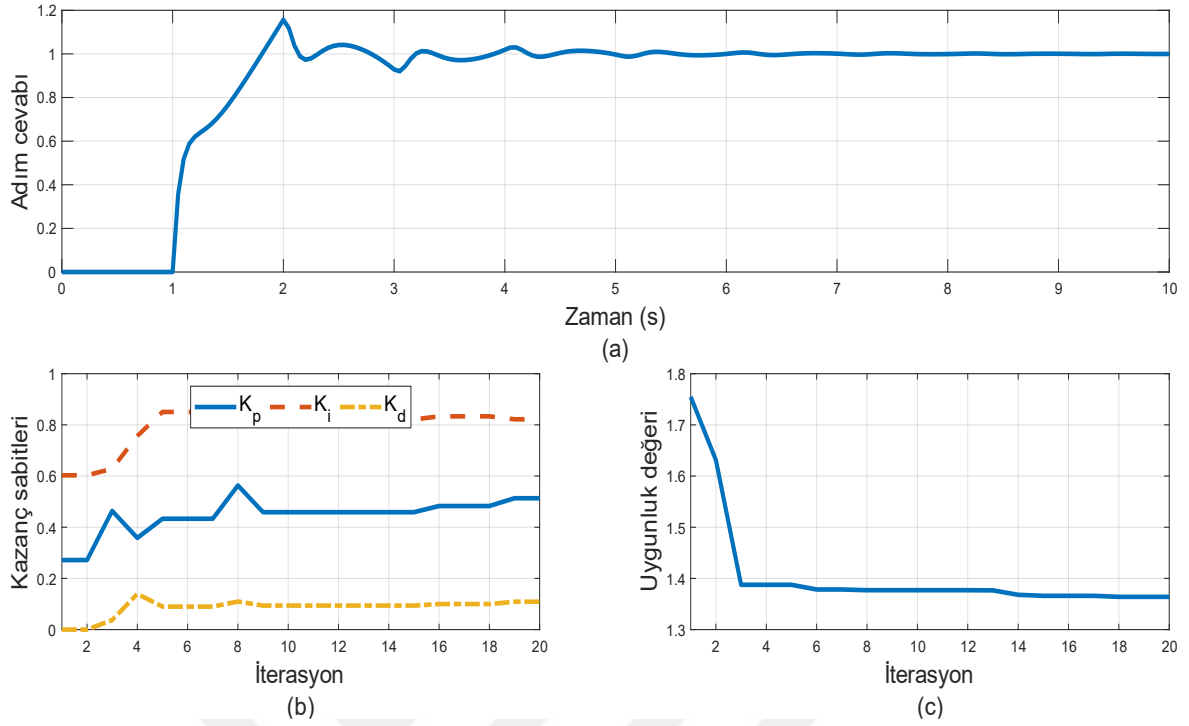
Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	0,4490	0,5432	0,3895	0,5054
İntegral Kazancı	0,8011	0,8587	0,7699	0,8481
Türevsel Kazanç	0,0570	0,0723	0,0474	0,0645
Yükselme Süresi (s)	0,7022	0,5513	0,8024	0,6059
Oturma Süresi (s)	4,0929	7,0690	4,0606	5,0776
Maksimum Aşma (%)	13,1646	27,9775	5,8757	22,7093
Uygunluk Değeri	1,3393	1,0691	1,0268	0,5830
Benzetim Süresi (s)	965,3752	911,6876	1087,6876	1055,1248

Tablo 27’de en hızlı sistem cevabı ve en kısa benzetim süresi ISE uygunluk fonksiyonu ile elde edilmiştir. Ayrıca sistem, ITAE uygunluk fonksiyonu ile en kısa sürede ve en az aşma ile kararlı hale geçmiştir.

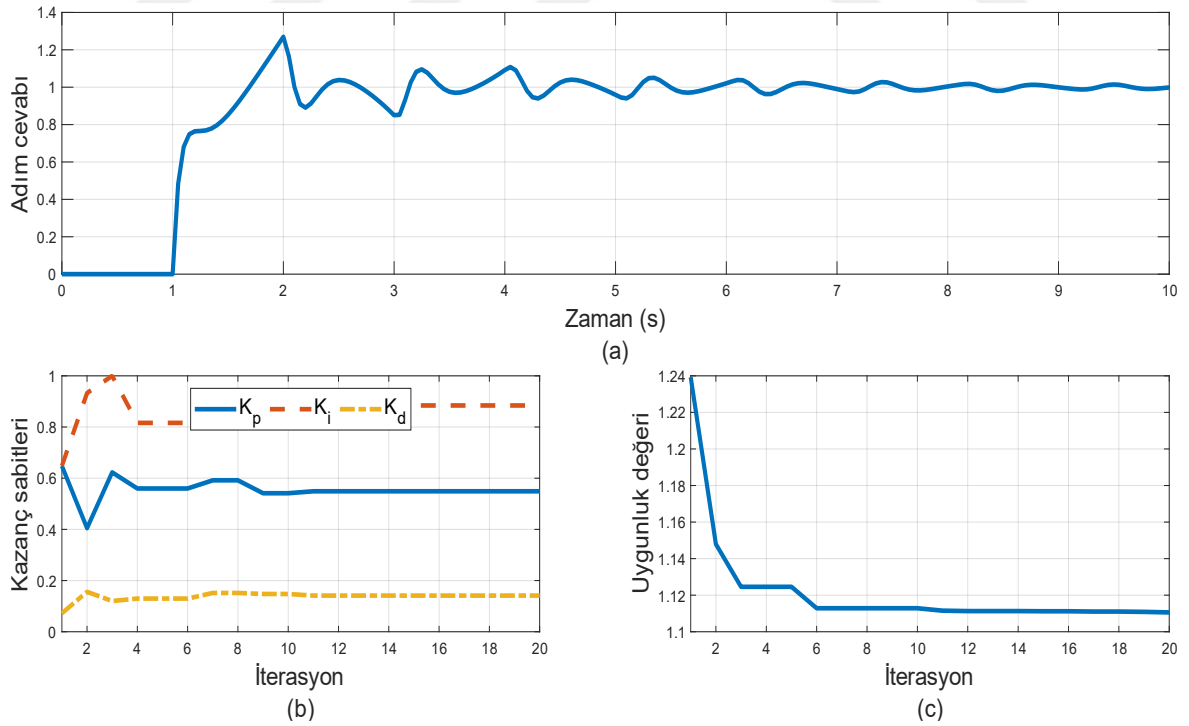
Tablo 28’de ikinci sistem için benzetim parametreleri ve Şekil 47 – Şekil 50’de benzetim sonuçları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde sistem çıkışlarının kararlı olduğu ve alt sönümlü bir karakteristiğe sahip oldukları görülmektedir.

Tablo 28. 2. sistem için FG benzetim parametreleri

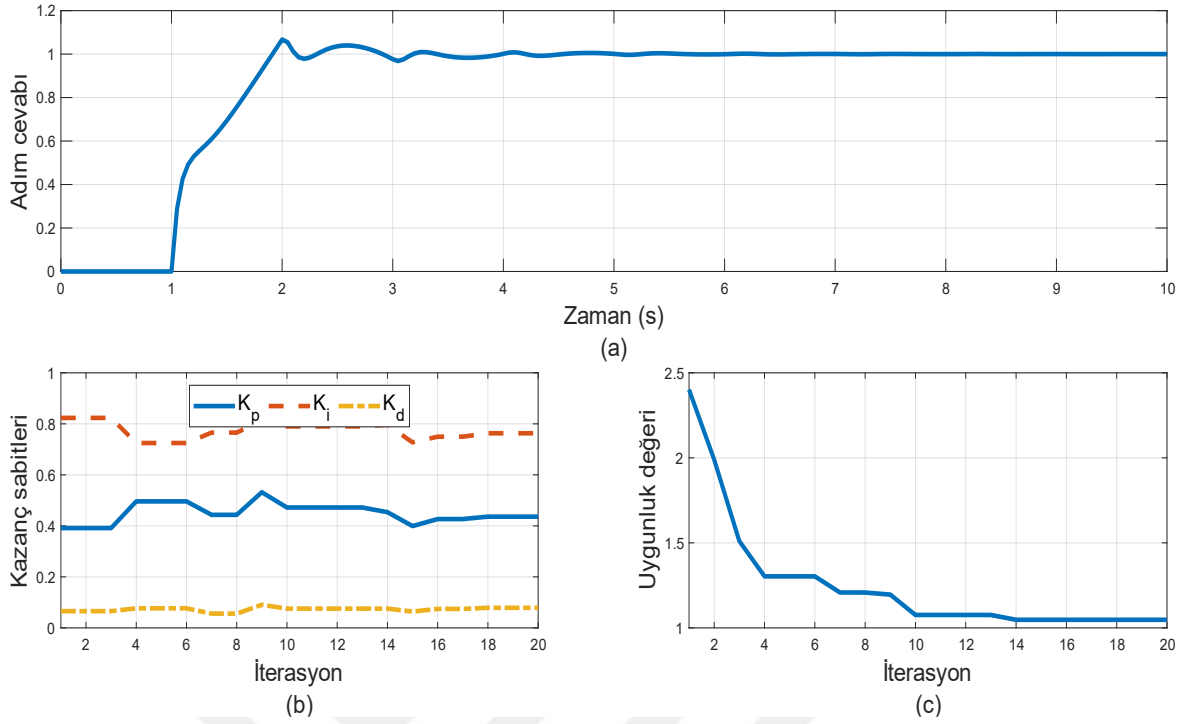
Parametre	Değer
F	0,8
C_R	0,9
Bireylerin Sayısı	50
Bireylerin Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 1
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 0,2
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	10 s
Örnekleme Periyodu	50 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



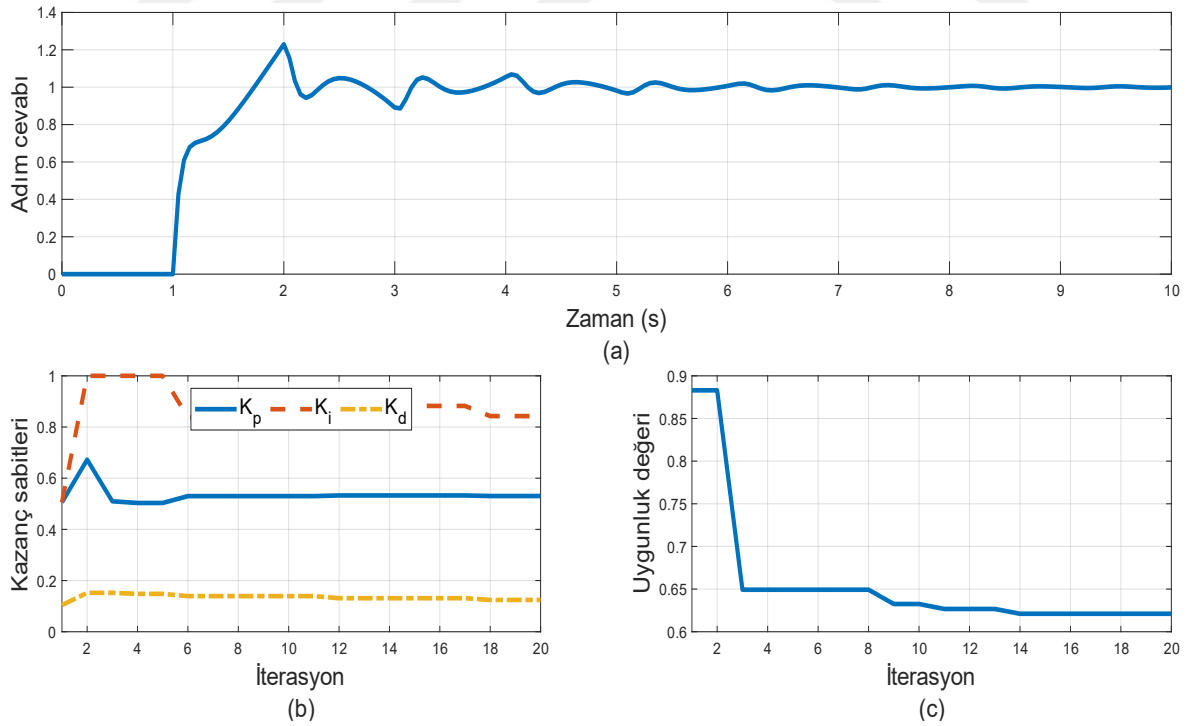
Şekil 47. Kazanç faktörleri FG ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 48. Kazanç faktörleri FG ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 49. Kazanç faktörleri FG ile ITAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 50. Kazanç faktörleri FG ile ITSE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 29. 2. sistem için FG ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri

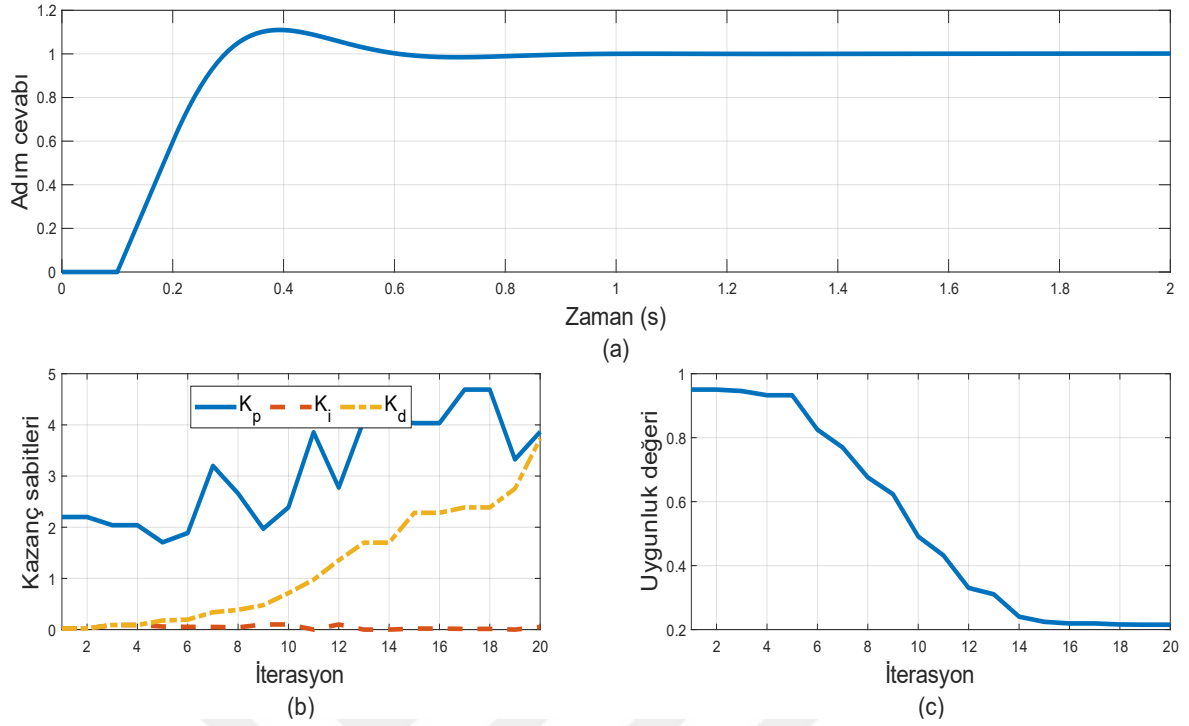
Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	0,5022	0,5541	0,4496	0,5336
İntegral Kazancı	0,8176	0,8940	0,7716	0,8696
Türevsel Kazanç	0,1024	0,1427	0,0811	0,1249
Yükselme Süresi (s)	0,6668	0,5550	0,7646	0,5962
Oturma Süresi (s)	4,1478	7,4945	3,1124	6,1596
Maksimum Aşma (%)	15,7115	27,1544	6,7119	23,1443
Uygunluk Değeri	1,3640	1,1106	1,0476	0,6211
Benzetim Süresi (s)	275,5312	272,7812	267,4219	269,7344

Tablo 29’da verilen başarımlar değerleri ışığında amaç, en hızlı sistem tepkisini elde etmek ise ISE, sistemin en kısa zamanda en az aşma ile kararlı hale geçmesini sağlamak ve en düşük benzetim süresini elde etmek ise ITAE uygunluk fonksiyonu kullanılmalıdır.

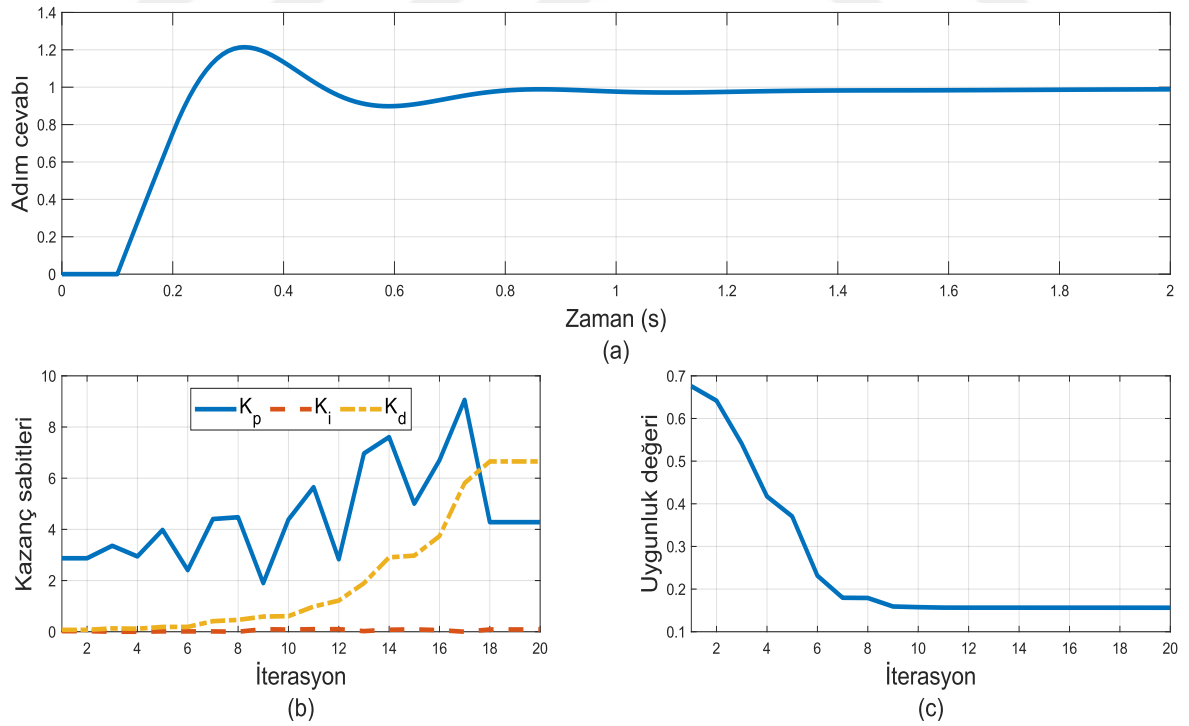
Tablo 30’da benzetim parametreleri ve Şekil 51 – Şekil 54’te benzetim sonuçları görülmektedir. Diğer sistemlerde olduğu gibi 3. test sistemi parametreleri FG ile belirlenmiş PID denetleyici ile kararlı bir şekilde kontrol edilmiştir.

Tablo 30. 3. sistem için FG benzetim parametreleri

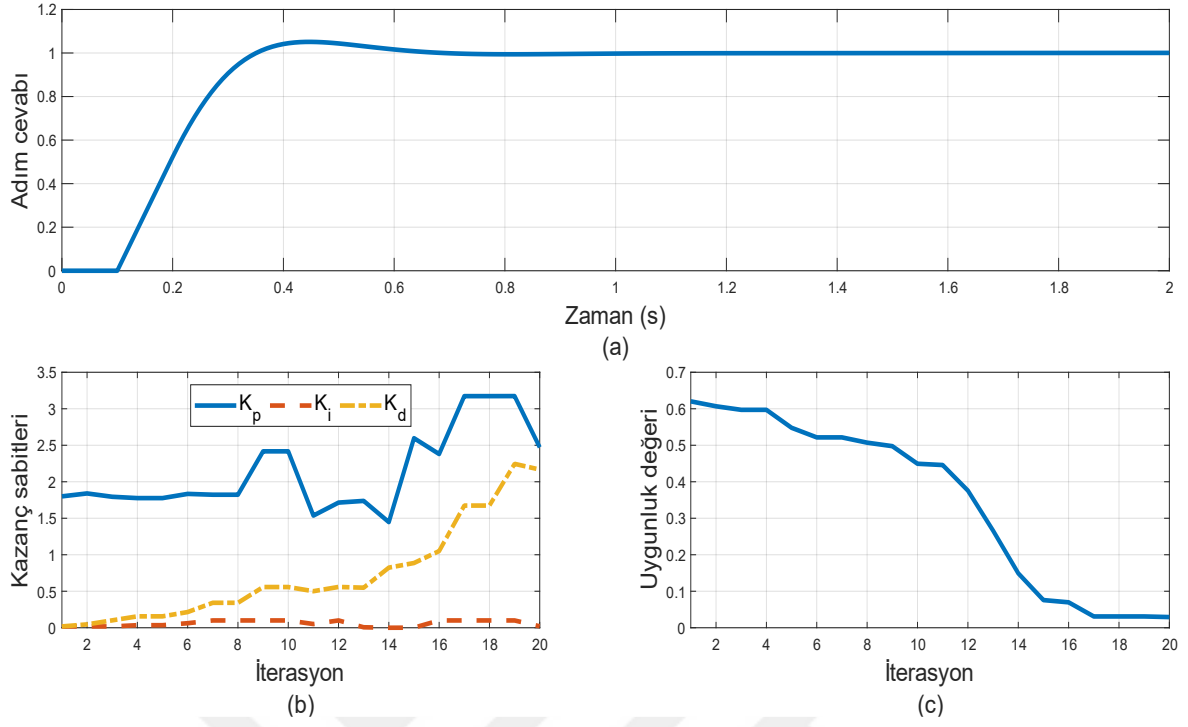
Parametre	Değer
F	0,8
C_R	0,9
Bireylerin Sayısı	50
Bireylerin Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 10
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 0,1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 10
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	2 s
Örnekleme Periyodu	10 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



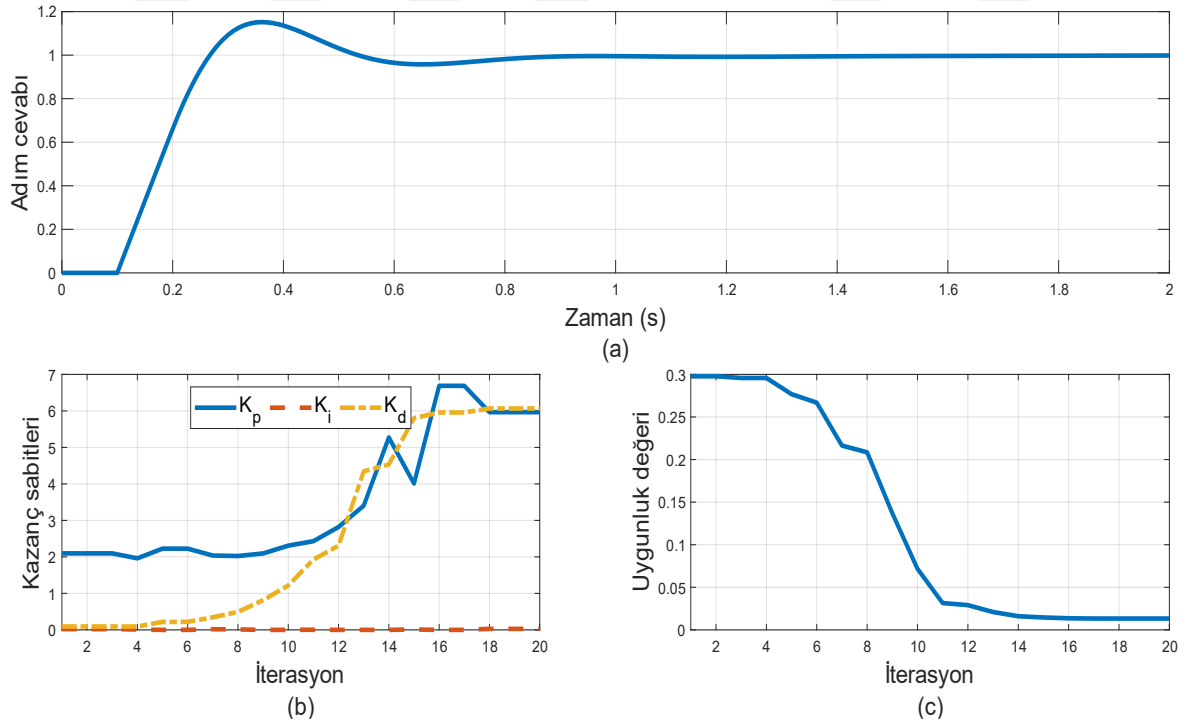
Şekil 51. Kazanç faktörleri FG ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 52. Kazanç faktörleri FG ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 53. Kazanç faktörleri FG ile ITAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 54. Kazanç faktörleri FG ile ITSE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 31. 3. sistem için FG ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar değerleri

Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	5,7906	4,9768	5,0758	5,7475
İntegral Kazancı	0,0945	0,1000	0,0454	0,1000
Türevsel Kazanç	5,3826	6,9178	4,7083	5,9881
Yükselme Süresi (s)	0,1464	0,1071	0,1786	0,1276
Oturma Süresi (s)	0,5583	0,7575	0,5836	0,7821
Maksimum Aşma (%)	10,8126	22,7753	5,0523	15,3775
Uygunluk Değeri	0,2153	0,1563	0,0292	0,0133
Benzetim Süresi (s)	958,3752	933,6876	940,3752	942,3752

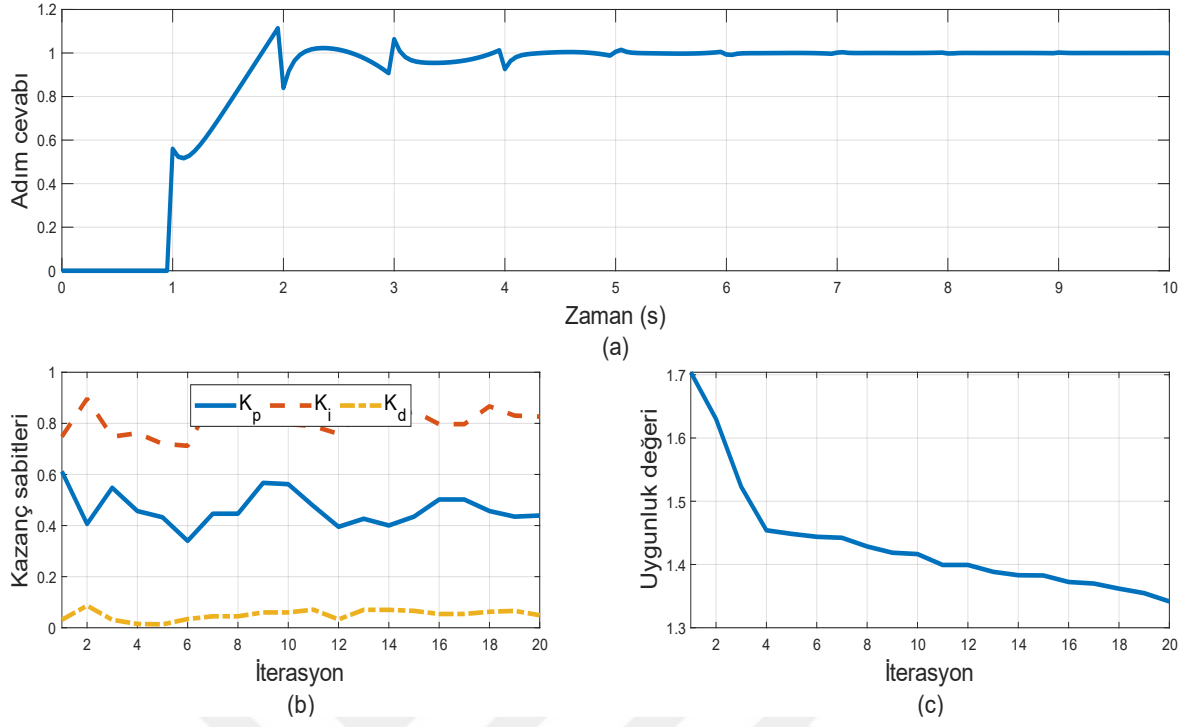
Tablo 31’de verilen başarımlar değerleri incelendiğinde en hızlı sistem tepkisi ve en düşük benzetim süresi ISE, en erken kararlı duruma geçiş IAE ve en düşük aşma hatası ITAE uygunluk fonksiyonu ile sağlanmıştır.

2.7. PID Kazanç Faktörlerinin GA ile Optimize Edilmesi

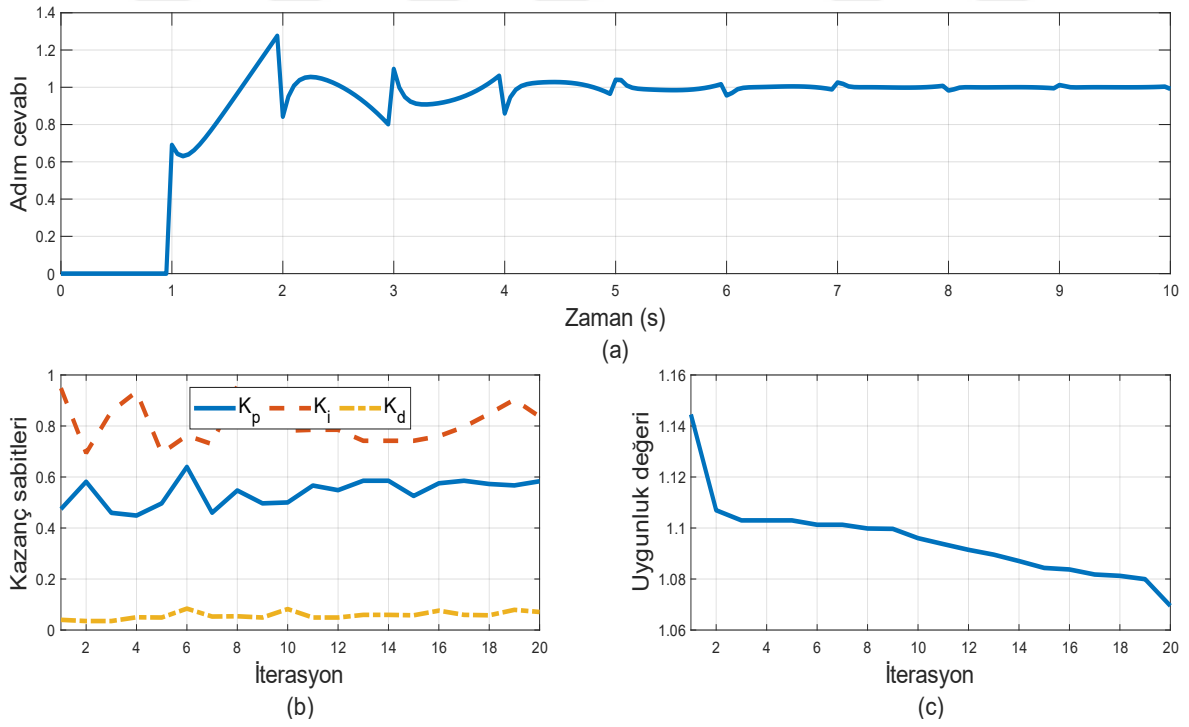
GA temel olarak FG algoritması ile büyük benzerlikler göstermektedir ve problemin olası çözümlerini veren bireylerden oluşmaktadır. Tablo 32’de ilk test sistemi için benzetim parametreleri ve Şekil 55 – Şekil 58’de benzetim sonuçları verilmiştir.

Tablo 32. 1. sistem için GA benzetim parametreleri

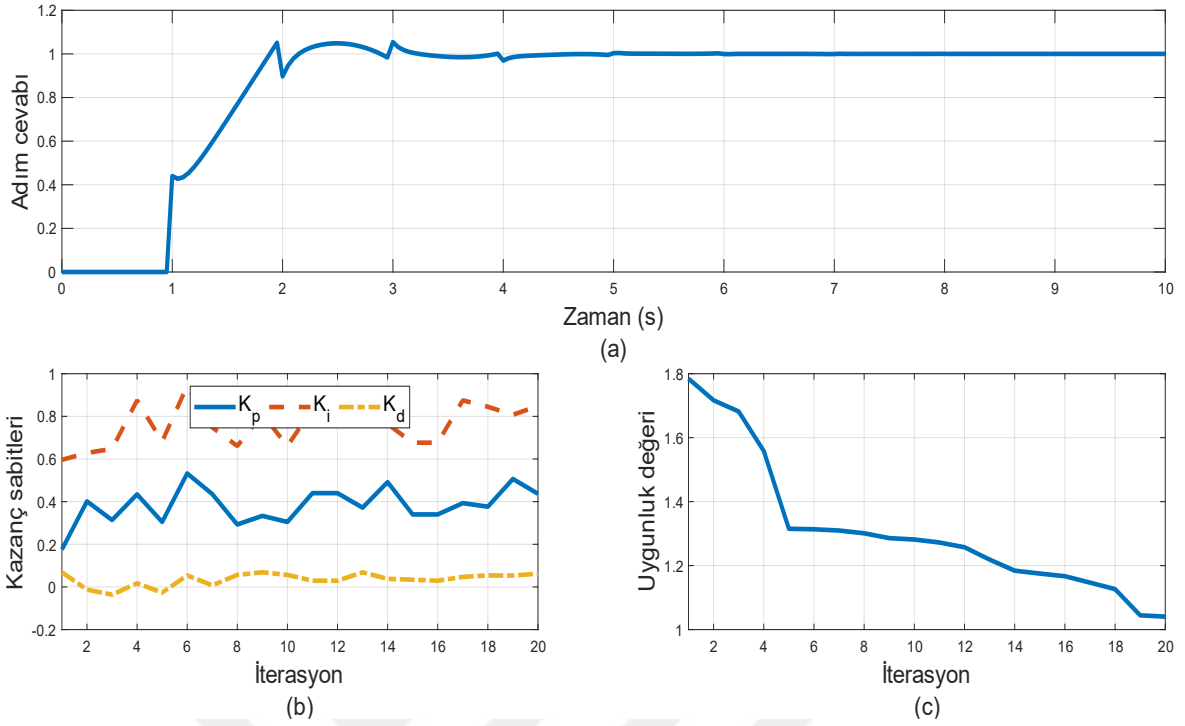
Parametre	Değer
Bireylerin Sayısı	50
Bireylerin Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 1
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 0,1
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	10 s
Örnekleme Periyodu	50 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



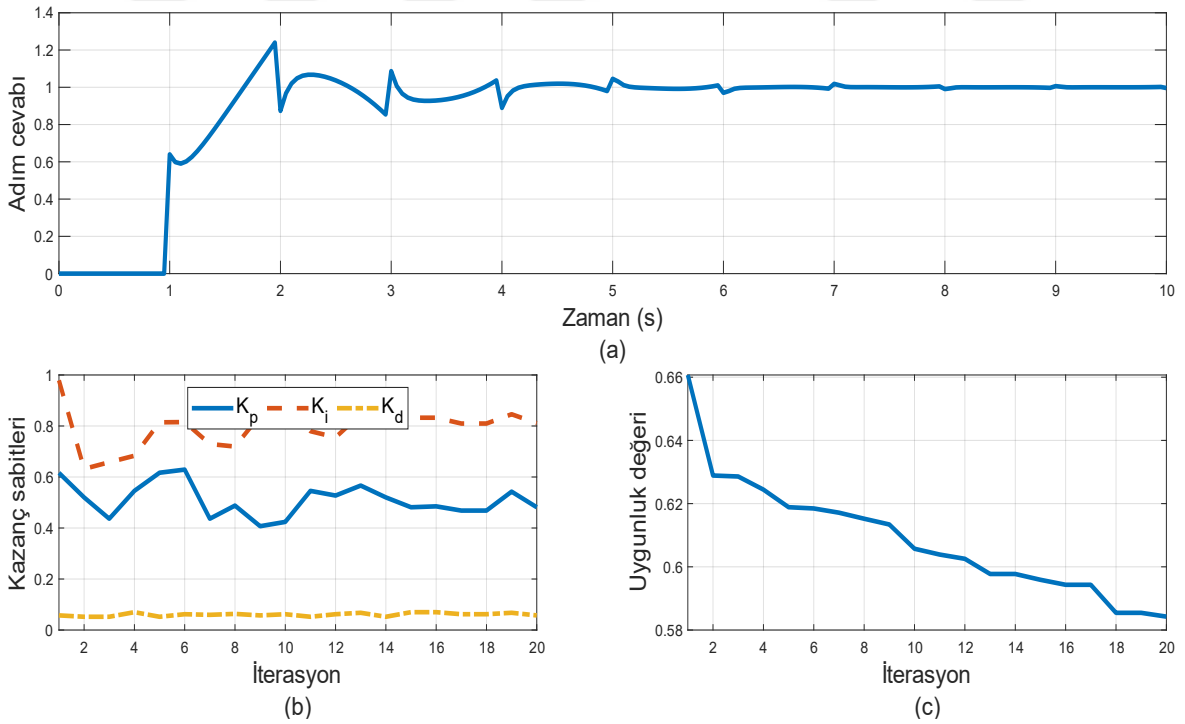
Şekil 55. Kazanç faktörleri GA ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 56. Kazanç faktörleri GA ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 57. Kazanç faktörleri GA ile ITAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 58. Kazanç faktörleri GA ile ITSE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 1. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 33. 1. sistem için GA ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımların değerleri

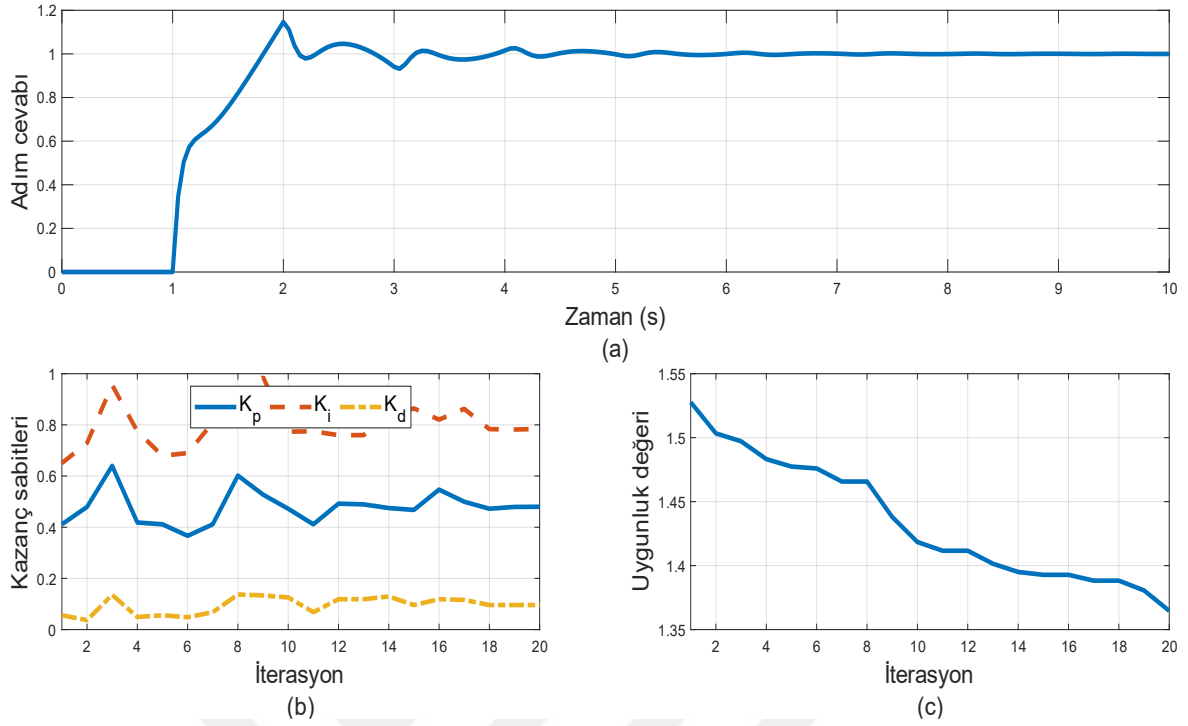
Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	0,4459	0,5451	0,3864	0,5116
İntegral Kazancı	0,7858	0,8600	0,7822	0,8569
Türevsel Kazanç	0,0560	0,0691	0,0440	0,0640
Yükselme Süresi (s)	0,7175	0,5448	0,7951	0,5902
Oturma Süresi (s)	4,0945	9,0060	4,0478	7,0164
Maksimum Aşma (%)	11,5055	28,7085	5,4082	24,5032
Uygunluk Değeri	1,3416	1,0695	1,0405	0,5842
Benzetim Süresi (s)	1600,4376	1546,5624	1481,8124	1464,3124

İlk sistem için elde edilen başarımların değerleri PSO, RHO ve DRHO yöntemleri ile alınan sonuçlara benzemektedir. Tablo 33'te görüldüğü gibi hızlı sistem tepkisi için ISE, en az hata ile en erken kararlılığa geçiş için ITAE ve en düşük benzetim süresi için de ITSE tabanlı fonksiyonu ile PID parametreleri ayarlanmalıdır.

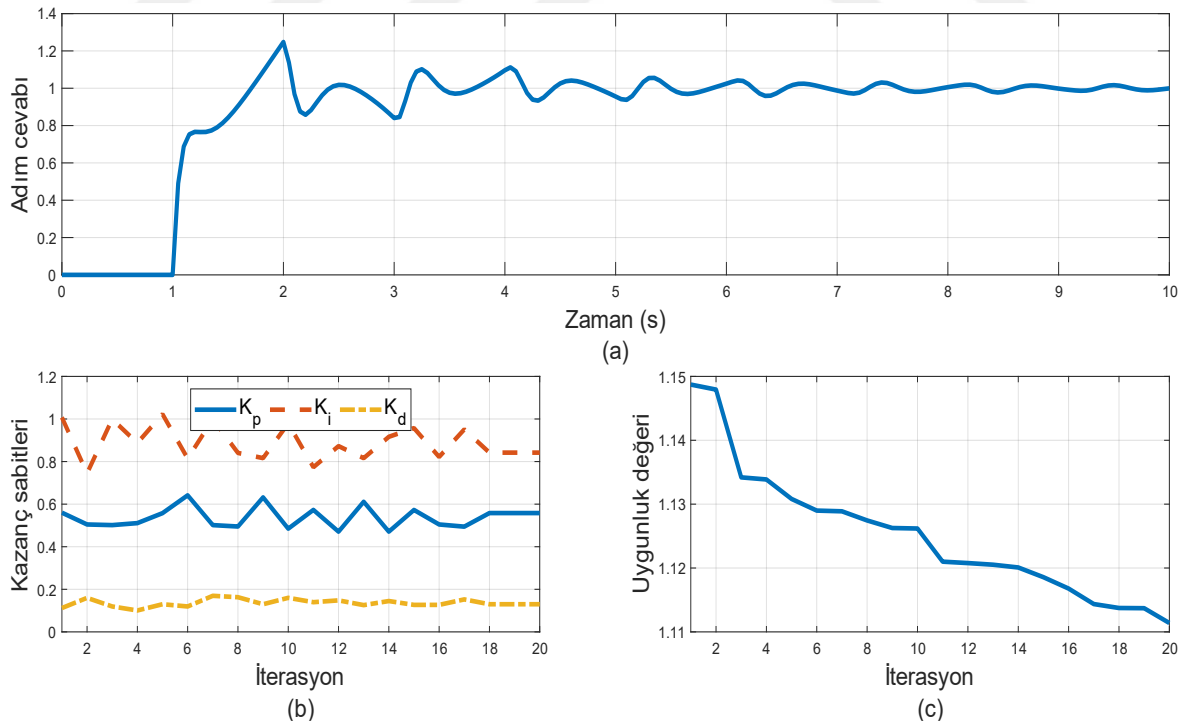
Tablo 34'te ikinci sistem için benzetim parametreleri ve Şekil 59 – Şekil 62'de benzetim sonuçları verilmiştir. Tüm hata alanı tabanlı uygunluk fonksiyonları için sistem çıkışı kararlı ve alt sönümlüdür.

Tablo 34. 2. sistem için GA benzetim parametreleri

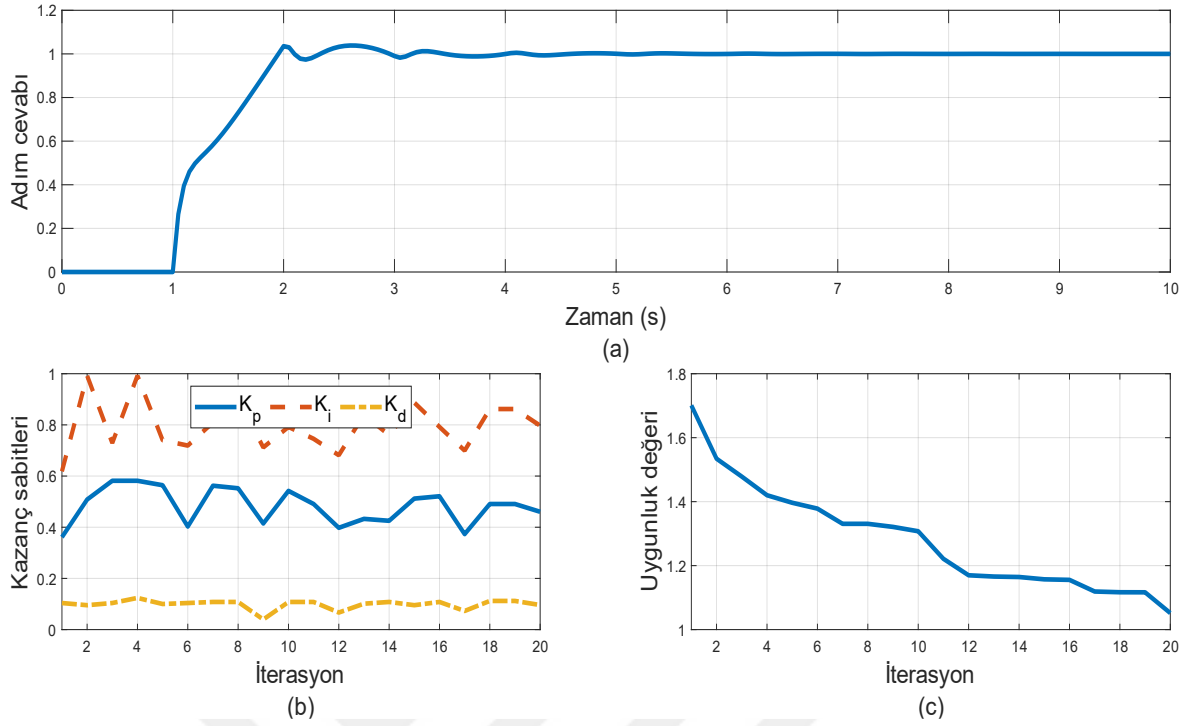
Parametre	Değer
Bireylerin Sayısı	50
Bireylerin Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 1
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 0,2
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	10 s
Örnekleme Periyodu	50 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



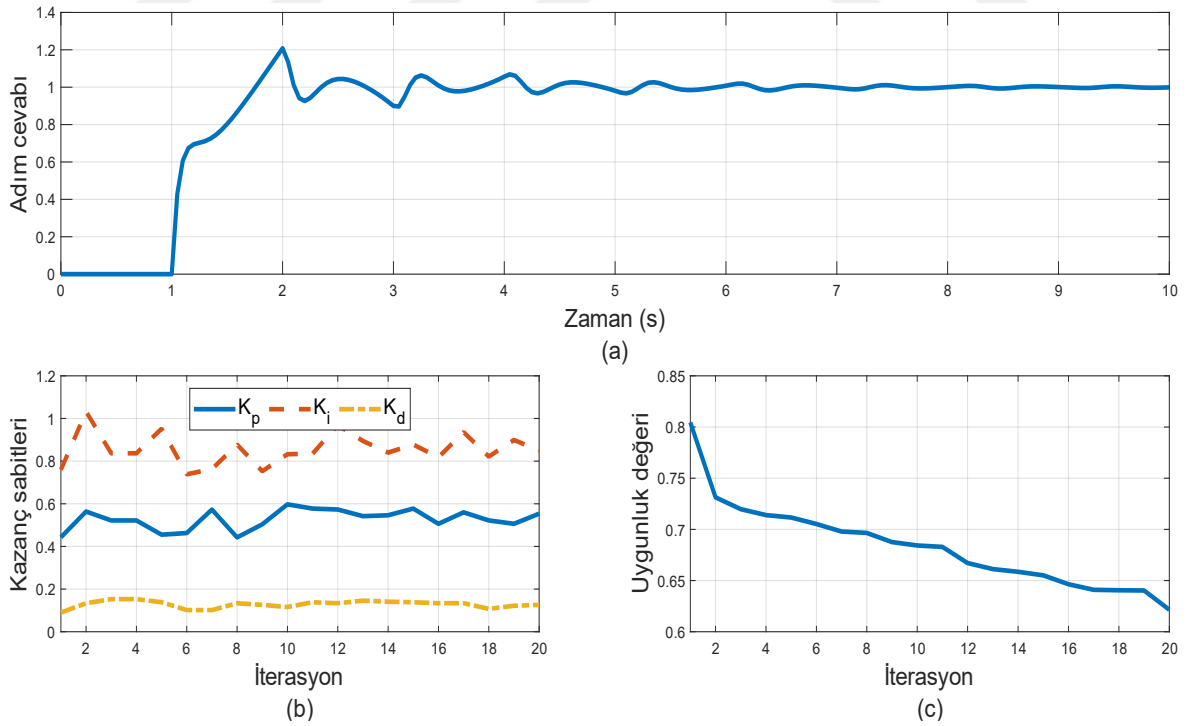
Şekil 59. Kazanç faktörleri GA ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 60. Kazanç faktörleri GA ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 61. Kazanç faktörleri GA ile ITAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 62. Kazanç faktörleri GA ile ITSE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 2. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 35. 2. sistem için GA ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımlar

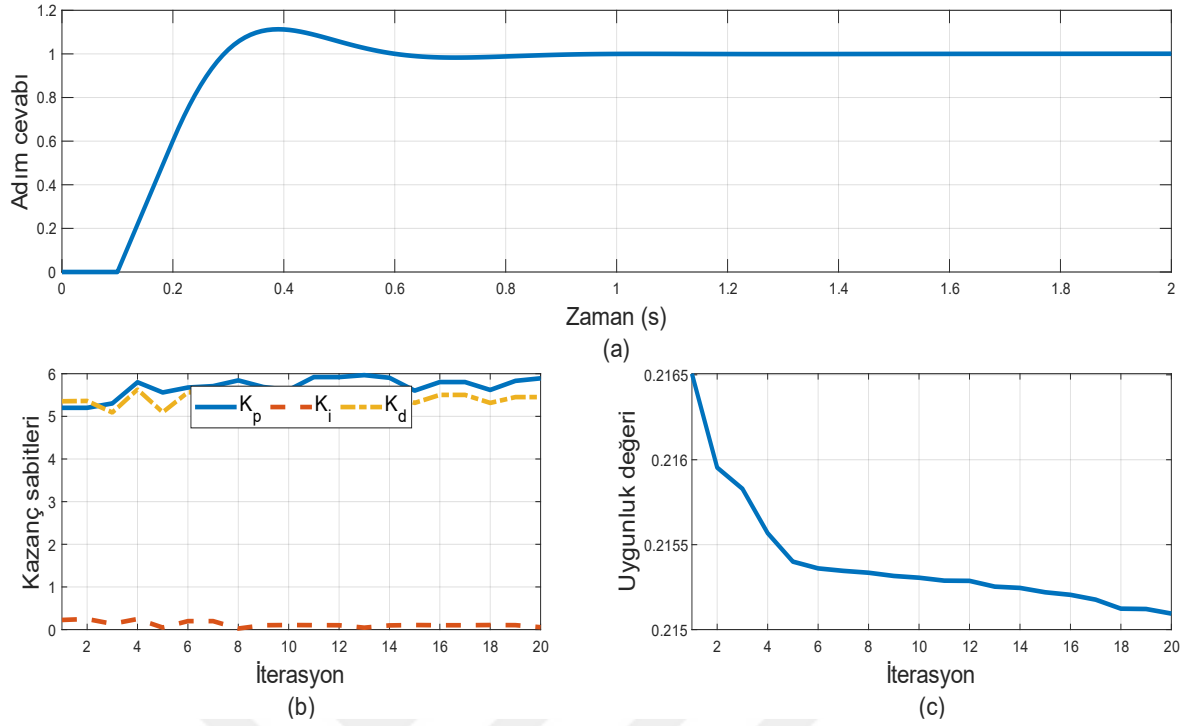
Parametre	Uygunluk Değeri			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	0,4937	0,5499	0,4299	0,5199
İntegral Kazancı	0,8154	0,8720	0,7568	0,8600
Türevsel Kazanç	0,0993	0,1449	0,0743	0,1254
Yükselme Süresi (s)	0,6791	0,5721	0,8013	0,6187
Oturma Süresi (s)	4,1333	8,4846	2,8485	6,1515
Maksimum Aşma (%)	14,6645	24,8768	3,8434	20,9664
Uygunluk Değeri	1,3647	1,1114	1,0517	0,6215
Benzetim Süresi (s)	1494,2500	1483,7500	1488,6248	1513,6248

Tablo 35’te en hızlı sistem tepkisi ve en düşük benzetim süresi ISE ve en kısa zamanda en az hata ile kararlı duruma geçiş ITAE kriteri ile sağlanmıştır.

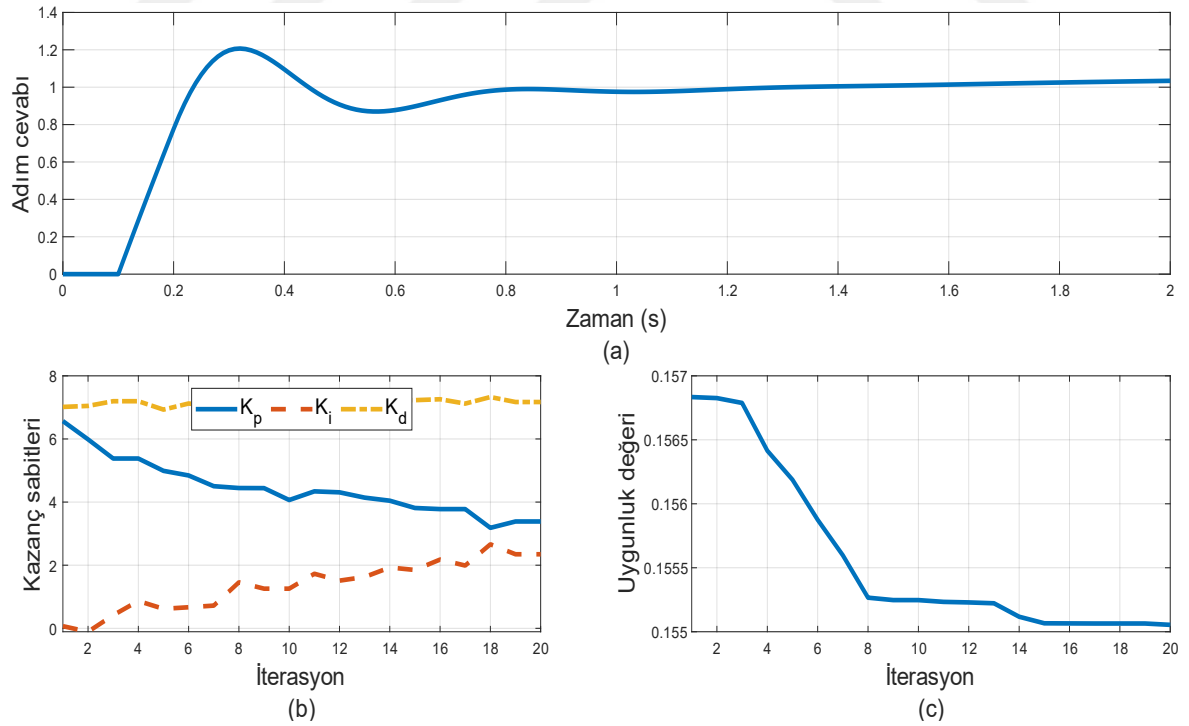
Son sistem için benzetim parametreleri Tablo 36’da ve benzetim sonucunda elde edilen değişim eğrileri Şekil 63 – Şekil 66’da verilmiştir.

Tablo 36. 3. sistem için GA benzetim parametreleri

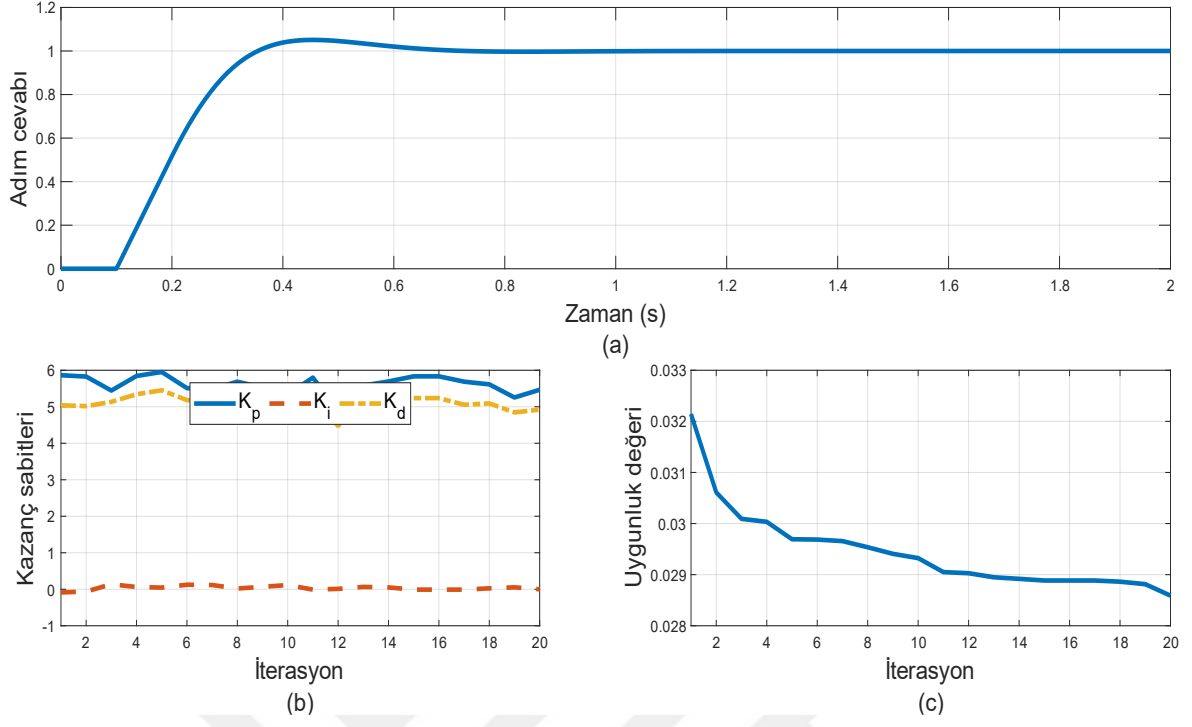
Parametre	Değer
Bireylerin Sayısı	50
Bireylerin Boyutu	3
Oransal Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 10
İntegral Kazancı için Arama Sınırları	0 ... 0,1
Türevsel Kazanç için Arama Sınırları	0 ... 10
Maksimum Tekrarlama Sayısı	20
Simülasyon Süresi	2 s
Örnekleme Periyodu	10 ms
Örnek Sayısı	201 örnek
Bağımsız Deneme Sayısı	100



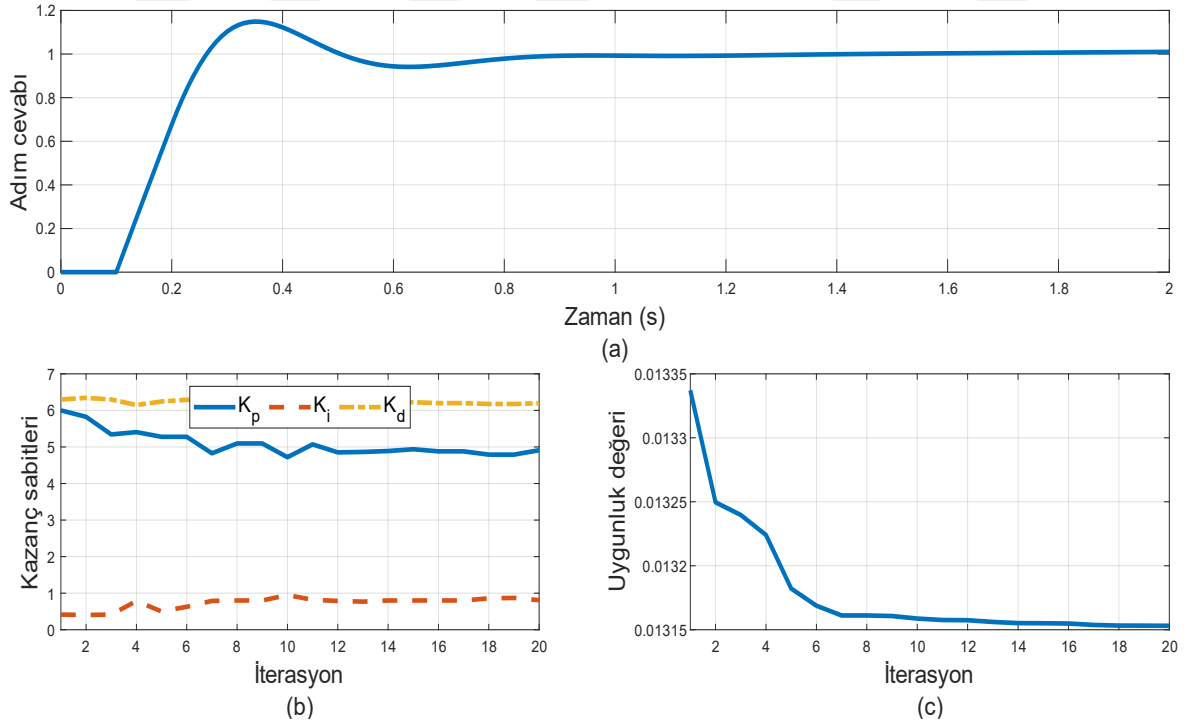
Şekil 63. Kazanç faktörleri GA ile IAE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 64. Kazanç faktörleri GA ile ISE performans kistasına göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 65. Kazanç faktörleri GA ile ITAE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi



Şekil 66. Kazanç faktörleri GA ile ITSE performans kriterine göre optimize edilen PID denetleyiciyle kontrol edilen 3. sistemin (a) adım tepkisi, (b) kazanç faktörü eğrisi, (c) uygunluk değeri eğrisi

Tablo 37. 3. sistem için GA ile ayarlanmış kazanç faktörleri ve başarımların değerleri

Parametre	Değer			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Oransal Kazanç	5,8044	2,9399	5,1434	4,9067
İntegral Kazancı	0,0713	2,7236	0,0093	0,8322
Türevsel Kazanç	5,4243	7,2308	4,6528	6,1817
Yükselme Süresi (s)	0,1446	0,1101	0,1808	0,1263
Oturma Süresi (s)	0,5558	1,5935	0,6006	0,8692
Maksimum Aşma (%)	11,2047	16,6985	5,0742	13,7632
Uygunluk Değeri	0,2151	0,1551	0,0286	0,0132
Benzetim Süresi (s)	1375,3752	1367,9376	1376,8752	1379,3124

Tablo 37’de verilen başarımların değerleri dikkate alındığında, amaç sistemin hızlı tepki vermesi ise ISE, en kısa sürede kararlı çalışma haline geçmesi ise IAE ve en az aşma hatasına sahip olması ise ITAE uygunluk fonksiyonu kullanılmalıdır. Ayrıca ve en düşük benzetim süresi ISE başarımların kısıtı ile sağlanmıştır.

2.8. Parametre Ayarlama Yöntemlerinin Başarımlarının Kıyaslanması

2.8.1. IAE Kıtasına Göre Algoritmaların Başarımlarının Kıyaslanması

Yukarıda yapılan benzetim çalışmalarında her bir optimizasyon yönteminin başarımların değerleri hata alanı tabanlı uygunluk fonksiyonlarına göre bulunmuş ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Bu kısımda ise seçilen performans ölçütleri için beş (PSO, RHO, DRHO, FG ve GA) sezgisel algoritmanın performansları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 38. 1. sistem için IAE performans kıtasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	0,4457	0,4444	0,4411	0,4490	0,4459
İntegral Kazancı	0,8046	0,8037	0,8033	0,8011	0,7858
Türevsel Kazanç	0,0568	0,0569	0,0564	0,0570	0,0560
Yükselme Süresi (s)	0,7052	0,7073	0,7116	0,7022	0,7175
Oturma Süresi (s)	4,0955	4,0946	4,0940	4,0929	4,0945
Maksimum Aşma (%)	12,9905	12,8067	12,4425	13,1646	11,5055
Uygunluk Değeri	1,3381	1,3379	1,3379	1,3393	1,3416
Benzetim Süresi (s)	922,4376	810,8752	1033,6876	965,3752	922,4376

Tablo 38’de FG algoritmasının en düşük yükselme ve oturma süresine sahip olduğu ve en az aşmanın GA ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca en iyi uygunluk değeri RHO ve DRHO ile elde edilmiştir. İlave olarak RHO en düşük benzetim süresini sağlamıştır.

Tablo 39. 2. sistem için IAE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	0,5038	0,5042	0,5038	0,5022	0,4937
İntegral Kazancı	0,8202	0,8203	0,8196	0,8176	0,8154
Türevsel Kazanç	0,1018	0,1018	0,1015	0,1024	0,0993
Yükselme Süresi (s)	0,6632	0,6627	0,6636	0,6668	0,6791
Oturma Süresi (s)	4,1454	4,1457	4,1445	4,1478	4,1333
Maksimum Aşma (%)	16,0742	16,1239	16,0234	15,7115	14,6645
Uygunluk Değeri	1,3639	1,3639	1,3639	1,3640	1,3647
Benzetim Süresi (s)	840,1876	822,1248	989,0000	1102,1248	840,1876

Tablo 39 esas aldığında 2. sistem için en hızlı sistem tepkisi, en iyi uygunluk değeri ve en düşük benzetim süresi için RHO, en kısa sürede en az aşma ile kararlı duruma geçmek için GA yönteminin seçilmesi gerektiği görülmektedir.

Tablo 40. 3. için IAE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	5,8395	5,8491	5,8417	5,7906	5,8044
İntegral Kazancı	0,0694	0,0685	0,0685	0,0945	0,0713
Türevsel Kazanç	5,4446	5,4506	5,4445	5,3826	5,4243
Yükselme Süresi (s)	0,1438	0,1435	0,1438	0,1464	0,1446
Oturma Süresi (s)	0,5554	0,5552	0,5555	0,5583	0,5558
Maksimum Aşma (%)	11,4340	11,5001	11,4402	10,8126	11,2047
Uygunluk Değeri	0,2151	0,2151	0,2151	0,2153	0,2151
Benzetim Süresi (s)	756,6876	760,5624	862,1876	958,3752	756,6876

Tablo 40’ta RHO algoritmasının en az yükselme süresi, en düşük oturma süresi ve en iyi uygunluk değerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca en az aşma hatası FG ve en düşük benzetim süresi PSO ve GA ile elde edilmiştir.

2.8.2. ISE Kıstasına Göre Algoritmaların Başarımlarının Kıyaslanması

Tablo 41’de birinci sistem için optimizasyon yöntemlerinin performans değerleri verilmiştir. Tabloda, en düşük yükselme süresi ve en iyi uygunluk değeri DRHO ve en düşük oturma süresi, en az aşma, en iyi uygunluk değeri ve en kısa benzetim süresi PSO algoritması kullanılarak elde edildiği görülmektedir.

Tablo 41. 1 sistem için ISE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	0,5452	0,5475	0,5488	0,5432	0,5451
İntegral Kazancı	0,8653	0,8643	0,8626	0,8587	0,8600
Türevsel Kazanç	0,0719	0,0717	0,0716	0,0723	0,0691
Yükselme Süresi (s)	0,5524	0,5465	0,5437	0,5513	0,5448
Oturma Süresi (s)	7,0517	7,0613	7,0674	7,0690	9,0060
Maksimum Aşma (%)	27,9302	28,5219	28,7689	27,9775	28,7085
Uygunluk Değeri	1,0689	1,0689	1,0689	1,0691	1,0695
Benzetim Süresi (s)	807,1248	815,7500	1069,5000	911,6876	807,1248

İkinci sistem için performans değerleri Tablo 42’da verilmiştir. Tabloda en az aşmanın GA, en düşük yükselme süresinin FG, en kısa kararlı duruma geçme süresinin PSO, en iyi uygunluk değerinin DRHO ve en az benzetim süresinin RHO ile sağlandığı görülmektedir.

Tablo 42. İkinci sistem için ISE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	0,5522	0,5529	0,5528	0,5541	0,5499
İntegral Kazancı	0,8978	0,8963	0,8962	0,8940	0,8720
Türevsel Kazanç	0,1426	0,1426	0,1426	0,1427	0,1449
Yükselme Süresi (s)	0,5557	0,5555	0,5558	0,5550	0,5721
Oturma Süresi (s)	7,4921	7,4930	7,4928	7,4945	8,4846
Maksimum Aşma (%)	27,2618	27,2128	27,1905	27,1544	24,8768
Uygunluk Değeri	1,1106	1,1106	1,1106	1,1106	1,1114
Benzetim Süresi (s)	842,3124	815,4376	1017,8124	1091,1248	842,3124

Üçüncü sistem için optimizasyon algoritmalarının performans değerleri Tablo 43'te sunulmuştur. Tabloda, en hızlı sistem tepkisi, en iyi uygunluk değeri ve en düşük benzetim süresine DRHO ve en az aşma en iyi uygunluk değerine FG algoritmasıyla ulaşıldığı görülmektedir.

Tablo 43. Son sistem için ISE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	4,9664	4,9704	4,9707	4,9768	2,9399
İntegral Kazancı	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	2,7236
Türevsel Kazanç	6,9906	6,9894	6,9928	6,9178	7,2308
Yükselme Süresi (s)	0,1058	0,1059	0,1058	0,1071	0,1101
Oturma Süresi (s)	0,7530	0,7530	0,7528	0,7575	1,5935
Maksimum Aşma (%)	23,4676	23,4600	23,4928	22,7753	16,6985
Uygunluk Değeri	0,1563	0,1563	0,1563	0,1563	0,1551
Benzetim Süresi (s)	757,6876	758,4376	747,0000	933,6876	757,6876

2.8.3. ITAE Kıstasına Göre Algoritmaların Başarımlarının Kıyaslanması

İlk sistem için sezgisel optimizasyon algoritmalarının, ITAE uygunluk fonksiyonu kullanıldığında elde edilen performans değerleri Tablo 44'te verilmiştir. Tabloda, en hızlı sistem cevabına, en hızlı kararlı duruma geçiş süresine ve en az aşma hatasına GA, en iyi uygunluk değerine DRHO ve en düşük benzetim süresine RHO ile erişildiği görülmektedir.

Tablo 44. 1. sistem için ITAE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	0,3893	0,3880	0,3913	0,3895	0,3864
İntegral Kazancı	0,7731	0,7724	0,7733	0,7699	0,7822
Türevsel Kazanç	0,0496	0,0487	0,0494	0,0474	0,0440
Yükselme Süresi (s)	0,8002	0,8024	0,7975	0,8024	0,7951
Oturma Süresi (s)	4,0626	4,0601	4,0653	4,0606	4,0478
Maksimum Aşma (%)	7,3486	6,9066	7,0003	5,8757	5,4082
Uygunluk Değeri	1,0269	1,0258	1,0256	1,0268	1,0405
Benzetim Süresi (s)	804,5624	803,7500	927,5624	1087,6876	804,5624

Tablo 45'te sezgisel optimizasyon algoritmalarının ikinci sistemi için elde edilen performans değerleri verilmiştir. Tabloda, GA ile en düşük oturma süresine ve en az aşma hatasına, DRHO ile en iyi uygunluk değerine, FG ile en hızlı sistem tepkisine ve RHO ile en kısa benzetim süresine ulaşıldığı görülmektedir.

Tablo 45. 2. sistem için ITAE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	0,4431	0,4413	0,4420	0,4496	0,4299
İntegral Kazancı	0,7620	0,7601	0,7609	0,7716	0,7568
Türevsel Kazanç	0,0795	0,0792	0,0794	0,0811	0,0743
Yükselme Süresi (s)	0,7805	0,7842	0,7827	0,7646	0,8013
Oturma Süresi (s)	3,1126	3,1110	3,1117	3,1124	2,8485
Maksimum Aşma (%)	5,2881	4,9687	5,1022	6,7119	3,8434
Uygunluk Değeri	1,0459	1,0457	1,0457	1,0476	1,0517
Benzetim Süresi (s)	830,9376	805,6876	999,8124	1069,6876	830,9376

Üçüncü sistem için performans değerleri Tablo 46'ta özetlenmiştir. Tabloda en hızlı sistem tepkisine FG, en az aşma ile en kısa sürede kararlı duruma geçişin GA, en iyi uygunluk değerine DRHO ve en kısa benzetim süresine RHO ile ulaşıldığı görülmektedir.

Tablo 46. 3. sistem için ITAE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	5,1970	5,2023	5,2903	5,0758	5,1434
İntegral Kazancı	0,0102	0,0025	0,0084	0,0454	0,0093
Türevsel Kazanç	4,7043	4,6893	4,7836	4,7083	4,6528
Yükselme Süresi (s)	0,1778	0,1785	0,1732	0,1786	0,1808
Oturma Süresi (s)	0,5992	0,6025	0,5977	0,5836	0,6006
Maksimum Aşma (%)	5,4648	5,4299	6,1171	5,0523	5,0742
Uygunluk Değeri	0,0286	0,0285	0,0285	0,0292	0,0286
Benzetim Süresi (s)	761,5000	758,6248	869,8752	940,3752	761,5000

2.8.4. ITSE Performans Kıstasına Yöntemlerin Başarımlarının Kıyaslanması

Son performans metriği için elde edilen benzetim sonuçları Tablo 47 – Tablo 49'da verilmiştir. Tablo 47'de en düşük yükselme süresine GA, en kısa oturma süresi ve en az

aşma hatasına RHO, en iyi uygunluk değerine DRHO ve en kısa benzetim süresine PSO ve GA kullanılarak ulaşıldığı görülmektedir.

Tablo 47. 1. sistem için ITSE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	0,5072	0,5048	0,5041	0,5054	0,5116
İntegral Kazancı	0,8512	0,8450	0,8480	0,8481	0,8569
Türevsel Kazanç	0,0636	0,0637	0,0637	0,0645	0,0640
Yükselme Süresi (s)	0,6019	0,6083	0,6049	0,6059	0,5902
Oturma Süresi (s)	5,0774	5,0756	5,0829	5,0776	7,0164
Maksimum Aşma (%)	23,1627	22,3768	22,8686	22,7093	24,5032
Uygunluk Değeri	0,5830	0,5830	0,5830	0,5830	0,5842
Benzetim Süresi (s)	808,7500	797,3752	949,4376	1055,1248	808,7500

Tablo 48’de ikinci sistem için elde edilen performans değerleri özetlenmiştir. Tabloda, en düşük yükselme zamanı için FG, en az aşma hatası ile en kısa sürede kararlı duruma geçiş için GA, en iyi uygunluk değeri için DRHO ve en kısa benzetim süresi için optimizasyon algoritması olarak RHO seçilmesi gerektiği görülmektedir.

Tablo 48. 2. sistem için ITSE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	0,5300	0,5308	0,5309	0,5336	0,5199
İntegral Kazancı	0,8626	0,8652	0,8647	0,8696	0,8600
Türevsel Kazanç	0,1249	0,1251	0,1250	0,1249	0,1254
Yükselme Süresi (s)	0,6044	0,6021	0,6022	0,5962	0,6187
Oturma Süresi (s)	6,1581	6,1592	6,1586	6,1596	6,1515
Maksimum Aşma (%)	22,2105	22,4982	22,4650	23,1443	20,9664
Uygunluk Değeri	0,6210	0,6210	0,6210	0,6211	0,6215
Benzetim Süresi (s)	835,0624	825,4376	997,8124	1078,9376	835,0624

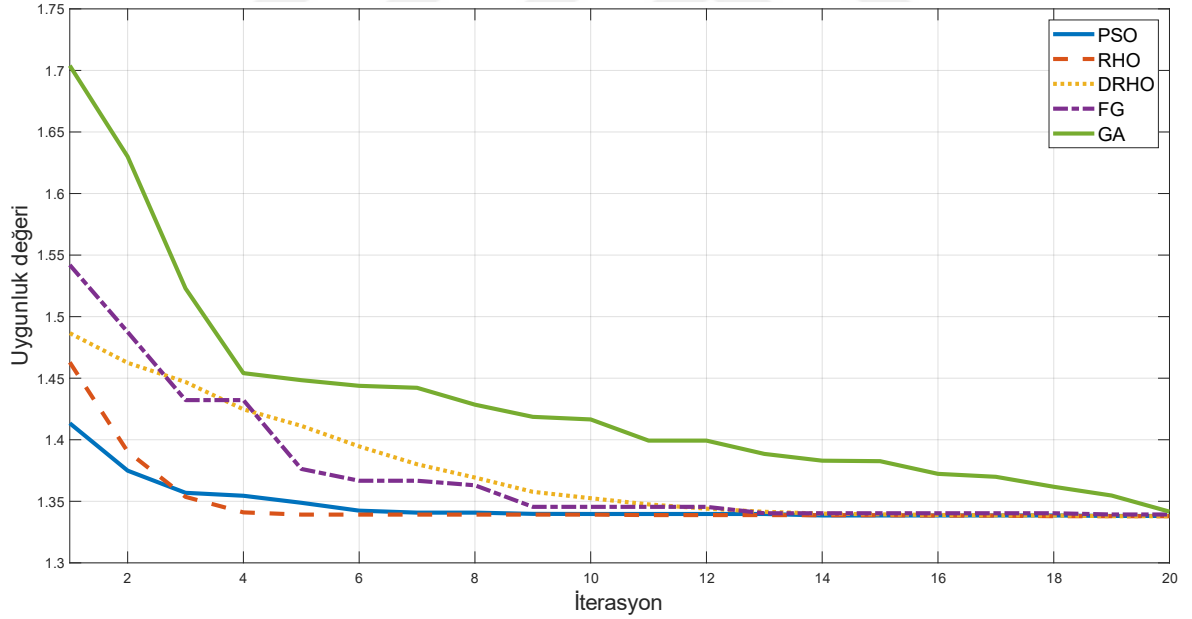
Üçüncü test sistem için Tablo 49’da görüldüğü gibi en kısa yükselme süresi için DRHO, en kısa oturma süresi için FG, en düşük aşma hatası ve en iyi uygunluk değeri için GA ve en kısa benzetim süresi için RHO seçilmelidir.

Tablo 49. 3. sistem için ITSE performans kıstasına göre algoritmaların karşılaştırılması

Parametre	Optimizasyon Algoritması				
	PSO	RHO	DRHO	FG	GA
Oransal Kazanç	5,6630	5,6667	5,6717	5,7475	4,9067
İntegral Kazancı	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,8322
Türevsel Kazanç	6,0599	6,0569	6,0583	5,9881	6,1817
Yükselme Süresi (s)	0,1257	0,1257	0,1257	0,1276	0,1263
Oturma Süresi (s)	0,7849	0,7848	0,7846	0,7821	0,8692
Maksimum Aşma (%)	15,8266	15,8083	15,8286	15,3775	13,7632
Uygunluk Değeri	0,0133	0,0133	0,0133	0,0133	0,0132
Benzetim Süresi (s)	758,8124	734,8124	878,9376	942,3752	758,8124

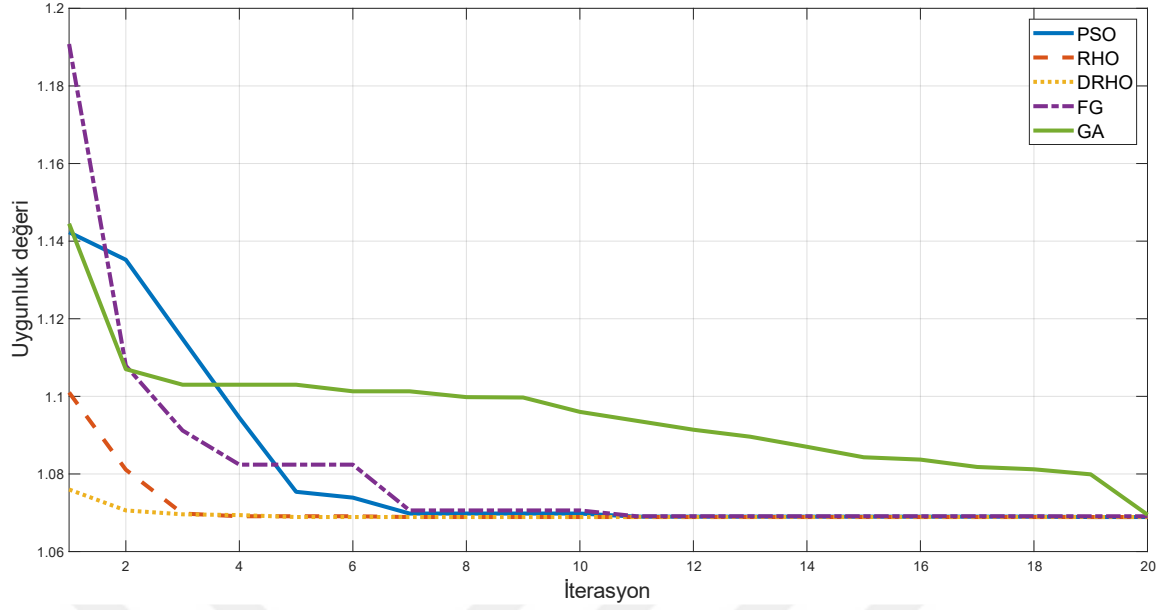
2.9. Sezgisel Optimizasyon Yöntemlerinin Yakınsamalarının Kıyaslanması

Bu kısımda beş sezgisel optimizasyon yönteminin uygunluk değerlerinin yakınsama eğrileri kıyaslanmıştır. 100 bağımsız deneme sonunda en iyi uygunluk değerinin sağlandığı bağımsız denemenin uygunluk eğrileri Şekil 67 – Şekil 78’de sunulmuştur.



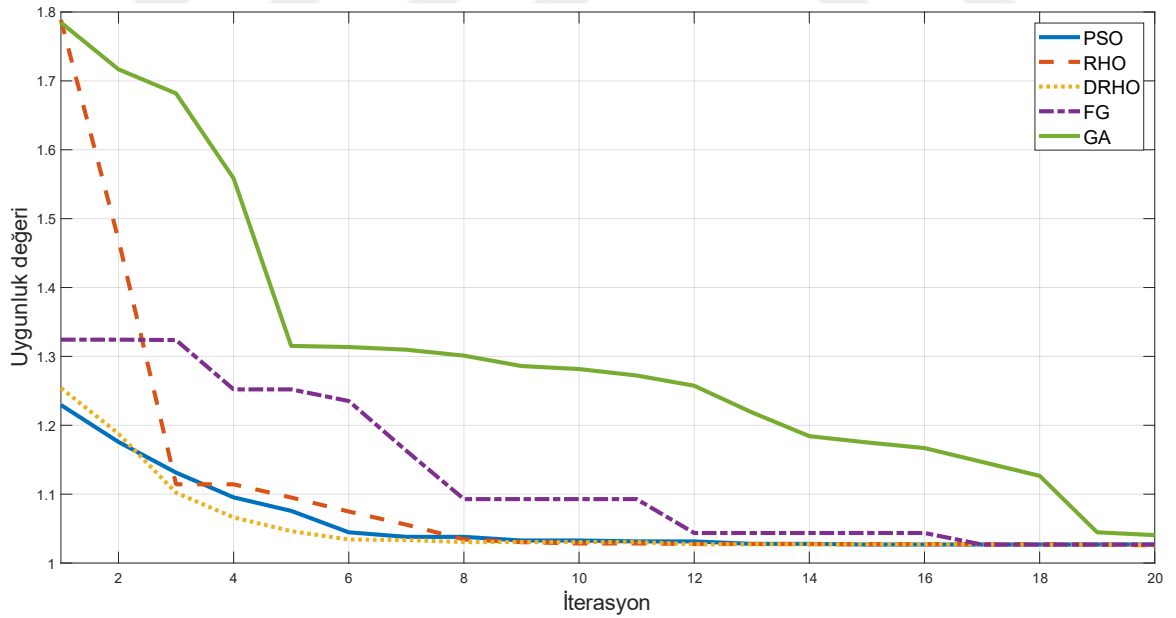
Şekil 67. 1. sistemin IAE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 67’de PSO ve RHO ile FG ve RHO algoritmalarının benzer yakınsama değişimlerine sahip olduğu görülmektedir. GA ilk iterasyonlarda en yüksek uygunluk değeri ile optimizasyona başlamış olup son iterasyonda tüm optimizasyon yöntemleri benzer uygunluk değerlerine ulaşmıştır.



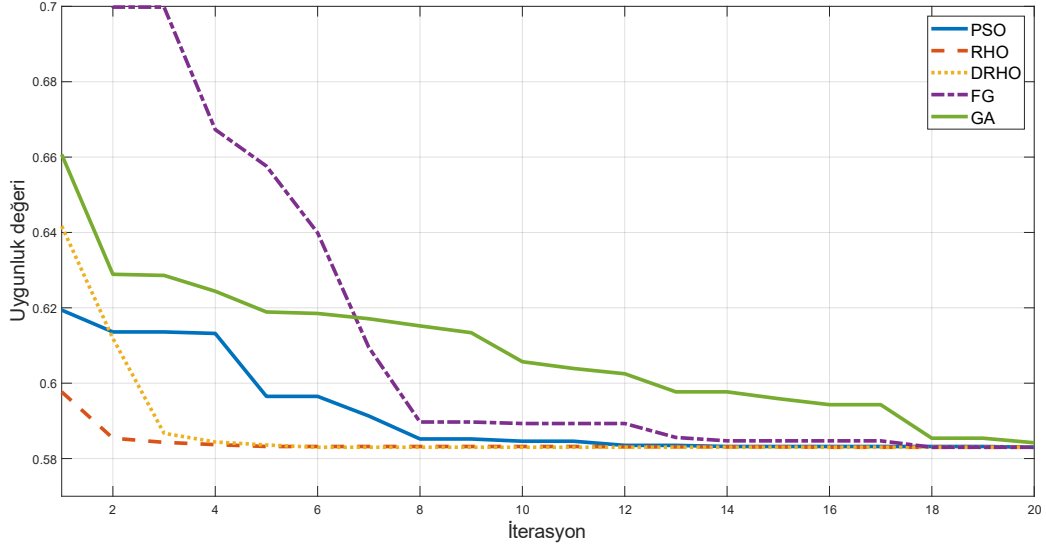
Şekil 68. 1. sistemin ISE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 68’de RHO ve DRHO ile PSO ve FG benzer yakınsama profilleri göstermiştir. GA algoritma en son yakınsamış olup, optimizasyon yöntemleri son iterasyonda birbirlerine yakın uygunluk değerleri elde etmiştir.



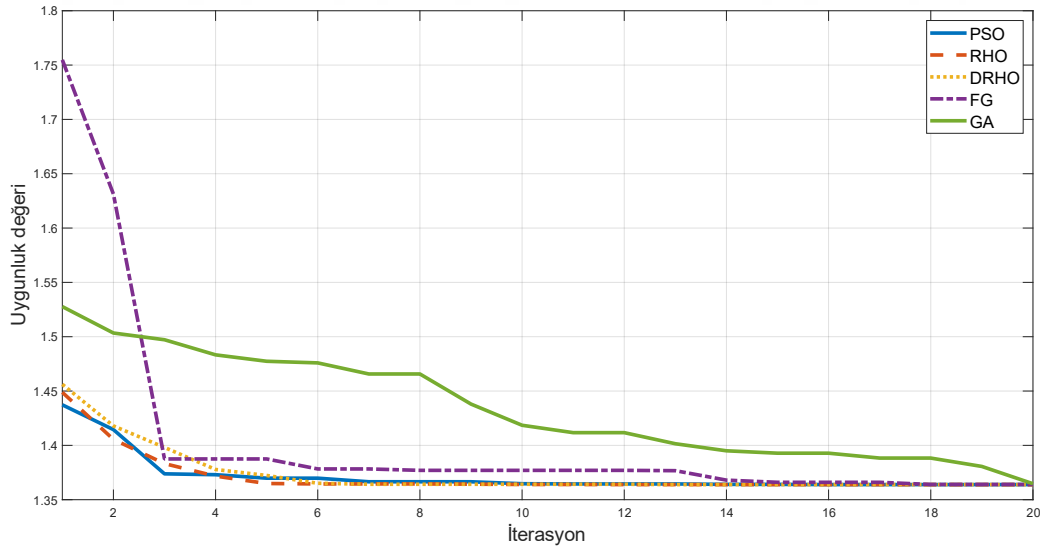
Şekil 69. 1. sistemin ITAE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 69’da PSO ve DRHO benzer yakınsama karakterine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca GA en geç yakınsamış ve uygunluk değeri diğer dört optimizasyon yöntemine göre daha yüksek çıkmıştır.



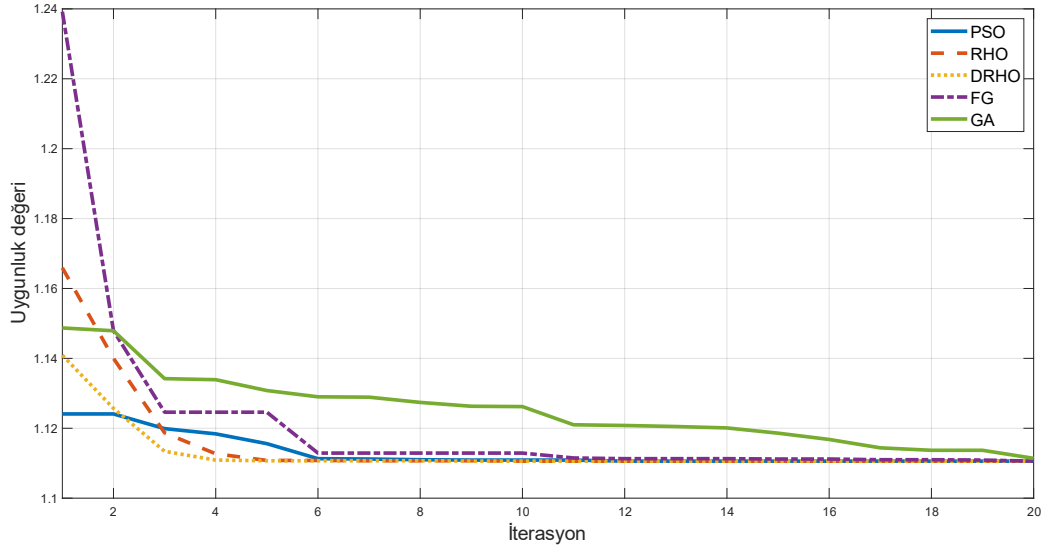
Şekil 70. 1. sistemin ITSE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 70'te RHO algoritmasının kazanç faktörlerinin optimizasyonuna en düşük uygunluk değeri ile başladığı ve en hızlı şekilde yakınsadığı görülmektedir. Optimizasyon sonunda GA algoritma diğer yöntemlere yakın fakat daha büyük bir uygunluk değeri üretmiştir.



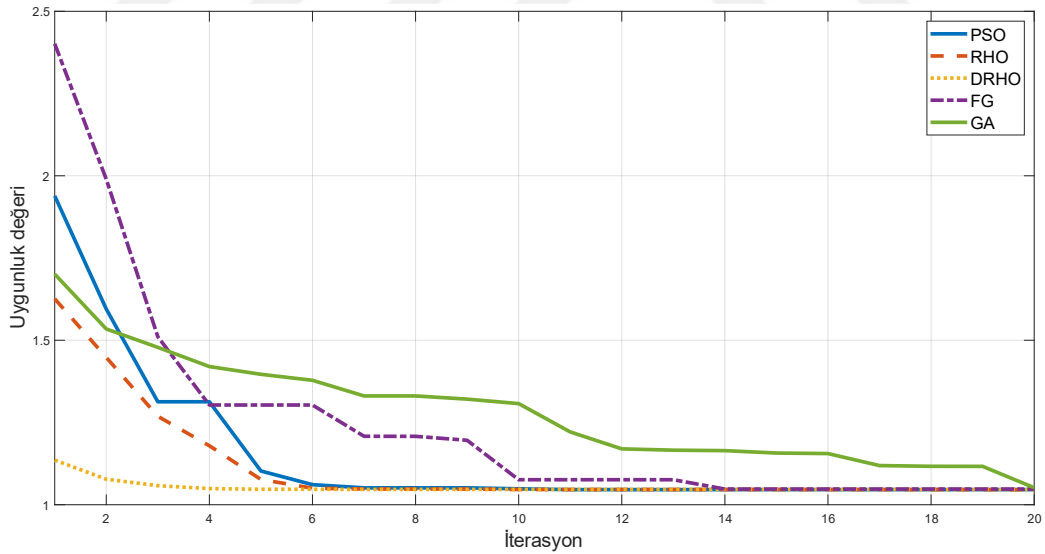
Şekil 71. 2. sistemin IAE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 71'de PSO, RHO ve DRHO algoritmalarının benzer yakınsama profillerine sahip olduğu görülmektedir. FG diğer dört yönteme göre parametre optimizasyonuna daha yüksek bir uygunluk değeri ile başlamıştır. Ancak son iterasyonda tüm yöntemler birbirlerine oldukça yakın uygunluk değerleri elde etmiştir.



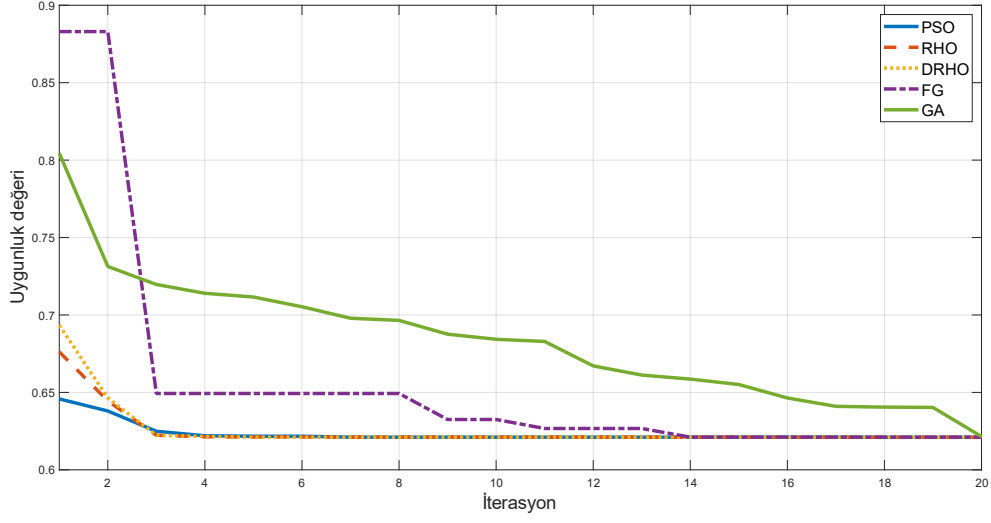
Şekil 72. 2. sistemin ISE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 72’de en hızlı yakınsama profiline DRHO algoritmasının sahip olduğu görülmektedir. FG algoritması ilk iterasyonda en kötü uygunluk değerini vermiş olup, son iterasyonda tüm sezgisel optimizasyon yöntemleri yakın uygunluk değerleri elde etmiştir.



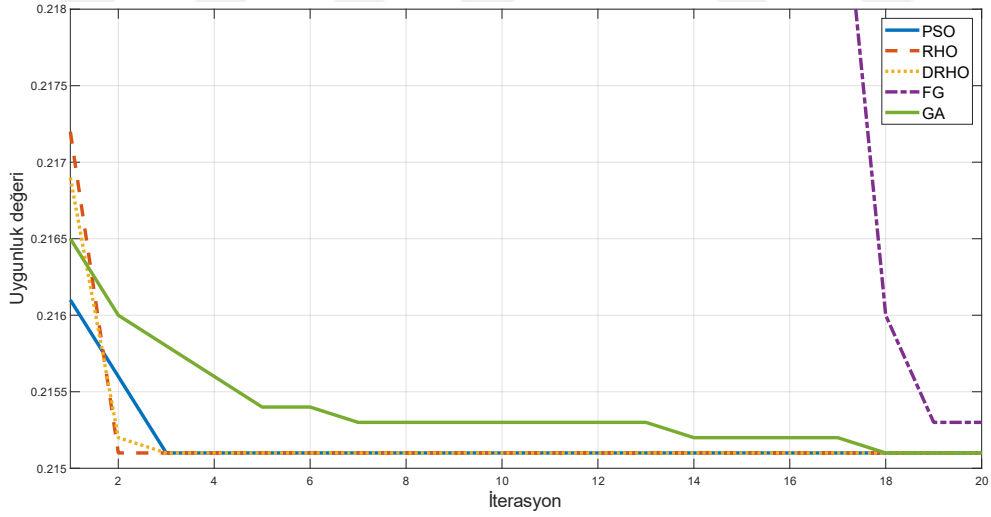
Şekil 73. 2. sistemin ITAE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 73’te DRHO algoritmasının parametre optimizasyonuna en iyi uygunluk değeri ile başladığı ve en hızlı şekilde yakınsadığı görülmektedir. GA diğer dört algortmadan daha farklı bir yakınsama karakteristiği sergilemiştir. Ancak son iterasyonda tüm optimizasyon yöntemlerinin hemen hemen aynı uygunluk değerine yakınsadığı tespit edilmiştir.



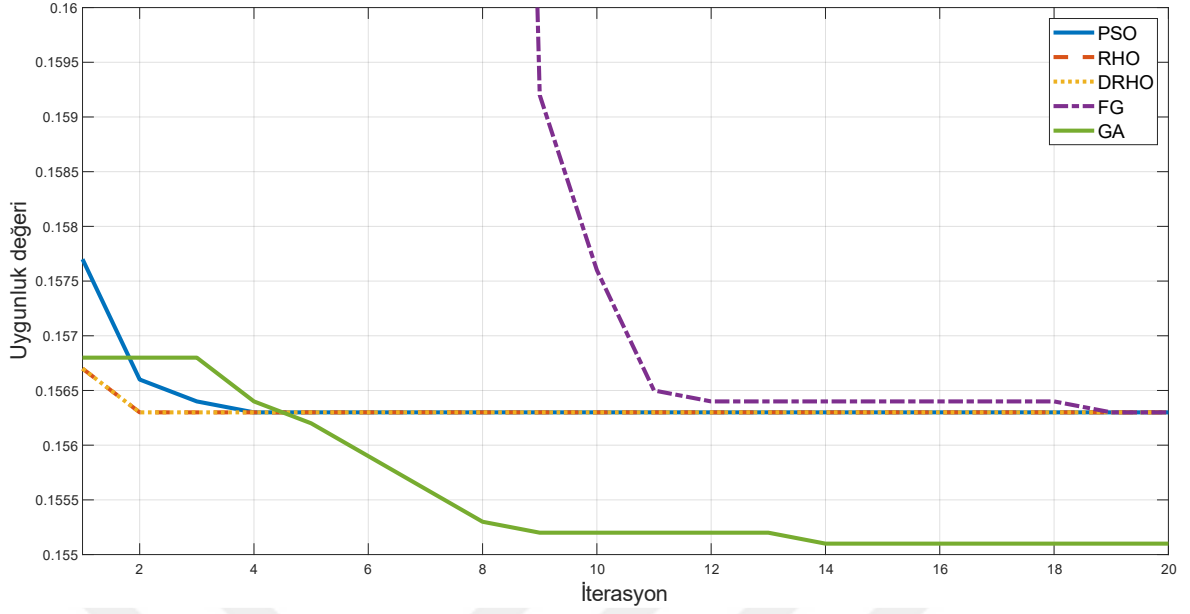
Şekil 74. 2. sistemin ITSE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 74'te PSO, RHO ve DRHO algoritmalarının benzer yakınsama eğrileri ile en erken yakınsadığı görülmektedir. FG ilk iterasyonda optimizasyona en kötü uygunluk değeri ile başlamıştır. Ancak son iterasyonda tüm algoritmalar birbirlerine oldukça yakın uygunluk değerleri elde etmiştir.



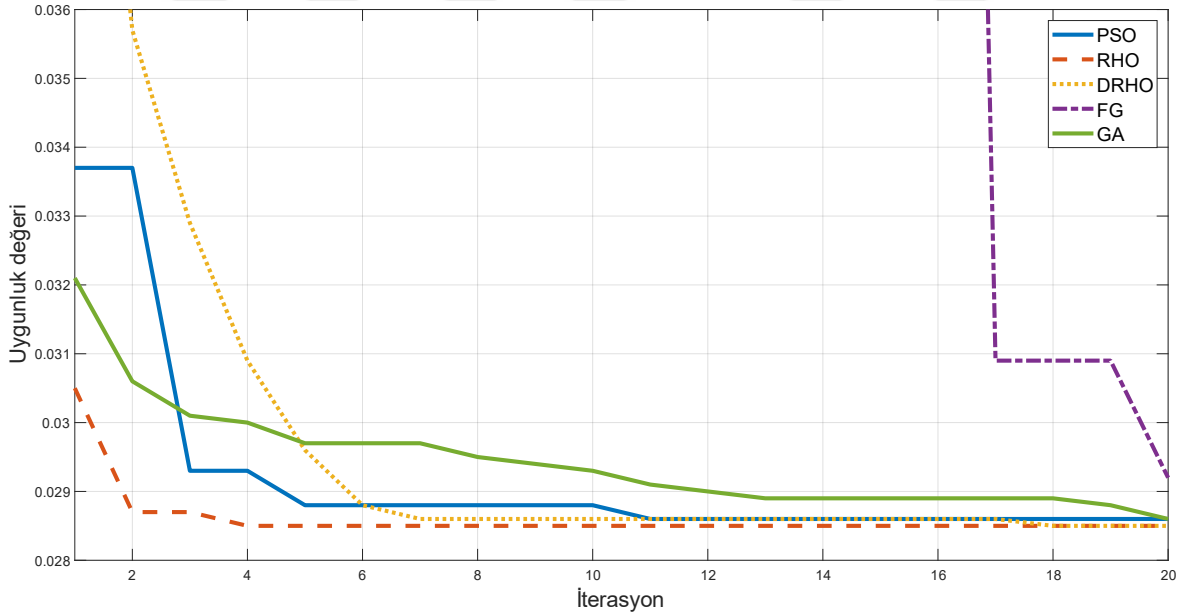
Şekil 75. 3. sistemin IAE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 75'te RHO ve DRHO algoritmalarının benzer yakınsama karakteristikleri ile en hızlı şekilde yakınsadığı görülmektedir. FG optimizasyonu ilk iterasyonda diğer dört yöntemle göre oldukça kötü bir uygunluk değerine sahiptir. Ayrıca parametre optimizasyonu sonunda FG diğer dört sezgisel optimizasyon yöntemine göre daha yüksek bir uygunluk değeri elde etmiştir.



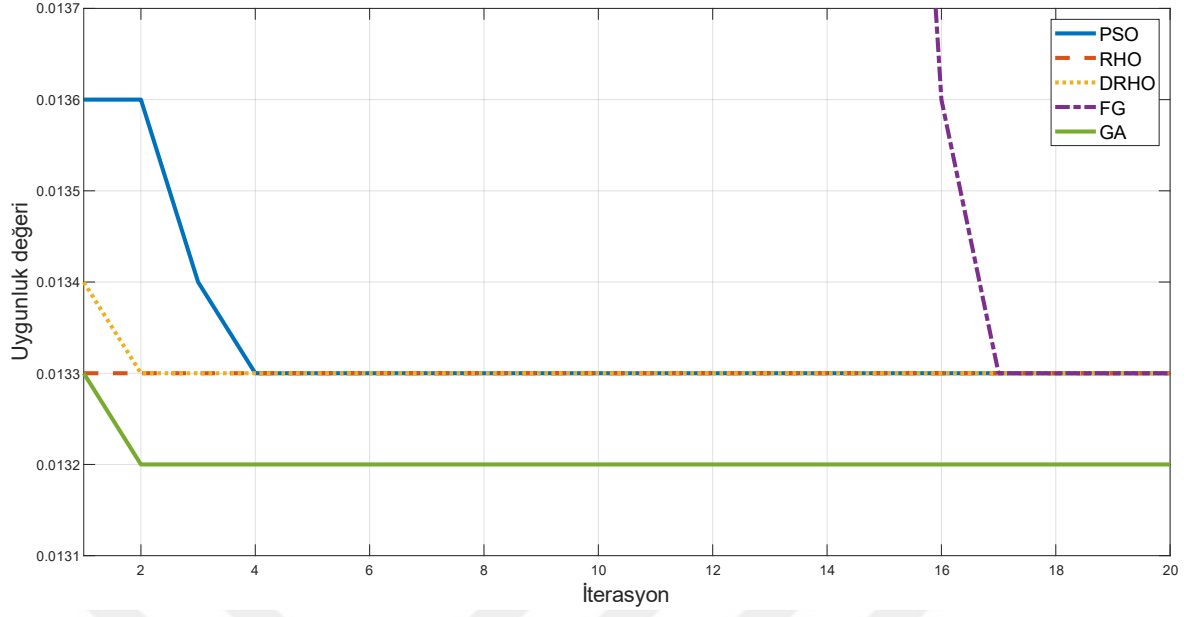
Şekil 76. 3. sistemin ISE kriterine göre elde edilen uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 76'da RHO ve DRHO algoritmalarının en hızlı şekilde yakınsadığı görülmektedir. Ancak parametre optimizasyonunda en iyi uygunluk değerini GA vermiştir.



Şekil 77. 3. sistemin ITAE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 77'de RHO en iyi uygunluk değeri ile parametre optimizasyonuna başlamış ve en kısa sürede yakınsamıştır. Optimizasyon sonunda FG diğer dört algoritmaya göre daha kötü bir uygunluk değeri elde etmiştir.



Şekil 78. 3. sistemin ITSE kriterine göre bulunan uygunluk değerlerinin yakınsaması

Şekil 78’te GA yönteminin en hızlı şekilde yakınsadığı görülmektedir. Ayrıca son iterasyonda GA diğer dört optimizasyon yöntemine göre daha iyi bir uygunluk değeri elde etmiştir.

3. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tezinde PID denetleyicinin parametreleri ZN, PSO, RHO, DRHO, FG ve GA kullanılarak ayarlanmıştır. Bu kapsamında elde edilen başlıca sonuçlar şunlardır:

- Bildiğimiz kadarı ile DRHO algoritması PID kazanç faktörlerinin optimizasyonunda ilk kez bu yüksek lisans tezinde kullanılmıştır.
- 1. test sistemi için IAE performans kriterine göre parametre optimizasyonunda FG algoritmasının en düşük yükselme ve oturma süresine sahip olduğu ve en az aşmanın GA ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca en iyi uygunluk değeri RHO ve DRHO ile elde edilmiştir.
- 2. test sistemi için IAE performans kistasına göre PID denetleyicinin kazanç faktörlerinin ayarlanmasında en hızlı sistem tepkisi ve en iyi uygunluk değeri için RHO ve en kısa sürede en az aşma ile kararlı duruma geçiş için GA kullanılmalıdır.
- 3. test sistemi için IAE performans metriğine göre ağırlıklandırma sabitlerinin optimize edilmesinde RHO algoritmasının en az yükselme süresi, en düşük oturma süresi ve en iyi uygunluk değerine sahiptir. Ayrıca en az aşma hatası FG ile elde edilmiştir.
- 1. sistem için ISE performans metriğine göre parametre ayarlanmasında en az aşma GA, en düşük yükselme süresi FG, en kısa kararlı duruma geçme süresi PSO ve en iyi uygunluk değeri DRHO ile sağlanmıştır.
- 2. sistem için ISE performans kriterine göre kazanç sabitlerinin optimizasyonunda en hızlı sistem tepkisi ve en iyi uygunluk değeri DRHO ve en az aşma ve en iyi uygunluk değerine FG algoritmasıyla ulaşılmıştır.
- 3. sistem için ISE performans kistasına göre ağırlıklandırma faktörlerinin optimize edilmesinde en hızlı sistem tepkisi ve en iyi uygunluk değeri DRHO ve en az aşma ve en iyi uygunluk değeri FG algoritması ile elde edilmiştir.
- 1. sistem için ITAE performans kriterine göre parametre optimizasyonunda en hızlı sistem cevabına, en hızlı kararlı duruma geçiş süresine ve en az aşma hatasına GA ve en iyi uygunluk değerine DRHO ile ulaşılmıştır.
- 2. sistem için ITAE performans kistasına göre ağırlıklandırma faktörlerinin ayarlanmasında, GA ile en düşük oturma süresine ve en az aşma hatasına, DRHO ile en iyi uygunluk değerine ve FG ile en hızlı sistem tepkisine ulaşılmıştır.
- 3. sistem için ITAE performans metriğine göre kazanç sabitlerinin optimize edilmesinde en hızlı sistem tepkisine FG, en az aşma ile en kısa sürede kararlı duruma geçişin GA ve en iyi uygunluk değerine DRHO ile erişilmiştir.

- 1. sistem için ITSE performans kıstasına göre kazanç faktörlerinin optimizasyonunda en düşük yükselme süresine GA, en kısa oturma süresi ve en az aşma hatasına RHO ve en iyi uygunluk değerine DRHO ile ulaşılmıştır.
- 2. sistem için ITSE performans metriğine göre parametre ayarlanmasında en düşük yükselme zamanı için FG, en az aşma hatası ile en kısa sürede kararlı duruma geçiş için GA ve en iyi uygunluk değeri için DRHO algoritması seçilmelidir.
- 3. sistem için ITSE performans kriterine göre ağırlıklandırma sabitlerinin optimize edilmesinde, en kısa yükselme süresi için DRHO, en kısa oturma süresi için FG ve en düşük aşma hatası ve en iyi uygunluk değeri için GA kullanılmalıdır.



4. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında ortaya konan sonuçları daha da ileri götürmek ve parametre optimizasyonunda akademik çalışmalar gerçekleştiren araştırmacılara yol göstermek amacıyla PID kazanç faktörlerinin ayarlanmasına yönelik başlıca öneriler şunlardır:

- Öğrenme katsayıları, parçacık sayısı ve yineleme sayısı gibi PSO parametrelerinin PID parametrelerinin ayarlanması üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Öğrenme katsayıları, parçacık sayısı ve yineleme sayısı gibi RHO parametrelerinin PID parametrelerinin ayarlanması üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Öğrenme katsayıları, parçacık sayısı ve yineleme sayısı gibi DRHO parametrelerinin PID parametrelerinin ayarlanması üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Birey sayısı, ağırlıklandırma sabiti ve çaprazlama oranı gibi FG parametrelerinin PID parametrelerinin ayarlanması üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Kromozom sayısı, seçim yöntemi ve çaprazlama yöntemi gibi ağırlıklandırma sabiti ve çaprazlama oranı gibi FG parametrelerinin PID parametrelerinin ayarlanması üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Sezgisel optimizasyon yöntemleri parçacıkların veya bireylerin rastgele hareketinden dolayı her denemede birbirine yakın fakat farklı başarımlar elde etmektedirler. Bu nedenle benzetim sonuçlarının daha doğru ve tutarlı olması için en 1.000 bağımsız denemenin ortalaması alınabilir.

5. KAYNAKLAR

- Aggarwal, R. & Song, Y. (1997). Artificial Neural Networks in Power Systems. Part 1: General Introduction to Neural Computing. *Power Engineering Journal*, 11(3), 129-134.
- Agrawal, R. B., Deb, K. & Agrawal, R. B. (1994). *Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space*. Kanpur: Indian Institute of Technology.
- Aldebrez, F. M., Alam, M. S. & Tokhi, M. O. (2016). Input Shaping with GA Tuned PID for Target Tracking and Vibration Reduction. *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control*, s. 485-490, Limassol.
- Alrijadjis, D., Tanaka, K. & Nakashima, S. (2013). Hybrid Strategy for Improving PSO And Its Application for Self-Tuning PID Controller on Position Control Of Ultrasonic Motor. *International Conference of Information and Communication Technology*, s. 99-104, Bandung.
- Alyoussef, F. & Kaya, I. (2019). TRMS Experimental Results of New Nonlinear PID Tuned by DE Algorithm. *International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics*, s. 1-6, Elazig.
- Anto, E. K., Asumadu, J. A., & Okyere, P. Y. (2016). PID Control for Improving P&O-MPPT Performance of a Grid-Connected Solar PV System with Ziegler-Nichols Tuning Method. *IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications*, s. 1847-1852, Hefei.
- Arif, D. K., Firmansyah, M. A., Adzkiya, D., Winggari, I., Octaviano, I., Ismail, R. W., Anam, M. A. N., & Anshori, F. (2018). PID Controller Design for SSV BRP TARLAC Ship Heading Using Ziegler Nichols Tuning Method. *International Conference on Advanced Mechatronics Intelligent Manufacture and Industrial Automation*, s. 248-253, Surabaya.
- Åström, K. J. & Hägglund, T. (1995). *PID Controllers Theory Design and Tuning*. Pittsburgh: Instrument Society of America.
- Åström, K. J. & Hägglund, T. (2005). *Advanced PID Control*. Pittsburgh: Instrument Society of America.
- Bamasak, S. M. & Bensenouci, A. (2014) Tuning of Fractional Order PID Controller For TCSC Based Stabilizer Using PSO For Power System Oscillation Damping. *IEEE International Energy Conference*, s. 262-266, Cavtat.
- Bingul, Z. & Karahan, O. (2011). Tuning of Fractional PID Controllers Using PSO Algorithm for Robot Trajectory Control. *IEEE International Conference on Mechatronics*, s. 955-960, İstanbul.

- Boudardara, F. & Gorkemli, B. (2018). Application of Artificial Bee Colony Programming to Two Trails of the Artificial Ant Problem. *2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, s. 1-6, Ankara.
- Casini, M., Prattichizzo, D. & Vicino, A. (2001). The Automatic Control Telelab a Remote Control Engineering Laboratory. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, s. 3242-3247, Orlando.
- Chee, F., Fernando, T., Savkin, A. & van Heerden, P. (2004). Erratum to Expert PID Control System for Blood Glucose Control in Critically Ill Patients. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 8(2), 228-228.
- Chen, G. Perng, J. & Ma, L. (2016). DSP Based BLDC Motor Controller Design with Auto Tuning PSO-PID Algorithm. *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, s. 766-770, Nagoya.
- Chen, P., Yang, M. & Sun, T. (2011). PSO Based On-Line Tuning PID Controller For Setpoint Changes and Load Disturbance. *IEEE Congress of Evolutionary Computation*, s. 1887-1894, New Orleans.
- Cohen, G. H. & Coon, G. A. (1953). Theoretical Consideration of Retarded Control. *Transactions of the ASME*, 75(1), 827-834.
- Deb, K. (1999). An Introduction to Genetic Algorithms. *Sadhana*, 24(4-5), 293-315.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- Dos Santos Coelho, L. & Alotto, P. (2011). Gaussian Artificial Bee Colony Algorithm Approach Applied to Loney's Solenoid Benchmark Problem. *IEEE Transactions on Magnetism*, 47(5), 1326-1329.
- Eberhart, R. C., & Kennedy, J. (1995). A New Optimizer Using Particle Swarm Theory. In *Proceedings of The Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, s.39-43, Nagoya.
- Eberhart, R. C., Simpson, P. K., & Dobbins, R. W. (1996). *Computational Intelligence PC Tools*. Boston: Academic Press.
- Fang, H. & Chen, L. (2009). Application of an Enhanced PSO Algorithm to Optimal Tuning of PID Gains. *Chinese Control and Decision Conference*, s 35-39, Guilin.
- Fokas, A. (2002). A New Transform Method for Evolution Partial Differential Equations. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 67(6), 559-590.
- Geetha, M., Balajee, M. K. A. & Jerome, J. (2012). Optimal Tuning of Virtual Feedback PID Controller for A Continuous Stirred Tank Reactor using Particle Swarm Optimization Algorithm. *IEEE International Conference on Advances in Engineering Science and Management*, s. 94-99, Nagapattinam.

- Gille, J. & Paquet, J. (1962). Subharmonic Oscillations in On-Off Control Systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 81(4), 210-216.
- Goldberg, D. E. & Deb, K. (1991). A Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms. *Urbana*, 51(1), 801-996.
- Hägglund, T. & Åström, K. J. (2004). Revisiting The Ziegler-Nichols Step Response Method for PID Control. *Journal of Process Control*, 14(6), 635–650.
- Heppner, H., & Grenander, U. (1990). *A Stochastic Non-Linear Model for Coordinated Bird Flocks*. Washington: AAAS.
- Ho, M. & Tu, Y. (2006). Position Control of a Single-Link Flexible Manipulator Using H_{∞} -Based PID Control. *IEE Proceedings Control Theory and Applications*, 153(5), 615-622.
- Jaafar, H. I., Mohamed, Z., Abidin, A. F. Z. & Ghani, Z. (2012). PSO Tuned PID Controller for A Nonlinear Gantry Crane System. *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, s. 515-519, Penang.
- Jing, H., Liu, Z. & Chen, H. (2011). A Switched Control Strategy for Antilock Braking System with On/Off Valves. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(4), 470-1484.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. C. (1995). Particle Swarm Optimization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV*, s. 1942-1948, Piscataway.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. C. (1997). A Discrete Binary Version of The Particle Swarm Algorithm. In *Proceedings of The Conference on Systems Man and Cybernetics*, s. 4104-4109, Piscataway.
- Koswara, A. & Nagy, Z. (2017). On-Off Feedback Control of Plug-Flow Crystallization. *IEEE Life Sciences Letters*, 3(1), 1-4.
- Lee, T. (2008). Optimal Wind-Battery Coordination in A Power System Using Evolutionary Iteration Particle Swarm Optimization. *IET Generation Transmission Distribution*, 2(2), 291.
- Li, J., Huang, J. & Chen, G. (2012). Design of DE-Tuning PID Controller for Linear Servo System. *IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence*, s. 437-440, Nanjing.
- Li, X., Yu, F. & Wang, Y. (2007). PSO Algorithm Based Online Self-Tuning of PID Controller. *International Conference on Computational Intelligence and Security*, s. 128-132, Harbin.

- Medewar, P. G. & Munje, R. K. (2016). PSO Based PID Controller Tuning for PMDC Motor. *International Conference on Energy Systems and Applications*, s. 522-526, Pune.
- Meshram, P. M. & Kanojiya, R. G. (2012). Tuning of PID Controller Using Ziegler-Nichols Method for Speed Control of DC Motor. *IEEE International Conference on Advances in Engineering Science and Management*, s. 117-122, Nagapattinam.
- Miller B. L. & Goldberg, D. E. (1995). Genetic Algorithms Tournament Selection And The Effects Of Noise. *Complex Systems*, 9(3), 193-212.
- Mills, K., Filliben, J. & Haines, A. (2015). Determining Relative Importance and Effective Settings for Genetic Algorithm Control Parameters. *Evolutionary Computation*, 23(2), 309-342.
- Mirzaei, E. & Mojallali, H. (2013). Auto Tuning PID Controller Using Chaotic PSO Algorithm for A Boost Converter. *3th Iranian Conference on Fuzzy Systems*, s. 1-6, Qazvin.
- Mohamed, H. K., Aparna, V, Shajahan, M. S. M. & Jamal, D. N. (2018). Tuning of PID Controller Using GA, SA and QFT for Three Interacting Tank Process. *2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics*, s. 549-553, Tirunelveli.
- Nema, S. & Padhy, P. K. (2013). PSO Based PID Tuning TITO Process. *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, s. 1-4, Coimbatore.
- Nirmal, J. F. & Auxillia, D. J. (2013). Adaptive PSO Based Tuning of PID Controller for an Automatic Voltage Regulator System. *International Conference on Circuits Power and Computing Technologies*, s. 661-668, Nagercoil.
- Ohri, V. J. (2015). GA Tuned LQR And PID Controller for Aircraft Pitch Control. *IEEE 6th India International Conference on Power Electronics*, s. 1-6, Kurukshetra.
- Oi, A., Nakazawa, C., Matsui, T., Fujiwara, H., Matsumoto, K., Nishida, H., Ando, J. & Kawaura, M. (2008). Development of PSO-Based PID Tuning Method. *International Conference on Control Automation and Systems*, s. 1917-1920, Seoul.
- Olsen, T. & Bialkowski, B. (2002). Lambda Tuning as a Promising Controller Tuning Method for the Refinery. *Spring National Meeting in New Orleans*, s. 1-8, Orleans.
- Pano, V. & Ouyang, P. R. (2014). Comparative Study of GA PSO and DE For Tuning Position Domain PID Controller. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, s. 1254-1259, Bali.
- Pano, V. & Ouyang, P. R. (2014). PSO Gain Tuning for Position Domain PID Controller. *The 4th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent*, s. 377-382, Hong Kong.

- Pano, V. & Ouyang, P. R. (2015). Comparative Study of GA PSO And DE For Tuning Position Domain PID Controller. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, s. 1254-1259, Bali.
- Pongfai, J. & Assawinchaichote, W. (2017). Self-Tuning PID Parameters Using NN-GA for Brush DC Motor Control System. *Information Technology*, s. 111-114, Phuket.
- Popov, A. (2013). *Genetic Algorithms for Optimization*. Hamburg: TU.
- Pradeepkannan, D. & Sathiyamoorthy, S. (2014). Control of a Non-Linear Coupled Spherical Tank Process Using GA Tuned PID Controller. *IEEE International Conference on Advanced Communications Control and Computing Technologies*, s. 130-135, Ramanathapuram.
- Price, K. & Storn, R. (1997). Differential Evolution Numerical Optimization Made Easy. *Dr. Dobbs' Journal*, 220(1), 18-24.
- Price, K. (1999). *An Introduction to Differential Evolution*. London: McGraw-Hill.
- Price, K., Storn, R., & Lampinen, J. (2005). *Differential Evolution a Practical Approach to Global Optimization*. Berlin: Springer-Verlag.
- Queen, A. A. & Auxillia, D. J. (2013). Simplified Discrete Binary PSO Tuned Multivariable PID Controller for Binary Distillation Column Plant. *International Conference on Circuits Power and Computing Technologies*, s. 667-372, Nagercoil.
- Rahmani, R. & Yusof, R. (2014). A New Simple Fast and Efficient Algorithm for Global Optimization over Continuous Search-Space Problems Radial Movement Optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 24(8), 287-300.
- Rahmani, R. & Yusof, R. (2014). A New Simple, Fast and Efficient Algorithm for Global Optimization over Continuous Search-Space Problems Radial Movement Optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 248(1), 287-300.
- Rahmani, R., Yusof, R. & Ismail, N. (2015). A New Metaheuristic Algorithm for Global Optimization Over Continuous Search Space. *ICIC Express Letters*, 9(5), 1335-1340.
- Rahmani, R., Yusof, R. & Ismail, N. (2015). A New Metaheuristic Algorithm for Global Optimization over Continuous Search Space. *ICIC Express Letters*, 9(5), 1335-1340.
- Rajesh, R. J. & Ananda, C. M. (2015). PSO Tuned PID Controller for Controlling Camera Position in UAV Using 2-Axis Gimbal. *International Conference on Power and Advanced Control Engineering*, s. 128-133, Bangalore.
- Sethi, D. & Singhal, A. (2017). Comparative Analysis of A Recommender System Based on Ant Colony Optimization and Artificial Bee Colony Optimization Algorithms. *8th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies*, s. 1-4, Delhi.

- Sharaf, A. M. & El-Gammal, A. A. A. (2009). An Integral Squared Error ISE Optimal Parameters Tuning of Modified PID Controller for Industrial PMDC Motor Based On Particle Swarm Optimization. *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, s. 1953-1959, Wuhan.
- Shekhar, H., Kuanr, B. R., Konar, G. & Chakraborty, N. (2015). Automatic Generation Control of a Hybrid Power System in Deregulated Environment Utilizing GA DE And CA Tuned PID Controller. *IEEE Power Communication and Information Technology Conference*, s. 1-6, Bhubaneswar.
- Solihin, M. I., Kamal, M. A. S., & Legowo, A. (2008). Optimal PID Controller Tuning of Automatic Gantry Crane Using PSO Algorithm. *5th International Symposium on Mechatronics and Its Applications*, s. 1-5, Amman.
- Sridhar, M., Vaisakh, K. & Murthy, K. S. L. (2010). Adaptive PSO Based Tuning of PID-Fuzzy and SVC-PI Controllers for Dynamic Stability Enhancement a Comparative Analysis. *Second International Conference on Emerging Trends in Engineering Technology*, s. 985-990, Nagpur.
- Sulila, S. M. S. & Riyadi, M. A. (2017). Particle Swarm Optimization Based Self-Tuning Proportional Integral Derivative for Bearing Navigation Control System on Quadcopter. *4th International Conference on Information Technology Computer and Electrical Engineering*, s. 181-186, Semarang.
- Thangaraj, R., Pant, M., Bouvry, P. & Abraham, A. (2011). Solving Stochastic Programming Problems Using Modified Differential Evolution Algorithms. *Logic Journal of IGPL*, 20(4), 732-746.
- Trebi-Ollennu, A. & White, B. (1997). Multiobjective Fuzzy Genetic Algorithm Optimisation Approach to Nonlinear Control System Design. *IEE Proceedings Control Theory and Applications*, 144(2), 137-142.
- Turkmen, I. & Guney, K. (2004). Artificial Neural Networks for Calculating the Association Probabilities in Multi-Target Tracking. *IEE Proceedings Radar Sonar and Navigation*, 151(4), 181.
- Xie, Y. & Zhang, W. (2019). A Novel Tuning Method for PID Controller Based on Improved PSO Algorithm for Unstable Plants with Time Delay. *Chinese Control Conference*, s. 4270-4275, Guangzhou.
- Yadaiah, N. & Malladi, S. (2013). An Optimized Relation Between T_i and T_d In Modified Ziegler Nichols PID Controller Tuning. *IEEE International Conference on Control Applications*, s. 1275-1280, Hyderabad.
- Zennir, Y., Bendib, R., Hermouche, B., Mechhoud, E., Foguem, B. K. & Belmeguenai, A. (2019). Modelling and GA Fine-tuned PID Control of Quadrirotor UAV. *19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering*, s. 53-58, Sousse.

- Zhang, G. & Furusho, J. (2000). Speed Control of Two-Inertia System By PI/PID Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(3), 603-609.
- Zhang, G. (2011). Marine Diesel-Generator Excitation Controller Based on Adaptive On-Line GA Tuning PID. *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, s. 3868-3871, Yantai.
- Zhang, R. & Wu, C. (2012). A Neighborhood Property for The Job Shop Scheduling Problem with Application to Hybrid Particle Swarm Optimization. *IMA Journal of Management Mathematics*, 24(1), 111-134.
- Zhang, X., Zhang, X. & Wang, L. (2018). Antenna Design by an Adaptive Variable Differential Artificial Bee Colony Algorithm. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 1-4.
- Ziegler, J. G. & Nichols, N. B. (1942). Optimum Settings for Automatic Controllers. *Transactions of the ASME*, 64(1), 759-768.

ÖZGEÇMİŞ

Lise eğitimini Bayburt Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı ve 2013'te bu bölümden Elektrik-Elektronik Mühendisi unvanıyla mezun oldu. 2014'te Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Lisans ve yüksek lisans öğrenimi boyunca sistem modelleri, kontrol sistemleri, optimizasyon algoritmaları ve elektrik dağıtım şebekeleri alanında akademik çalışmalar gerçekleştirmiş ve iyi düzeyde İngilizce bilmektedir.