



An opposition-based atom search optimization algorithm for automatic voltage regulator system

Serdar Ekinci^{1*}, Ayşen Demirören², Hatice Lale Zeynelgil², Baran Hekimoğlu³

¹Department of Computer Engineering, Batman University, Batman, 72100, Turkey

²Department of Electrical Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, 34469, Turkey

³Department of Electrical & Electronics Engineering, Batman University, Batman, 72100, Turkey

Highlights:

- OBL strategy is used to improve the convergence of the ASO.
- The performance of PIDD² controller is better than PID and FOPID controllers.
- The proposed novel method is efficient and robust.

Keywords:

- Automatic voltage regulator
- opposition-based learning
- atom search optimization algorithm
- parameter tuning

Article Info:

Research Article
Received: 30.07.2019
Accepted: 11.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.598576

Correspondence:

Author: Serdar Ekinci
e-mail: ekinciser@yahoo.com
phone: +90 553 558 5941

Graphical/Tabular Abstract

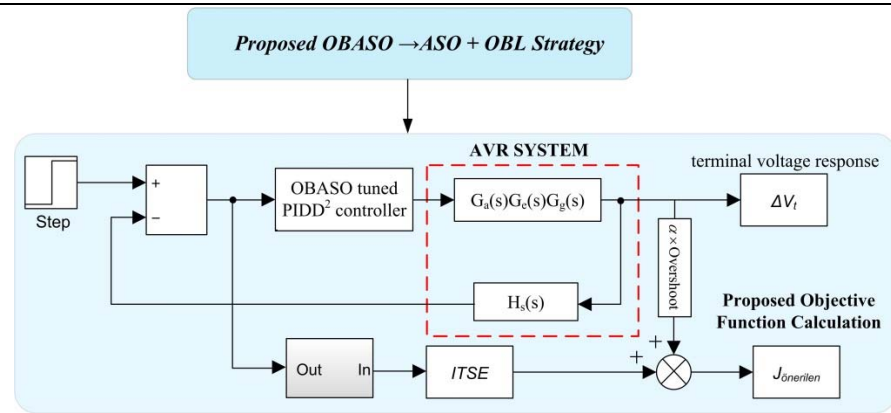


Figure A. OBASO implementation block diagram for optimizing the AVR performance

Purpose: This article presents a modified version of atom search optimization (ASO) algorithm that uses the opposition-based learning (OBL) to improve the search space exploration.

Theory and Methods:

OBL is a commonly used machine learning strategy for increasing the performance of meta-heuristic algorithms. As a new design method, the opposition-based ASO (OBASO) algorithm was proposed for the first time in determining the optimum values of the proportional-integral-derivative plus second order derivative (PIDD²) controller parameters in an automatic voltage regulator (AVR) system. In the design problem, a new objective function, including the integral of time-weighted squared error (ITSE) and overshoot all together, was optimized with the proposed OBASO algorithm to find the best values of the PIDD² controller parameters.

Results:

The performance of the proposed OBASO tuned PIDD² (OBASO-PIDD²) controller is compared to that of the classic ASO tuned PIDD² (ASO-PIDD²) controller as well as the PID, fractional order PID (FOPID) and PIDD² controllers tuned with modern heuristic algorithms. Comparative transient and frequency response analyzes were conducted to assess the stability of the proposed approach. In addition, considering the possible changes in AVR parameters, the robustness of the proposed approach was tested.

Conclusion:

The extensive simulation results and comparisons with other existing controllers show that the proposed OBASO-PIDD² controller with a new objective function has a superior control performance and can highly improve the system robustness with respect to model uncertainties.



Otomatik gerilim regülatör sistemi için karşıt tabanlı atom arama optimizasyon algoritması

Serdar Ekinci^{1*}, Ayşen Demirören², Hatice Lale Zeynelgil², Baran Hekimoğlu³

¹Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 72100 Batı Raman, Batman, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye

³Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 72100 Batı Raman, Batman, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- OBL stratejisi, ASO'nun yakınsamasını iyileştirmek için kullanılır
- PIDD² kontrolörün performansı, PID ve FOPID kontrolörlerden iyidir
- Önerilen yeni metod, etkili ve gürbüzdür

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 30.07.2019
Kabul: 11.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.598576

Anahtar Kelimeler:

Otomatik gerilim regülatörü,
karşıt tabanlı öğrenme,
atom arama optimizasyon
algoritması,
parametre ayarı

ÖZET

Bu makale, arama uzayı keşfini geliştirmek için karşıt tabanlı öğrenmeyi (OBL) kullanan atom arama optimizasyon (ASO) algoritmasının değiştirilmiş bir versiyonunu sunmaktadır. OBL, sezgisel-üstü algoritmaların performansını artırmak için yaygın olarak kullanılan bir makine öğrenme stratejisidir. Yeni bir tasarım metodu olarak sunulan karşıt tabanlı ASO (OBASO) algoritması, otomatik gerilim regülatörü (AVR) sistemindeki oransal-integral-türevsel artı ikinci dereceden türevsel (PIDD²) kontrolör parametrelerinin optimum değerlerinin bulunmasında ilk kez önerilmiştir. Tasarım probleminde, zaman ağırlıklı karesel hatanın integrali (ITSE) ve aşımı birlikte içeren yeni bir amaç fonksiyonu, önerilen OBASO algoritması ile optimize edilerek PIDD² kontrolör parametrelerinin en iyi değerleri bulundu. Önerilen OBASO ayarlı PIDD² (OBASO-PIDD²) kontrolörün performansı, klasik ASO ayarlı PIDD² (ASO-PIDD²) kontrolörün yanı sıra modern sezgisel-üstü algoritmalarla ayarlanan PID, kesir dereceli PID (FOPID) ve PIDD² kontrolörleriyle karşılaştırılmıştır. Önerilen yaklaşımın kararlılığını değerlendirmek için karşılaştırmalı geçici hal ve frekans cevabı analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, AVR parametrelerindeki muhtemel değişimler göz önüne alınarak önerilen yaklaşımın gürbüzlüğü test edilmiştir. Kapsamlı simülasyon sonuçları ve mevcut diğer kontrolörler ile yapılan karşılaştırmalar, yeni bir amaç fonksiyonuna sahip önerilen OBASO-PIDD² kontrolörün üstün bir kontrol performansına sahip olduğunu ve model belirsizliklerine göre sistem gürbüzlüğünü oldukça artırdığını göstermektedir.

An opposition-based atom search optimization algorithm for automatic voltage regulator system

H I G H L I G H T S

- OBL strategy is used to improve the convergence of the ASO
- The performance of PIDD² controller is better than PID and FOPID controllers
- The proposed novel method is efficient and robust

Article Info

Research Article
Received: 30.07.2019
Accepted: 11.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.598576

Keywords:

Automatic voltage regulator,
opposition-based learning,
atom search optimization
algorithm,
parameter tuning

ABSTRACT

This article presents a modified version of atom search optimization (ASO) algorithm that uses the opposition-based learning (OBL) to improve the search space exploration. OBL is a commonly used machine learning strategy for increasing the performance of meta-heuristic algorithms. As a new design method, the opposition-based ASO (OBASO) algorithm was proposed for the first time in determining the optimum values of the proportional-integral-derivative plus second order derivative (PIDD²) controller parameters in an automatic voltage regulator (AVR) system. In the design problem, a new objective function, including the integral of time-weighted squared error (ITSE) and overshoot all together, was optimized with the proposed OBASO algorithm to find the best values of the PIDD² controller parameters. The performance of the proposed OBASO tuned PIDD² (OBASO-PIDD²) controller is compared to that of the classic ASO tuned PIDD² (ASO-PIDD²) controller as well as the PID, fractional order PID (FOPID) and PIDD² controllers tuned with modern meta-heuristic algorithms. Comparative transient and frequency response analyzes were conducted to assess the stability of the proposed approach. In addition, considering the possible changes in AVR parameters, the robustness of the proposed approach was tested. The extensive simulation results and comparisons with other existing controllers show that the proposed OBASO-PIDD² controller with a new objective function has a superior control performance and can highly improve the system robustness with respect to model uncertainties.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: serdar.ekinci@batman.edu.tr, demiroren@itu.edu.tr, zeynelgil@itu.edu.tr, baran.hekimoglu@batman.edu.tr / Tel: +90 553 558 5941

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1.1. Araştırmanın Arka Planı (Research Background)

Senkron jeneratörler, elektrik güç sistemlerinde anma veya nominal gerilim değerlerine göre tasarlanmıştır. Uygulamada, yüklerdeki değişiklikler ve türbin çıkışındaki dalgalanmalar gibi sorunlar, senkron jeneratörlerin çalışma durumlarını etkiler ve böylece senkron jeneratörlerin denge durumu etrafında salınımlı çalışmalarına yol açarlar. Jeneratörlerin uç gerilimleri, bu salınımların hemen sonrasında sabit bir seviyeye getirilemezse bu salınımlar, güç sisteminin dengesine zarar verip güç kalitesini düşürebilirler. Bu sorunu gidermek için jeneratörler sıklıkla otomatik gerilim regülatörü (AVR) ile donatılırlar [1]. Bununla birlikte, AVR sistemi verimsiz salınımlı geçici hal cevabı, maksimum aşım ve sürekli hal hataları gibi sorunlar içerir. AVR sistemi, bir kontrolör ile kapalı çevrim denetimli bir sistem haline getirilerek bu sorunların üstesinden gelinir.

1.2. Literatür Taraması (Literature Survey)

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinden daha iyi dinamik cevap elde edebilmek için kazanç-faz marjı, Cohen-Coon (CC) ve Ziegler-Nichols (ZN) gibi klasik ayarlama yöntemleri ile kontrolör parametrelerinin optimum veya optimuma yakın değerlerin bulunması zor olduğundan son yirmi yıl boyunca kontrolör parametrelerinin ayarı için çeşitli sezgisel-üstü optimizasyon yöntemleri önerilmiştir [2, 3]. AVR sisteminin dinamik cevabını geliştirmek için incelenmiş kontrolör türleri oransal-integral-türevsel (PID), kesir dereceli PID (FOPID) ve PID artı ikinci dereceden türevseldir (PIDD²). Literatürde, belirtilen bu kontrolör türlerinin performansını iyileştirmek için uygulanan sezgisel-üstü optimizasyon tabanlı ayarlama yöntemleri ise yapay arı kolonisi (ABC) [4], kaotik karınca sürüsü (CAS) [5], yerel tek-modlu örnekleme (LUS) [6], parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) [7], çok amaçlı ekstremal optimizasyon (MOEO) [8], biyo-coğrafya tabanlı optimizasyon (BBO) [9], öğretim-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) [10], yerçekimsel arama algoritması (GSA) [11], armoni arama algoritması (HSA) [12], benzetilmiş tavlama (SA) algoritması [13], karınca aslanı optimizasyonu (ALO) [14], guguk kuşu arama (CS) algoritması [15, 16], salp sürüsü algoritması (SSA) [17], stokastik fraktal arama (SFS) algoritması [18], çekirge optimizasyon algoritması (GOA) [19], simbiyotik organizmalar arama (SOS) algoritması [20], Jaya algoritması (JA) [21], sinüs kosinüs algoritması (SCA) [1], su dalgası optimizasyonu (WWO) [22] ve geliştirilmiş böbrek-ilhamlı algoritmadır (IKA) [23]. Tablo 1, son on yılda AVR sistemi için kullanılan ayarlama yöntemlerinin kısa ve öz bir literatür taramasını vermektedir.

1.3. Çalışmanın Motivasyonu (Motivation of the Present Study)

Tablo 1'deki literatür araştırmasında görüleceği gibi, AVR sisteminde en çok tercih edilen kontrolör türü PID

kontrolördür. Ancak, PID kontrolör, sistemin dinamik performansını FOPID ve PIDD² kontrolörler kadar arttıramaz [7, 16]. FOPID kontrolör, PID kontrolörün geliştirilmiş halidir, öyle ki türev ve integral dereceleri tamsayı değildir [5]. Geleneksel PID kontrolör ile karşılaştırıldığında, FOPID kontrolör iyi bir kontrol performansı sağlayabilir ve model belirsizliklerine karşı sistemin gürbüzüğünü artırabilir [7]. Bununla birlikte, türev alıcı ve integral alıcı terimlerin kesir dereceli olmaları nedeniyle, FOPID kontrolörün uygulanması, kontrol algoritmasının hesaplama yükünü ve hafıza boyutunu etkileyen yüksek dereceden ayrık zaman kontrolörleri ile gerçekleştirilir. Bu nedenle, kontrolörün derecesini azaltmak için çeşitli yaklaşık yöntemler önerilmiştir. Ancak, FOPID kontrolörün uzun bellek prensibi adı verilen özelliği bu yaklaşıklardan sonra korunamayacaktır. Yaklaşıklardan sonra kaybedilen bir diğer özellik de kontrolörün en iyileştirme yeteneğidir [7]. PID ve FOPID kontrolörlerin bu eksiklerini göz önüne alarak, AVR sisteminin kararlılık performansının iyileştirilmesi için PIDD² kontrolörünün seçilmesi daha uygundur ve bu çalışmada buna dikkat edilmiştir.

Bununla birlikte, seçilen amaç fonksiyonu da AVR sisteminin performansını önemli ölçüde etkiler. Tablo 1'den anlaşılacağı üzere, literatürde yaygın olan amaç fonksiyonları zaman ağırlıklı karesel hatanın integrali (ITSE), zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE) ve Zwe-Lee Gaing tarafından önerilen ZLG [3]'dir. Bu amaç fonksiyonlarından ITSE, AVR çalışmalarında çokça tercih edilmektedir. ITSE, sistemin özellikle yerleşme zamanı ve yükselme zamanı kriterlerini epeyce iyileştirmesine rağmen, yüksek aşımlara sebebiyet vermektedir. Tabloda ITSE amaç fonksiyonunu kullanan tüm çalışmalar bunu açıkça doğrulamaktadır. ITSE ve aşımın bir ağırlık faktörü ile dengelendiği yeni ve basit bir amaç fonksiyonu sayesinde bu problemin üstesinden gelinir.

Tabloda verilen tüm çalışmalarda amaç; maksimum yüzdellik aşım, yerleşme zamanı, yükselme zamanı ve sürekli hal hatası gibi geçici hal cevabı ölçütlerini azaltarak sistemin tepkisini iyileştirmektir. Bunu başarmak için, kontrolör kazançlarının en iyi değerlerini elde etmek esastır. Bununla birlikte, AVR sisteminin performansını iyileştirmek için önerilen algoritmalar, eksikliklerinden dolayı kontrolörün optimum kazançlarını bulamazlar. Örneğin, PSO ve ABC birçok optimizasyon problemini çözme konusunda büyük potansiyele sahip olsalar da hafıza kapasitesi ve hesaplama yükü bakımından sorunludurlar. Diğer optimizasyon yaklaşımlarıyla daha iyi sonuçlar alınabilir. Ancak, bu algoritmaların yerel minimumda durgunluk, erken yakınsama, kontrol parametrelerinin seçimindeki zorluk ve çalışılan sistemin büyüklüğüne bağlı olarak artan hesaplama süresi gibi sakıncaları vardır [24, 25]. Dahası, tablodaki çalışmalardan görüleceği üzere, mevcut sezgisel-üstü ayarlama tekniklerinin AVR sistemindeki kontrolör tasarımında önemli katkıları olmasına rağmen en iyi tasarımı yapabilen kesin bir algoritma bulunmamaktadır. Yine de yeni çıkan algoritmaların performanslarının AVR sistemi

Tablo 1. Literatürde, AVR sistemi için kullanılmış olan ayarlama yöntemleri
(The tuning methods used for AVR system in literature)

Referans	Yıl	Optimizasyon teknikği	Kontrolör yapıları			Amaç fonksiyonları			Yürütülen analizler			
			PID	FOPID	PIDD ²	ITSE	ITAE	ZLG	Diğer	Geçici hal cevabı	Frekans cevabı	Gürbüzlük
[4]	2011	ABC	•			•				•	•	•
[5]	2012	CAS		•				•		•		•
[6]	2014	LUS	•						•	•	•	•
[7]	2015	PSO			•		•			•	•	•
[8]	2015	MOEO		•					•	•		•
[9]	2016	BBO	•			•				•	•	•
[10]	2016	TLBO	•					•		•		•
[11]	2016	GSA	•			•	•	•	•	•		•
[12]	2016	HSA			•				•	•		•
[13]	2017	SA		•					•	•		•
[14]	2018	ALO	•			•	•		•	•	•	•
[15]	2018	CS	•						•	•	•	•
[16]	2018	CS		•				•		•		•
[17]	2018	SSA	•			•				•		•
[18]	2018	SFS	•			•				•	•	•
[19]	2018	GOA	•			•				•		•
[20]	2018	SOS	•						•	•	•	•
[21]	2018	JA	•					•		•		•
[1]	2019	SCA	•					•		•	•	•
[22]	2019	WWO	•					•		•		•
[23]	2019	IKA	•						•	•	•	•

üzerinde test edilmesi ve önceki çalışmalarla çeşitli analizler yoluyla karşılaştırılması araştırmacılar açısından oldukça ilgi çekicidir. Sezgisel-üstü algoritmalar mükemmel değildir çünkü bazılarının, doğruluklarını ve performanslarını etkileyen birkaç sorunu vardır. Bu durumlardan kaçınmak için 2005 yılında Tizhoosh tarafından karşıt tabanlı öğrenme (OBL) tanıtılmıştır [26]. OBL, aday bir çözümün karşıt konumunu oluşturmak için kullanılır. Bu işlem, arama alanının aynı anda iki yönlü keşfedilmesine izin verir. Amaç fonksiyonu değerleri göz önüne alındığında, OBL, aday çözümler ile karşıt çözümler tarafından konforlu hale getirilmiş bir kümeden en iyi elemanları seçer. OBL kuralı, sezgisel-üstü algoritmaların başlangıcında veya bir çözümün değiştirildiği herhangi bir kısmında kullanılabilir. OBL kullanılarak standart versiyonlardan daha iyi sonuçlar veren farklı sezgisel-üstü algoritmalar iyileştirilmişlerdir. Bu iyileştirilmelere örnek olarak, OBL'nin SCA'nın yakınsama hızını arttırmaya yardımcı olduğu karşıt tabanlı sinüs kosinüs algoritması (OBSCA) [27] verilebilir. Bu arada, [28] ve [29]'da OBL, sırasıyla, güneş hücreleri diyot modellerinin parametre tahmini ve özellik seçimi için kullanılmıştır. OBL kombinasyonu mühendislik uygulamaları için de genişletilmiş, [30]'da ekonomik yük dağıtım problemi,

karşıt tabanlı gri kurt optimizasyonu (OBGWO) ile incelenmiştir. Ayrıca, karşıt tabanlı yusufoçuk algoritması (OBDA) son zamanlarda mühendislik problemleri için alternatif bir yaklaşım olarak tanıtılmıştır [31]. Tüm bu çalışmalar, OBL'nin optimizasyon problemlerinde daha iyi sonuçlar elde etmek için yararlanılacak ilginç bir mekanizma olduğunu göstermektedir.

2019'da temel moleküler dinamiklerden ilham alan, atom arama optimizasyonu (ASO) algoritması adlı güçlü ve yeni ortaya çıkan bir sezgisel-üstü evrimsel optimizasyon tekniği Zhao vd. tarafından tanıtılmıştır [32]. Yeni olması açısından ASO algoritması yalnızca iki mühendislik alanına başarıyla uygulanmıştır [33, 34]. Ancak, yazarların bildiği kadarıyla, ASO bugüne kadar herhangi bir güç sistemi optimizasyon problemine uygulanmamıştır. Mevcut çalışmanın yazarlarını bu algoritmayı kullanmaya iten unsur da budur. Her ne kadar temel ASO algoritması basit ve kolay uygulanabilir bir algoritma olsa da yavaş yakınsama hızı ve çoğu sezgisel-üstü algoritmada ortak olan yerel minimum durgunluğu gibi iki önemli sakıncası vardır. Bu nedenle, yakınsama hızını ve çözüm kalitesini iyileştirmek için OBL, temel ASO algoritmasına entegre edilmiştir. Bu makale, ASO'nun

OBL'li geliştirilmiş bir versiyonunu (OBASO olarak adlandırıldı), AVR sisteminin PIDD² kontrolörü için yeni bir tasarım tekniği olarak önermektedir.

1.4. Bu Çalışmanın Katkıları (Contribution of Present Study)

Bu çalışmanın literatüre özgün katkıları aşağıdaki maddelerle özetlenebilir:

- OBL tabanlı ASO (OBASO) algoritması ilk kez önerildi.
- Önerilen OBASO algoritması çok bilinen 6 test fonksiyonunun optimizasyon problemlerine uygulandı ve elde edilen sonuçlar ASO ile birlikte diğer algoritmalarla karşılaştırıldı.
- ASO ve önerilen OBASO algoritmaları yüksek dereceli AVR sistemi için PIDD² kontrolör tasarımında ilk kez kullanıldı. Bu, ASO ve OBASO algoritmalarının güç sistemlerindeki ilk uygulamasıdır.
- OBASO ayarlı PIDD² (OBASO-PIDD²) kontrolör ile birlikte yeni ve etkili bir amaç fonksiyonunun kullanılması önerildi ve bu yolla AVR sisteminin dinamik performansı en üst seviyeye çıkarıldı.
- AVR sistemini optimize etmek için tasarlanan OBASO-PIDD² kontrolörün etkinliği, istatistiksel ölçütler ve yakınsama profili açısından doğrulandı.
- PSO-PIDD² [7], CS-FOPID [16] ve SCA-PID [1] kontrolörler, kullandıkları amaç fonksiyonları, algoritmalar ve kontrolör yapıları bakımından birbirinden farklı olan literatürdeki en güncel ve en iyi kontrolör kazanç değerlerini bulmuş olan yaklaşımlardır. Önerilen OBASO-PIDD² yaklaşımının performansı ASO-PIDD² kontrolör de dâhil olmak üzere PSO-PIDD² [7], CS-FOPID [16] ve SCA-PID [1] kontrolörleri ile çeşitli analizler yoluyla ayrıntılı olarak kıyaslandı.
- Karşılaştırmalı geçici hal cevap analizi, frekans cevabı analizi ve gürbüzlük analizi sonuçları ile önerilen karşıt tabanlı yaklaşımın etkinliği ve diğer algoritmalara olan üstünlüğü açıkça doğrulandı.

2. ASO TABANLI OPTİMİZASYON (ASO BASED OPTIMIZATION)

ASO, küresel optimizasyon problemleri için etkili bir arama mekanizması tasarlamak üzere etkileşim ve kısıtlama kuvvetleri tarafından kontrol edilen atomik hareketi taklit eden, fizikten ilham alan, popülasyon tabanlı bir sezgisel-üstü algoritmadır [32]. Bu algoritmaya göre, d . boyuttaki i . atoma etki eden dinamik olarak değişen komşu atomların uyguladığı itme ve çekme kuvvetlerinin vektörel toplamı olan toplam etkileşim kuvvetleri Eş. 1'deki gibi verilmiştir [32]:

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in Kbest} rand_j F_{ij}^d(t) \quad (1)$$

burada $rand_j$ [0,1] aralığında rastgele bir sayıyı ve $Kbest$ en iyi uygunluk fonksiyonu değerlerine sahip ilk K sayıda atomdan oluşan atom popülasyonunun bir alt kümesidir. ASO'nun iterasyonların başlarında daha fazla keşif

yapmasını sağlamak için her bir atomun, K komşu atomları olarak daha iyi uygunluk fonksiyonu değerlerine sahip birçok atomla etkileşime girmesi gerekir. Algoritmanın son iterasyonlarında daha fazla sömürü yapmasını sağlamak için ise her bir atomun daha iyi uygunluk fonksiyonu değerlerine sahip az sayıda atomla etkileşime girmesi gerekir. Bu nedenle, K değeri Eş. 2'deki gibi iterasyonlar boyunca kademeli olarak azaltılır [33]:

$$K(t) = N - (N - 2) \times \sqrt{\frac{t}{T}} \quad (2)$$

burada N atomik bir sistemdeki toplam atom sayısı, t şimdiki iterasyon ve T maksimum iterasyon sayısıdır. Eş. 1'deki F_{ij}^d , d . boyuttaki j . en iyi atomun i . atom üzerine uyguladığı etkileşim kuvvetidir. Etkileşim kuvveti, Lennard-Jones (L-J) potansiyelinin gradyanıdır ve bu modelin, optimizasyon problemlerinin üstesinden gelebilmek için pozitif çekim ve negatif itme kuvvetlerine sahip olacak şekilde değiştirilmiş hali Eş. 3'de verilmiştir [32]:

$$F_{ij}^d = -\eta(t) \left[2 \left(h_{ij}(t) \right)^{-13} - \left(h_{ij}(t) \right)^{-7} \right] \vec{r}_{ij} \quad (3)$$

burada $\eta(t)$ itme ve çekim bölgelerinin ayarında kullanılan derinlik fonksiyonudur ve $h_{ij}(t) = r_{ij}/\sigma(t)$ iki atom arasındaki mesafenin uzunluk ölçeğine oranıdır; öyle ki, bu makalede, iki atom arasındaki ölçeklenmiş mesafe olarak adlandırılmıştır. $\vec{r}_{ij} = \vec{x}_j - \vec{x}_i$ konum fark vektörünü gösterir ki burada $\vec{x}_j = (x_{j1}, x_{j2}, x_{j3})$ j . atomun konum vektörü, $\vec{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$ ise i . atomun konum vektörüdür. Eş. 3'teki derinlik fonksiyonu Eş. 4'deki gibi tanımlanmıştır [32, 33]:

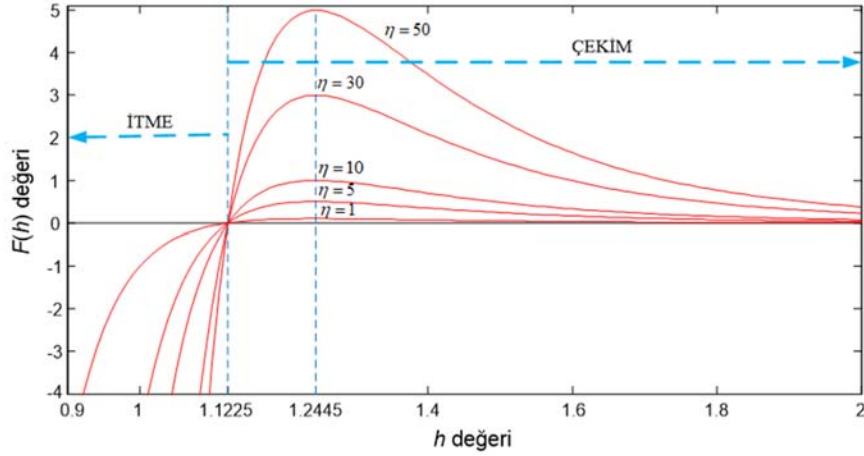
$$\eta(t) = \alpha \left(1 - \frac{t-1}{T} \right)^3 e^{-\frac{20t}{T}} \quad (4)$$

burada α derinlik ağırlığıdır ve bu makalede 50 seçilmiştir. Etkileşim kuvveti fonksiyonunun farklı derinlik değerleri ($\eta = 1, 5, 10, 30$ ve 50) için 0,9 ila 2 arasında değişen ölçeklenmiş uzunluğa (h) göre değişimi Şekil 1'de gösterilmiştir.

İki atom arasındaki ölçeklenen mesafe Eş. 5'deki gibi verilmiştir [32]:

$$h_{ij}(t) = \begin{cases} h_{\min}; & \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)} < h_{\min} \text{ ise} \\ \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)}; & h_{\min} \leq \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)} \leq h_{\max} \text{ ise} \\ h_{\max}; & \frac{r_{ij}(t)}{\sigma(t)} > h_{\max} \text{ ise} \end{cases} \quad (5)$$

burada h_{\min} ve h_{\max} ölçeklenmiş mesafenin, sırasıyla, alt ve üst sınırlarını temsil eder ve Eş. 6'daki gibi tanımlanır:



Şekil 1. Değiştirilmiş etkileşim kuvveti fonksiyonunun farklı derinlik değerleri için ölçeklenmiş uzunluğa (h) göre değişimi [32] (The revised interaction force function versus the scaled distance (h) with different depth values [32])

$$h_{\min} = g_0 + g(t); \quad h_{\max} = u \quad (6)$$

burada g_0 en alt sınır değeridir ve 1,1'dir, u en üst sınır değeridir ve 1,24'tür ve $g(t)$ algoritmaya keşif aşamasından sömürü aşamasına geçme yeteneği kazandıran sürüklenme faktörüdür ve Eş. 7'deki gibi verilmiştir:

$$g(t) = 0,1 \times \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{t}{T}\right) \quad (7)$$

Eş. 5'teki $\sigma(t)$ çarpışma yarıçapını temsil eden uzunluk ölçөгünü gösterir ve Eş. 8'deki gibi tanımlanır [32]:

$$\sigma(t) = \left\| x_{ij}(t), \frac{\sum_{j \in K_{best}} x_{ij}(t)}{K(t)} \right\|_2 \quad (8)$$

ASO'daki her bir atomun, en iyi atomla bir kovalent bağa sahip olduğunu varsayarak, her bir atom ile en iyi atom arasındaki ağırlıklı konum farkına denk olan geometrik kısıtlama kuvveti Eş. 9'daki gibi verilebilir [32]:

$$G_i^d(t) = \lambda(t) (x_{best}^d(t) - x_i^d(t)) \quad (9)$$

burada $x_{best}^d(t)$ d . boyuttaki en iyi atomun konumudur ve $\lambda(t)$ Langrajyan çarpanıdır ve Eş. 10'daki gibi tanımlanmıştır [32]:

$$\lambda(t) = \beta e^{-\frac{20t}{T}} \quad (10)$$

burada β çarpan ağırlığıdır ve bu makalede 0,2'dir. Sırasıyla, L-J potansiyelinden ve bağ uzunluğu potansiyelinden kaynaklanan etkileşim kuvvetini ve kısıtlama kuvvetini tanımlandıktan sonra, d . boyuttaki i . atomun t iterasyonundaki ivmesi Eş. 11'deki gibi hesaplanabilir [32, 33]:

$$a_i^d(t) = -\alpha \left(1 - \frac{t-1}{T}\right)^3 e^{-\frac{20t}{T}} \sum_{j \in K_{best}} \frac{rand_j \left[2(h_{ij}(t))^{-13} - (h_{ij}(t))^{-7}\right]}{m_i(t)} \frac{(x_j^d(t) - x_i^d(t))}{\|\vec{x}_i(t), \vec{x}_j(t)\|_2} + \beta e^{-\frac{20t}{T}} \frac{(x_{best}^d(t) - x_i^d(t))}{m_i(t)} \quad (11)$$

burada $m_i(t)$ i . atomun t iterasyonundaki kütesidir ve atomun uygunluk fonksiyonu değeriyle Eş. 12, Eş. 13'deki gibi hesaplanır [32]:

$$M_i(t) = e^{\frac{Fit_i(t) - Fit_{best}(t)}{Fit_{worst}(t) - Fit_{best}(t)}} \quad (12)$$

$$m_i(t) = \frac{M_i(t)}{\sum_{j=1}^N M_j(t)} \quad (13)$$

burada $Fit_i(t)$ i . atomun t iterasyonundaki uygunluk fonksiyonu değeri, $Fit_{best}(t)$ ve $Fit_{worst}(t)$, sırasıyla, t iterasyonundaki en iyi atom ile en kötü atomun uygunluk fonksiyonu değerleridir ve Eş. 14'deki gibi tanımlanır:

$$Fit_{best}(t) = \min_{i \in \{1,2,\dots,N\}} Fit_i(t); \quad Fit_{worst}(t) = \max_{i \in \{1,2,\dots,N\}} Fit_i(t) \quad (14)$$

Son olarak, i . atomun $(t+1)$ iterasyonundaki konum ve hız güncelleme ifadeleri Eş. 15, Eş.16'daki gibi tanımlanır [32]:

$$v_i^d(t+1) = rand_i^d \cdot v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (15)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (16)$$

3. ÖNERİLEN ALGORİTMA (PROPOSED ALGORITHM)

Bu bölümde, temel ASO'nun performansını artıran önerilen algoritma tanıtılacaktır. Temel ASO, yerel en iyi çözümde sıkışıp kalma ve yavaş yakınsama gibi bazı sakıncalara sahiptir. Bu sakıncalar, bazı çözümlerin bulunan yerel en iyi çözüme doğru güncellenmesinden ve aynı zamanda bu çözümden uzak bazı daha iyi çözümlerin bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, önerilen algoritma, karşıt yönlü çözümleri de dikkate alarak bu sakıncaları önler. Ayrıca, OBASO, ASO'nun standart versiyonunun arama yeteneklerini OBL ile birleştirerek arama alanının keşif etkinliğini artırır. Benzer algoritmalara kıyasla, önerilen yaklaşım ayarlanacak daha az parametreye sahiptir, bunun yanında OBL'nin dahil edilmesi ASO konfigürasyonunu etkilemez, aksine en iyi çözümün doğruluğunu artırır. Bu şekilde, OBASO, arama alanını daha geniş bir şekilde keşfedebildiği için, optimum çözüme yakınsamayla iyileştirmek için gereken başlangıç popülasyonunun boyutunu da azaltmak mümkündür.

Önerilen algoritma ASO'yu iki aşamada iyileştirir. İlk olarak, OBL, yakınsama hızını arttırmak ve tüm arama alanındaki çözümleri arayarak yerel en iyi çözümde sıkışıp kalmamak için popülasyonun başlatılmasında kullanılır. İkincisi, OBL, popülasyon çözümünün güncelleme aşamasında ve karşıt yönde güncellenen çözümün şimdiki güncel çözümden daha iyi olup olmadığını kontrol etmek için de kullanılır. Her iki aşama, aşağıdaki alt bölümlerde açıklanmıştır.

3.1. Başlangıç Aşaması (Initialization Stage)

Önerilen yöntem, N büyüklüğünde rastgele bir X popülasyonunun üretilmesiyle başlar, öyle ki başlangıç çözümüne ait konum vektörü $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$, $i = 1, 2, \dots, N$ ile ifade edilir. Daha sonra OBL, her bir çözüm için karşıt çözümün hesaplanmasında kullanılır, ardından karşıt \bar{X} popülasyonu üretilir. Her iki popülasyona (X ve \bar{X}

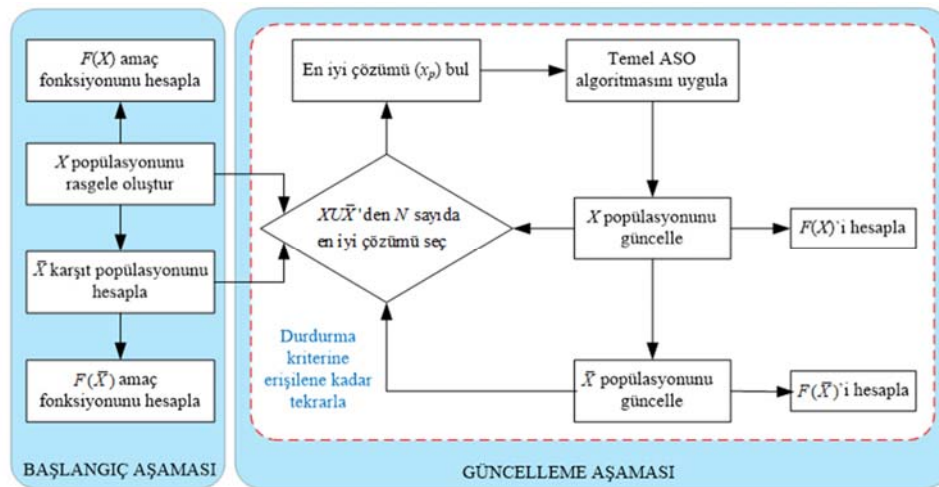
'ye) dayanarak, en iyi N sayıda çözüm seçilir. Bu aşamadaki adımlar aşağıdaki gibidir:

- X popülasyonunun çözümlerini rastgele başlat.
- \bar{X} karşıt popülasyonu aşağıdaki gibi hesapla:
- $\bar{x}_{ij} = u_i + l_i - x_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, N$ ve $j = 1, 2, \dots, n$
- burada l ve u sırasıyla, araştırma uzayının alt ve üst sınırlarıdır, x_{ij} ve \bar{x}_{ij} , sırasıyla, X popülasyonuna ait j . çözümün i . noktasını ve bunlara karşılık gelen karşıt \bar{X} popülasyonunu temsil eder.
- Yeni bir popülasyon oluşturmak için iki popülasyonun birleşiminden ($X \cup \bar{X}$) en iyi N sayıda çözümü seç.

3.2. Güncelleme Aşaması (Updating Stage)

Yeni bir popülasyon oluşturan en iyi N çözümünün seçilmesinden sonra (ilk aşamadan itibaren) en iyi çözüm x_p belirlenir. X popülasyonundaki çözümler ASO kullanılarak güncellenir ve uygunluk fonksiyonları hesaplanır, ayrıca karşıt popülasyon \bar{X} 'de OBL'ye göre hesaplanır ve her bir \bar{x} için uygunluk fonksiyonu hesaplanır. OBASO algoritmasındaki bir sonraki adım, uygunluk fonksiyonlarına göre birleşim kümesinden ($X \cup \bar{X}$) en iyi N sayıda çözümü seçmektir. Anlatılan tüm bu adımlar durdurma koşulları sağlanıncaya kadar tekrar edilir. Önerilen OBASO algoritması Şekil 2'de gösterilmektedir.

Önerilen OBASO algoritmasının performansını doğrulamak için en iyi bilinen altı test fonksiyonu ele alınmıştır. Bu test fonksiyonlarının tanımları Tablo 2'de özetlenmiştir. Bu fonksiyonların ayrıntılı bilgileri [35]'te bulunabilir. Literatürde bulunan SA [32], PSO [32], GSA [32], GA [32] ve ASO [32] gibi diğer algoritmalarla uygun bir karşılaştırma yapabilmek için önerilen OBASO algoritması 50 kez koşturuldu ve popülasyon büyüklüğü ile maksimum iterasyon sayısı, sırasıyla 50 ve 1000 olarak seçildi. İlgili test fonksiyonları için elde edilen istatistiksel sonuçlar (ortalama,



Şekil 2. Önerilen OBASO algoritması (The proposed OBASO algorithm)

standart sapma ve bulunan en iyi çözümlerin minimumları) Tablo 3’te verilmiştir. En iyi sonuçlar kalın yazı fontu ile vurgulanmıştır. Tablo 3’teki sonuçlardan görülebileceği gibi, en iyi sonuçlar, esas ASO algoritmasına ve diğer algoritmalara kıyasla önerilen OBASO algoritmasıyla bulunmuştur. OBASO’nun test fonksiyonlarını çözmedeki bu üstün başarısını göz önüne alarak, bu çalışmada önerilen algoritmanın gerçek mühendislik problemlerine karşılaştırılması uygulanması yapılacaktır.

4. AVR SİSTEM MODELİNİN DETAYLARI (DETAILS OF AVR SYSTEM MODEL)

Şekil 3, basit bir AVR sisteminin tipik düzenlemesini göstermektedir. Şekildeki bir AVR sistemi dört bileşenden oluşmaktadır: kuvvetlendirici, uyarma, jeneratör ve algılayıcı [36]. Burada, kolaylık sağlamak için, sistemin ana zaman sabiti dikkate alınarak ve doyma veya diğer doğrusal olmayan durumlar göz ardı edilerek doğrusal hale getirilmiş

Tablo 2. Çeşitli test fonksiyonları (Various benchmark functions)

Fonksiyon adı	Fonksiyon tanımı	Boyutu (d)	Aralığı	F _{min}
Sphere	$F_1(x) = \sum_{i=1}^d x_i^2$	30	[-100; 100]	0
Rosenbrock	$F_2(x) = \sum_{i=1}^{d-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	30	[-30; 30]	0
Step	$F_3(x) = \sum_{i=1}^d (x_i + 0,5)^2$	30	[-100; 100]	0
Rastrigin	$F_4(x) = \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	30	[-5,12; 5,12]	0
Ackley	$F_5(x) = -20 \exp\left(-0,2 \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d (\cos 2\pi x_i)\right) + 20 + e$	30	[-32; 32]	0
Griewank	$F_6(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^d x_i^2 - \prod_{i=1}^d \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	[-600; 600]	0

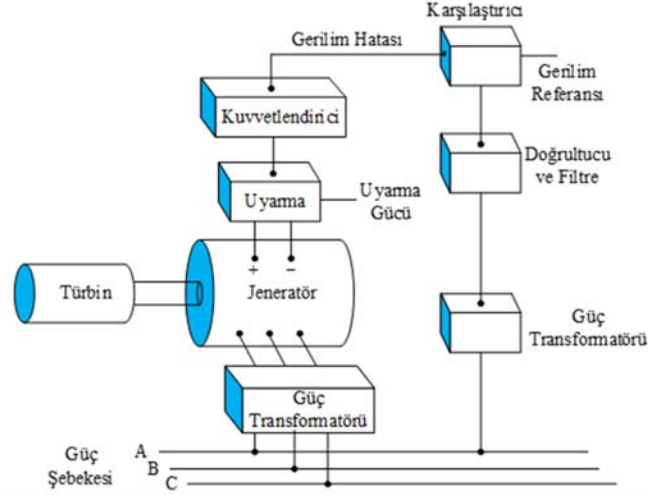
Tablo 3. Çeşitli test fonksiyonları için karşılaştırma sonuçları (Comparison of results for various benchmark functions)

Test Fonksiyonu	İndeks	SA [32]	PSO [32]	GSA [32]	GA [32]	ASO [32]	OBASO (önerilen)
$F_1(x)$	Ortalama	2,04E-13	0,000146	2,11E-17	0,010212	2,68E-21	4,94E-24
	Standart Sapma	6,14E-14	0,000119	6,67E-18	0,005073	3,65E-21	9,88E-24
	En iyi	7,76E-14	9,56E-06	1,06E-17	0,002975	3,52E-22	0
$F_2(x)$	Ortalama	1059,101	134,3922	28,1473	97,11795	24,8388	0,8992
	Standart Sapma	2050,492	128,5852	11,29836	128,7488	0,515853	1,2725
	En iyi	23,1826	26,23857	25,75286	9,696092	16,58185	0,56E-03
$F_3(x)$	Ortalama	0,566667	0,133333	0	0	0	0
	Standart Sapma	0,727932	0,345746	0	0	0	0
	En iyi	0	0	0	0	0	0
$F_4(x)$	Ortalama	54,39099	29,31833	15,05704	12,52966	0	0
	Standart Sapma	13,82194	6,879953	4,439862	2,915823	0	0
	En iyi	26,86388	17,34745	7,959667	6,094298	0	0
$F_5(x)$	Ortalama	0,343794	0,007432	3,69E-09	0,021188	3,00E-11	5,61E-12
	Standart Sapma	0,447427	0,014159	3,96E-10	0,004548	2,15E-11	6,82E-12
	En iyi	8,29E-08	0,000549	2,96E-09	0,010696	1,13E-11	0
$F_6(x)$	Ortalama	0,012439	0,022795	4,472721	0,018359	0	0
	Standart Sapma	0,010314	0,02737	2,048563	0,009772	0	0
	En iyi	3,16E-06	5,88E-05	1,944629	0,006121	0	0

bir modeli ele alınmıştır. Bu dört bileşene ilişkin transfer fonksiyonları, parametre aralıkları ve seçilen değerler Tablo 4'te verilmiştir. Tabloda verilen değerler kullanıldığında kontrolsüz AVR sisteminin transfer fonksiyonu Eş. 17'de verildiği gibidir.

$$G_{AVR}(s) = \frac{\Delta V_t(s)}{\Delta V_{ref}(s)} = \frac{0.1s + 10}{0.0004s^4 + 0.0454s^3 + 0.555s^2 + 1.51s + 11} \quad (17)$$

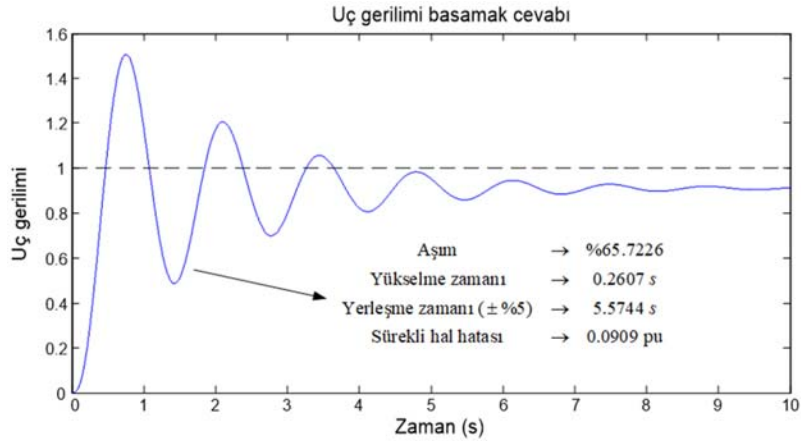
Eş. 17 kullanılarak AVR sisteminin uç gerilimi basamak cevabı Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilden, kararlı olmasına rağmen, uç gerilimi basamak cevabının oldukça salınımlı ve sürekli hal hatasına sahip olduğu açıktır. Sistem, $s = -99,971$ ve $s = -12,489$ 'da iki gerçek kutba ve $s = -0,5198 \pm 4,6642i$ 'de iki karmaşık kutba ve 0,111 değerinde bir sönüm oranına sahiptir. Sistemin yükselme zamanı 0,2607 s, tepe zamanı 0,7522 s, yerleşme zamanı 5,5744 s (sürekli hal değerinin %5'lik bandında), yüzdelik aşımı %65,7226 ve sürekli hal değeri 0,909 pu'dur, öyle ki bu sistemin 0,091



Şekil 3. Bir AVR sisteminin şematik diyagramı (Schematic diagram of an AVR system)

Tablo 4. AVR sistemine ilişkin bilgiler (Parameters of AVR system)

Bileşen	Transfer fonksiyonu	Parametre aralığı	Seçilen değerler
Kuvvetlendirici	$G_a(s) = \frac{K_a}{1 + sT_a}$	$10 \leq K_a \leq 40$ $0,02 \leq T_a \leq 0,1$	$K_a = 10$ $T_a = 0,1$
Uyarma	$G_e(s) = \frac{K_e}{1 + sT_e}$	$1 \leq K_e \leq 10$ $0,4 \leq T_e \leq 1,0$	$K_e = 1$ $T_e = 0,4$
Jeneratör	$G_g(s) = \frac{K_g}{1 + sT_g}$	$0,7 \leq K_g \leq 1$ $1,0 \leq T_g \leq 2,0$	$K_g = 1$ $T_g = 1$
Algılayıcı	$H_s(s) = \frac{K_s}{1 + sT_s}$	$0,9 \leq K_s \leq 1,1$ $0,001 \leq T_s \leq 0,06$	$K_s = 1$ $T_s = 0,01$



Şekil 4. Kontrolör yokluğunda AVR sisteminin çıkış gerilimi basamak cevabı (Output voltage step response of AVR system in the absence of controller)

pu'luk bir sürekli hal hatasına sahip olduğu anlamına gelir. Güç sistemlerinde, böyle bir cevap kabul edilemez ve çalışma gerilimlerinin kilo-volt mertebelerinde olduğu düşünüldüğünde ortaya çıkmasına izin verilemez. AVR sisteminin geçici hal cevabını iyileştirmek ve sürekli hal hatasını ortadan kaldırmak için, ilgili sistemin PID, FOPID ve PIDD² gibi bir kontrolör ile donatılması gerekir.

5. PIDD² KONTROLÖRLÜ AVR SİSTEMİNİN ANALİZİ (ANALYSIS OF THE AVR SYSTEM WITH PIDD² CONTROLLER)

PIDD² kontrolörün transfer fonksiyonu [7] ve [37] nolu kaynaklarda verilmiştir (Eş. 18):

$$C_{PIDD^2}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_{dd} s^2 \quad (18)$$

burada K_p , K_i , K_d ve K_{dd} sırasıyla oransal, integral, türevsel ve ikinci dereceden türevsel kazançlardır. PIDD² kontrolörün geleneksel PID kontrolörden farkı fazladan K_{dd} kazanç parametresine sahip olmasıdır. PIDD² kontrolörlü AVR sisteminin blok şeması Şekil 5'te gösterilmiştir. PIDD² kontrolörlü bir AVR sisteminin transfer fonksiyonu Eş. 19'aki hale gelir:

$$G_{AVR_PIDD^2} = \frac{0,1K_{dd}s^4 + (0,1K_d + 10K_{dd})s^3 + (10K_d + 0,1K_p)s^2 + (0,1K_i + 10K_p)s + 10K_i}{0,0004s^5 + 0,0454s^4 + (10K_{dd} + 0,555)s^3 + (10K_d + 1,51)s^2 + (10K_p + 1)s + 10K_i} \quad (19)$$

6. MATEMATİKSEL PROBLEM TANIMI VE ÖNERİLEN YAKLAŞIM (MATHEMATICAL DEFINITION OF THE PROBLEM AND THE PROPOSED APPROACH)

AVR sisteminde kontrolör tasarımı yapılırken literatürdeki önemli eksiklikleri giderebilmek için üç temel gaye gözetlenmiştir. İlk, yaygın kullanılan PID ve FOPID tipi kontrolörler yerine PIDD² kontrolör tercih edilmiştir. İkinci gaye olarak, PIDD² kontrolör parametrelerinin (K_p , K_i , K_d , K_{dd}) ayarı için klasik ASO algoritmasının keşif/sömürü açısından geliştirilmiş versiyonu olan OBASO algoritması önerilmiştir. Üçüncü gaye olarak, önerilen özgün ve etkili bir

amaç fonksiyonu sayesinde sistemin aşısız ve hızla kararlı yapıya ulaşması sağlanmıştır. Bu üç temel gayeye dayalı yaklaşımla tasarlanan kontrolör, AVR sisteminin dinamik cevabını literatürdeki tüm yaklaşımlara kıyasla en iyi şekilde iyileştirir.

6.1. Önerilen Amaç Fonksiyonu ve Problemin Sınırları (The Proposed Objective Function and Limits of the Problem)

ITSE, AVR sisteminin geçici hal cevabını iyileştirmesine rağmen sistemde istenmeyen yüksek aşımara neden olabilmektedir [23]. Bu eksikliğin üstesinden gelebilmek için yeni ve etkili bir amaç fonksiyonu Eş. 20'deki gibi önerilmiştir:

$$J_{\text{önerilen}} = ITSE + \alpha \cdot M_p \quad (20)$$

Bu eşitlikte, α ağırlık faktörünü ve M_p ise aşımı ifade etmektedir. Tek değişkenli ağırlık faktörü sayesinde AVR sisteminde yüksek aşımalar engellenir. Yinelemeli simülasyon analizlerinde α değişkeninin 0,02–0,1 arasında olduğu görülmüştür ve en uygun değerinin 0,05 olduğu saptanmıştır. PIDD² kontrolör parametrelerinin alt/üst sınırları, optimizasyon probleminin sınırlarını göstermektedir ve Eş. 21'de verilmiştir [7]:

$$0,0001 \leq K_p, K_i, K_d, K_{dd} \leq 3 \quad (21)$$

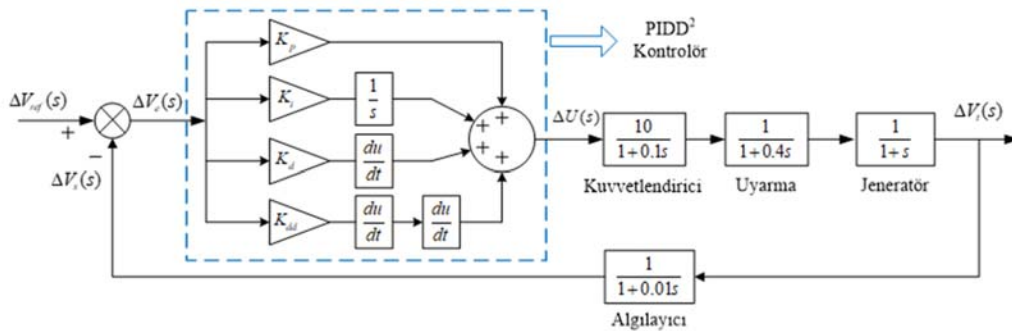
Bu parametrelerin en iyi değerlerinin belirlenmesinde önerilen OBASO algoritması kullanılacaktır.

6.2. Önerilen OBASO-PIDD² Kontrolörün AVR Sistemine Uygulanması

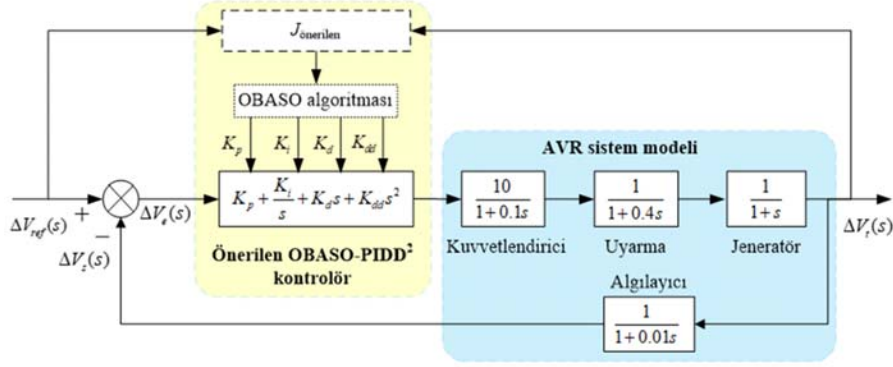
(Implementation of the Proposed OBASO-PIDD² Controller in AVR system)

Şekil 6, önerilen OBASO ayarlı PIDD² kontrolörü ile birleştirilmiş AVR sisteminin blok şemasını göstermektedir.

OBASO algoritması ile dört adet PIDD² kontrolör parametresini optimize etmek için, tasarım parametreleri ilk olarak her atomun gerçek bir sayı ile temsil edildiği $P=[K_p; K_i; K_d; K_{dd}]$ gibi bir atom popülasyonuna kodlanır. Daha sonra, atomlar önerilen amaç fonksiyonunun değerini en aza indirmek için OBASO algoritmasının temel basamaklarını



Şekil 5. PIDD² kontrolörlü bir AVR sisteminin blok şeması (Block diagram of an AVR system with a PIDD² controller)



Şekil 6. OBASO-PIDD² kontrolörlü AVR sistemi (AVR system with OBASO-PIDD² controller)

takip ederek optimize edilir. Önerilen yaklaşımda, ilk popülasyon rastgele seçilmiş m adet atom (popülasyon büyüklüğü) içerir. Her bir atom için AVR sisteminin zaman tanım bölgesinde simülasyonları yapılır ve gerilim değişim eğrileri elde edilir. Her bir atomun kendi maksimum aşım, yerleşme zamanı, yükselme zamanı ve sürekli hal hatası ile farklı bir uç gerilim cevap eğrisi vermesi muhtemeldir. Bundan sonra, her atomun Eş. 20'deki $J_{\text{önerilen}}$ değerleri hesaplanır ve atomlar daha sonraki iterasyon için değiştirilmek üzere optimizasyon modülüne geri gönderilir. AVR sistemi ve optimizasyon modülü arasında gerçekleşen bu çift yönlü gidiş-geliş, maksimum iterasyon sayısına erişilinceye kadar yinelenir. Optimizasyon sürecinin bitmesinin ardından, Eş. 20'de verilen $J_{\text{önerilen}}$ amaç fonksiyonun en düşük değerine sahip en iyi atom, optimal PIDD² parametre kümesi olarak tanınır. AVR sisteminin performansını optimize etmek için uygulanan OBASO algoritmasının akış şeması Şekil 7'de ayrıntılı olarak resmedilmiştir.

7. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA (SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION)

ASO ve OBASO algoritmalarına ilişkin kodlamalar, AVR sistemine uyarlanması ve tüm analizler, Intel® i7 2,50 GHz işlemci ve 16,00 GB RAM özellikli kişisel bilgisayar üzerinden MATLAB/Simulink (Versiyon: 8.3) yazılım paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ASO ve OBASO algoritmaları çalıştırılırken maksimum iterasyon ve atom popülasyonu sayıları sırasıyla 30 ve 50 alınmıştır. Karşılaştırmalı analizlerdeki tablolarda en iyi sonuçlar kalın yazı fontu ile vurgulanmıştır. Mevcut çalışmadaki önemli analizler ve sonuçları aşağıdaki alt başlıklarda açıklanmıştır.

7.1. OBASO Algoritmasının İstatistiksel Başarımı (Statistical Performance of OBASO Algorithm)

AVR sistemi için klasik ASO ve önerilen OBASO algoritmaları birbirinden bağımsız şekilde 25 kez çalıştırıldı ve tüm çalıştırmalara ilişkin elde edilen $J_{\text{önerilen}}$ amaç fonksiyonunun değerleri Şekil 8'de ve istatistiksel kutu grafiği analizi sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Kutu grafiğinden görüleceği gibi, medyan ve kartil değerler arasındaki mesafenin çok yakın olması ve uç değerlerin olmaması nedeniyle, önerilen OBASO algoritması, klasik

ASO algoritmasından istatistiksel bakımdan daha kararlı ve etkindir.

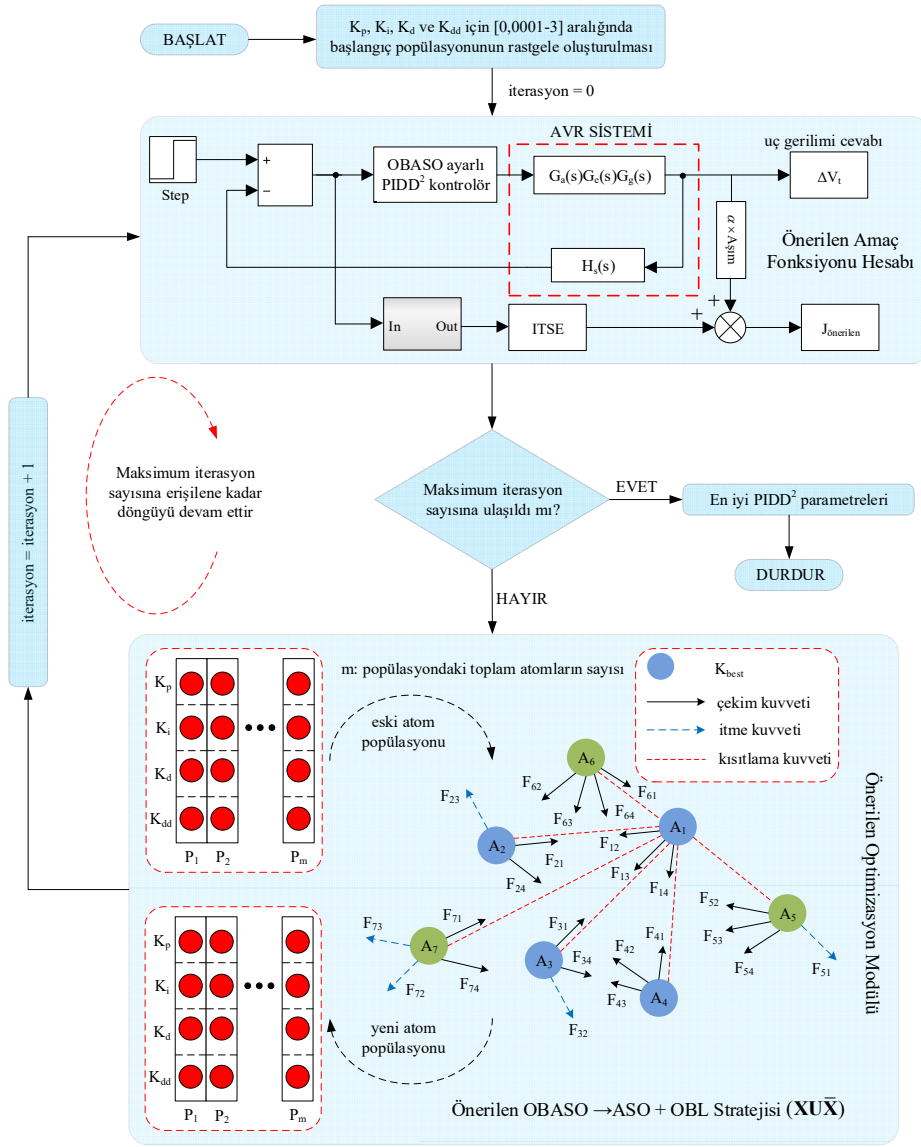
7.2. Yakınsama Profili (Convergence Profile)

Şekil 8'de görüleceği üzere ASO ve OBASO algoritmaları sırasıyla 11. ve 16. çalıştırmada en iyi $J_{\text{önerilen}}$ değerlerini elde etmiştir. Bu çalıştırmalara ilişkin yakınsama eğrileri Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, klasik ASO algoritmasına kıyasla önerilen OBASO algoritması çok süratlice ve yalnızca 7. iterasyondan itibaren yakınsayarak global optimum değerine erişmiştir.

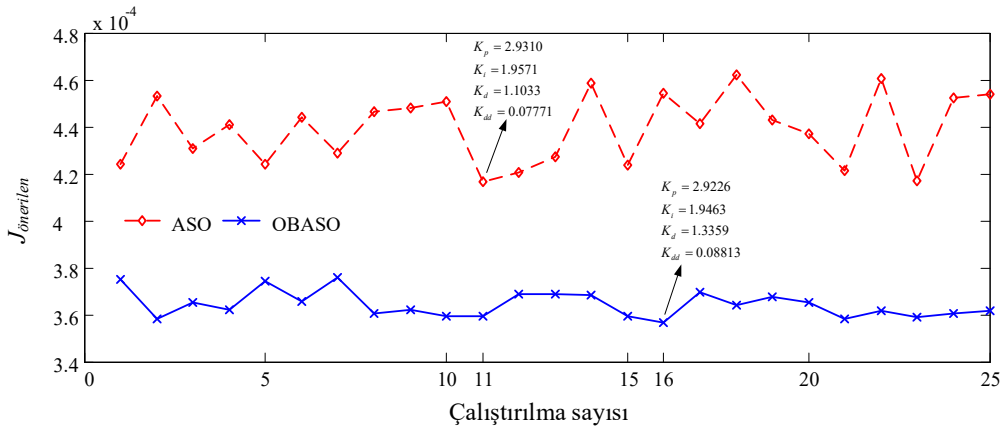
7.3. Geçici Hal Cevabı ve Amaç Fonksiyonları Karşılaştırmaları

(Comparisons of Transient Response and Objective Functions)

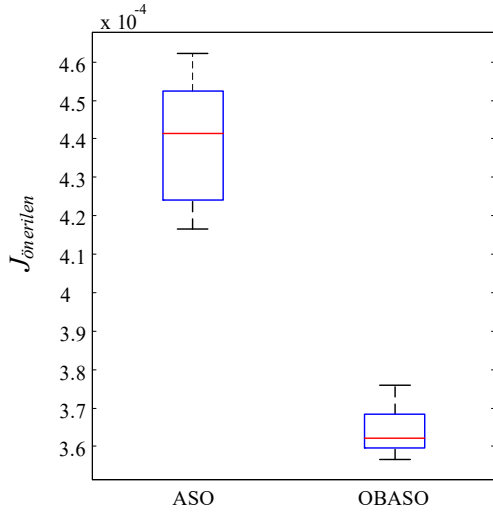
Önerilen OBASO-PIDD² kontrolörün AVR sisteminin geçici hal cevabını iyileştirmesindeki etkinliğini ve avantajını göstermek için, aynı AVR sistemini kullanan diğer yaklaşımlarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırma amacıyla, ASO-PIDD² ile birlikte prestijli dergilerde yayımlanan, son dört yılın çalışmalarından olup en iyi kontrolör kazanç değerlerini bulmuş olan PSO-PIDD² [7], CS-FOPID [16] ve SCA-PID [1] seçilmiştir. Farklı yaklaşımlarla bulunan kontrolör parametreleri Tablo 5'te verilmiştir. Şekil 11, farklı yaklaşımlarla tasarlanan AVR sisteminin uç gerilimi basamak cevabı için elde edilen karşılaştırmalı simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Şekilden, önerilen OBASO ayarlı PIDD² kontrolörün daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır. Zaman tanım bölgesi performans karakteristikleri (yüzdelerlik aşım, $\pm\%5$ 'lik tolerans bandı için yerleşme zamanı ve $\%10 \rightarrow \%90$ için yükselme zamanı) ve en popüler iki amaç fonksiyonu (ITSE ve ZLG) gibi kriterler açısından karşılaştırmalı geçici hal cevabı analiz sonuçları Tablo 6'da listelenmiştir. Tablodan görüleceği üzere aşım, yerleşme zamanı, yükselme zamanı, ITSE ve ZLG değerleri önerilen OBASO-PIDD² kontrolör kullanılmasıyla en düşük çıkmıştır. Bu sonuçlar, AVR sistemi için önerilen OBASO algoritmasının diğer algoritmalara (klasik ASO, PSO, CS ve SCA) üstünlüğünü ve PIDD² kontrolörün geleneksel PID ve FOPID kontrolörlerine göre daha etkin ve avantajlı olduğunu açıkça doğrulamaktadır.



Şekil 7. AVR performansını optimize etmek için OBASO uygulama blok şeması (OBASO implementation block diagram for optimizing the AVR performance)



Şekil 8. Tüm çalıştırmalar için $J_{önerilen}$ değerleri (Values of $J_{önerilen}$ for all runs)



Şekil 9. Kutu grafiği analizi sonuçları (Box plot analysis results)

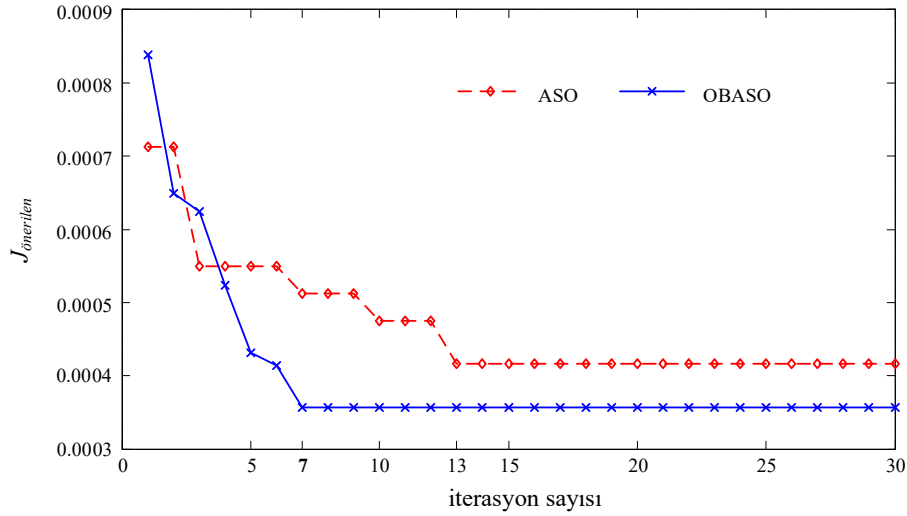
7.4. Frekans cevabı analizi (Frequency Response Analysis)

Bode analizi, bir sistemin frekans tanım bölgesindeki kararlılığını, o sistemin tepe kazancını, faz payını, gecikme payını ve bant genişliğini gözlemleyerek analiz etmek için kullanılır. Önerilen yaklaşım için Bode grafiği, Şekil 12’de gösterilmektedir. AVR sistemi için elde edilen karşılaştırmalı simülasyon sonuçları da Tablo 7’de

verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi, önerilen OBASO-PIDD² kontrolör, ASO-PIDD², PSO-PIDD² [7], CS-FOPID [16] ve SCA-PID [1] kontrolörlerine kıyasla **0 dB** ve **0 Hz** değerlerinde minimum tepe kazancına, **180°** değerinde maksimum faz payına, sonsuz gecikme payına (sistemi kararsızlaştıran en küçük gecikme süresidir) ve maksimum bant genişliğine (en hızlı cevaba) sahiptir. Burada, büyük bir bant genişliğine sahip bir sistemin rasgele girişleri doğru bir şekilde izleyebildiğini belirtmekte fayda var. Tüm bunlardan, AVR sisteminin en iyi frekans cevabı karakteristiğinin önerilen ayarlama yaklaşımı ile elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

7.5. Gürbüzlük Analizi (Robustness Analysis)

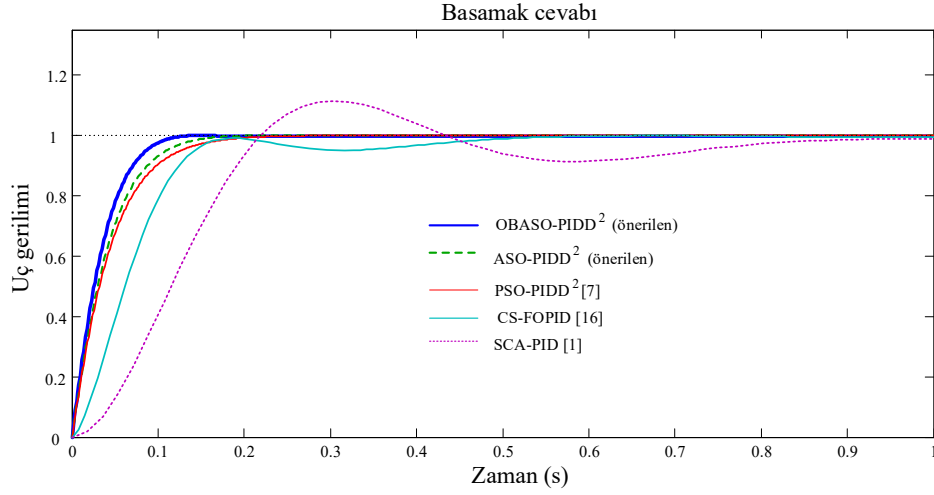
Bir sistem için, anormal durumlarda sistemin kabul edilebilir cevabını korumada gürbüz bir kontrolöre sahip olmak çok önemli ve gereklidir. Sistemin davranışları, sistem belirsizliklerine maruz kaldığında yapılan gürbüzlük analizi ile gözlenmektedir. AVR sisteminde yüke bağlı olarak K_g ve T_g parametreleri değişmektedir ve literatürde gürbüzlük analizi genellikle bu iki parametredeki değişimler üzerinden yapılmaktadır [1, 9]. Bu çalışmada K_g ’nin 0,15 adımlarla 0,70 ile 1,00 arasında ve T_g ’nin ise 0,50 adımlarla 1,00 ile 2,00 arasında değiştiği düşünüldü. Tablo 8, AVR sisteminin 9 farklı çalışma koşulu için tüm yaklaşımlara ait karşılaştırmalı simülasyon sonuçlarını içermektedir.



Şekil 10. Yakınsama karakteristiği (Convergence characteristic)

Tablo 5. Çeşitli yaklaşımlara dayalı kontrolörlerin parametreleri (Parameters of controllers based on various approaches)

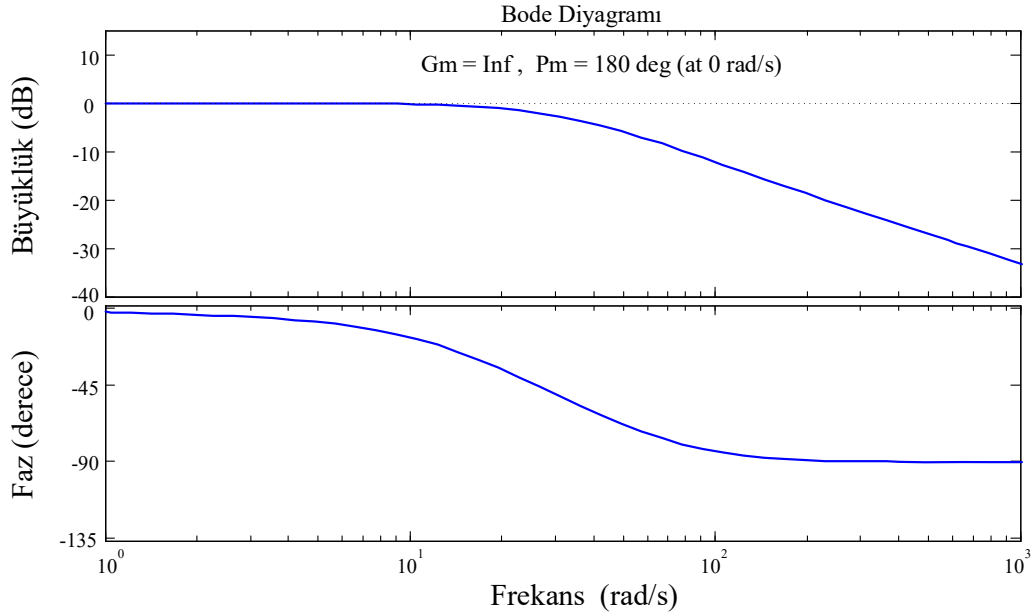
Algoritma-Kontrolör	Kontrolör parametreleri					
	K_p	K_i	K_d	K_{dd}	λ	μ
OBASO-PIDD ² (önerilen)	2,9209	1,9463	1,3359	0,08813	–	–
ASO-PIDD ² (önerilen)	2,9310	1,9571	1,1033	0,07771	–	–
PSO-PIDD ² [7]	2,7784	1,8521	0,9997	0,07394	–	–
CS-FOPID [16]	2,5150	0,1629	0,3888	–	0,97	1,38
SCA-PID [1]	0,9826	0,8337	0,4982	–	–	–



Şekil 11. Çeşitli kontrolörler ile AVR sisteminin uç gerilimi değişim eğrileri
(Terminal voltage changing curves of the AVR system with various controllers)

Tablo 6. Farklı kontrolörler için geçici hal cevabı analiz sonuçları
(Transient response analysis results for different controllers)

Algoritma-Kontrolör	Geçici hal cevabı parametreleri			Amaç fonksiyonları	
	Maksimum aşım (%)	Yerleşme zamanı (s)	Yükselme zamanı (s)	ITSE ($t_{sim}=10$ s)	ZLG ($\beta=1$)
OBASO-PIDD ² (önerilen)	0	0,0864	0,0662	3,5650E-04	0,0074
ASO-PIDD ² (önerilen)	0	0,1098	0,0825	4,1665E-04	0,0100
PSO-PIDD ² [7]	0	0,1265	0,0929	4,9423E-04	0,0124
CS-FOPID [16]	0	0,1415	0,1055	0,0016	0,0132
SCA-PID [1]	11,4244	0,7249	0,1481	0,0064	0,2844



Şekil 12. OBASO-PIDD² kontrolörlü AVR sisteminin Bode grafiği
(Bode plot of AVR system with OBASO-PIDD² controller)

Tablo 7. Çeşitli AVR kontrolörlerinin Bode analizi (Bode analysis of various AVR controllers)

Algoritma-Kontrolör	Tepe kazancı	Faz payı	Gecikme payı	Bant genişliği
OBASO-PIDD ² (önerilen)	0 dB (0 rad/s)	180°	Sonsuz (0 rad/s)	32,1280
ASO-PIDD ² (önerilen)	0 dB (0 rad/s)	180°	Sonsuz (0 rad/s)	26,0864
PSO-PIDD ² [7]	0 dB (0 rad/s)	180°	Sonsuz (0 rad/s)	23,5026
CS-FOPID [16]	0,05 dB (2,6 rad/s)	167°	0,951 s (3,07 rad/s)	22,0570
SCA-PID [1]	1,09 dB (9,17 rad/s)	87,3°	0,128 s (11,9 rad/s)	14,8214

Tablo 8. Parametre değişiklikleri durumunda AVR sisteminin geçici hal cevap analizi
(Transient response analysis of AVR system under parameter changes)

K _g	T _g	Algoritma-Kontrolör	Maksimum aşım (%)	Yükselme zamanı (s)	Yerleşme zamanı (s)	ITSE (t _{sim} =10 s)	ZLG (β=1)	
0,70	1,00	OBASO-PIDD ² (önerilen)	0	0,1048	0,1413	8,1035e-04	0,0134	
		ASO-PIDD ² (önerilen)	0	0,1285	0,1735	9,5260e-04	0,0166	
		PSO-PIDD ² [7]	0	0,1448	0,1976	0,0011	0,0194	
		CS-FOPID [16]	0	0,1055	0,1415	0,0016	0,0132	
		SCA-PID [1]	1,3937	0,2108	0,8720	0,0097	0,2520	
	1,50	OBASO-PIDD ² (önerilen)	0,6241	0,1604	0,2156	0,0018	0,0242	
		ASO-PIDD ² (önerilen)	1,5747	0,1891	0,2463	0,0024	0,0310	
		PSO-PIDD ² [7]	2,3245	0,2095	0,2717	0,0029	0,0375	
		CS-FOPID [16]	2,1022	0,3330	2,0515	0,0084	0,6455	
		SCA-PID [1]	3,6711	0,4736	0,3217	0,0187	0,0791	
	2,00	OBASO-PIDD ² (önerilen)	1,9637	0,2131	0,2848	0,0037	0,0388	
		ASO-PIDD ² (önerilen)	3,4614	0,2432	0,3100	0,0050	0,0464	
		PSO-PIDD ² [7]	4,3836	0,2662	0,3360	0,0060	0,0534	
		CS-FOPID [16]	3,9657	0,4168	2,3131	0,0105	0,7220	
		SCA-PID [1]	6,4208	0,4548	2,7540	0,0357	0,8864	
	0,85	1,00	OBASO-PIDD ² (önerilen)	0,1022	0,0819	0,1083	5,1855e-04	0,0103
			ASO-PIDD ² (önerilen)	0	0,1014	0,1359	6,0960e-04	0,0127
			PSO-PIDD ² [7]	0	0,1143	0,1560	7,2536e-04	0,0153
			CS-FOPID [16]	0	0,1625	0,3135	0,0021	0,0555
			SCA-PID [1]	6,5655	0,1723	0,7866	0,0075	0,2675
1,50		OBASO-PIDD ² (önerilen)	0	0,1281	0,1693	0,0012	0,0152	
		ASO-PIDD ² (önerilen)	1,3996	0,1535	0,2000	0,0016	0,0260	
		PSO-PIDD ² [7]	2,0655	0,1708	0,2229	0,0020	0,0323	
		CS-FOPID [16]	2,2314	0,2555	0,3840	0,0042	0,0608	
		SCA-PID [1]	3,1081	0,2503	0,3472	0,0133	0,0553	
2,00		OBASO-PIDD ² (önerilen)	1,6269	0,1718	0,2267	0,0025	0,0305	
		ASO-PIDD ² (önerilen)	3,0215	0,2004	0,2562	0,0034	0,0396	
		PSO-PIDD ² [7]	3,8958	0,2205	0,2804	0,0041	0,0467	
		CS-FOPID [16]	4,1172	0,3415	0,4558	0,0073	0,0675	
		SCA-PID [1]	5,4696	0,3419	2,3115	0,0246	0,7592	
1,00		1,00	OBASO-PIDD ² (önerilen)	0	0,0662	0,0864	3,5650e-04	0,0074
			ASO-PIDD ² (önerilen)	0	0,0825	0,1098	4,1665e-04	0,0100
			PSO-PIDD ² [7]	0	0,0929	0,1265	4,9423e-04	0,0124
			CS-FOPID [16]	0	0,1055	0,1415	0,0016	0,0132
			SCA-PID [1]	11,4244	0,1481	0,7249	0,0064	0,2844
	1,50	OBASO-PIDD ² (önerilen)	0	0,1058	0,1384	8,2022e-04	0,0120	
		ASO-PIDD ² (önerilen)	1,3294	0,1282	0,1671	0,0011	0,0227	
		PSO-PIDD ² [7]	1,8613	0,1431	0,1875	0,0014	0,0281	
		CS-FOPID [16]	2,1642	0,1778	0,2944	0,0030	0,0565	
		SCA-PID [1]	4,1304	0,2090	0,2880	0,0103	0,0552	
	2,00	OBASO-PIDD ² (önerilen)	0,6046	0,1433	0,1874	0,0017	0,0200	
		ASO-PIDD ² (önerilen)	2,7144	0,1695	0,2174	0,0024	0,0348	
		PSO-PIDD ² [7]	3,5108	0,1875	0,2399	0,0029	0,0415	
		CS-FOPID [16]	4,0195	0,2644	0,3881	0,0054	0,0709	
		SCA-PID [1]	4,7365	0,2780	0,3855	0,0183	0,0695	

Tablodan, sistem parametrelerinde bir değişiklik meydana geldiğinde maksimum aşım, yerleşme zamanı, yükselme zamanı, ITSE ve ZLG amaç fonksiyonları açısından sunulan OBASO-PIDD² kontrolörlü sistemin, ASO-PIDD², PSO-PIDD² [7], CS-FOPID [16] ve SCA-PID [1] kontrolörlü

sistemlere kıyasla uç geriliminin daha iyi performansla daha az değiştiği görülebilir. Yani, AVR sistemi için önerilen OBASO-PIDD² kontrolörün karakteristik olarak gürbzlük gösterdiği ve AVR sisteminin ani değişen parametre koşullarında istenen performansı sağlayabildiği söylenebilir.

8. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

OBL son yıllarda daha fazla dikkat çekiyor ve sezgisel-üstü algoritmaların performansını iyileştirmek için kullanılıyor. Bu makalede, ASO algoritmasının performansı OBL stratejisi kullanılarak geliştirilmiştir ve bu yeni geliştirilmiş algoritma, AVR sisteminin kararlılık ve gürbüzlük profillerini arttırmak için ilk kez kullanılmıştır. Geleneksel PID ve karmaşık yapılı FOPID kontrolörlerin yerine AVR sisteminde kontrolör olarak daha gürbüz ve daha etkili olan PIDD² tercih edilmiştir. PIDD² kontrolörün dört parametresinin ayarlanması sürecinde, yeni bir amaç fonksiyonu minimize edilmek suretiyle önerilen OBASO algoritması defalarca koşutularak AVR sistemini en iyi şekilde optimize eden kontrolör parametreleri en az iterasyonla bulunmuştur. Sunulan yeni tasarım metodunun üstünlüğünü göstermek için ASO-PIDD² ile beraber PSO-PIDD² [7], CS-FOPID [16] ve SCA-PID [1] kontrolörleriyle çeşitli analizler yoluyla performans karşılaştırması yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarından elde edilen önemli tespitler şunlardır:

- Önerilen yeni yaklaşımla AVR sisteminin geçici hal cevap profili; maksimum aşım, yerleşme zamanı ve yükselme zamanı açılarından literatürdeki güncel çalışmalara kıyasla önemli ölçüde iyileştirildi.
- ITSE ve ZLG amaç fonksiyonlarının değerleri başarılı şekilde azaltıldı.
- Sistemin, aynı zamanda, frekans tanım bölgesinde de kararlılığı artırıldı.
- Diğer kontrolörlere kıyasla, önerilen OBASO-PIDD² kontrolörün sistemdeki parametre değişimlerinden etkilenmediği görüldü.
- Bu çalışma ile ayrıca, önerilen OBASO algoritmasının, hem test fonksiyonlarını çözmekteki hem de AVR sistemindeki kontrolör tasarımındaki başarıları istatistiksel olarak doğrulandı.

Sunulan çalışmanın özü, önerilen yeni yaklaşımın AVR sistemi için başarıyla uygulanabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Hekimoğlu B., Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system, Transactions of the Institute of Measurement and Control, 41 (6), 1761-1771, 2019.
2. Devaraj D., Selvabala B., Real-coded genetic algorithm and fuzzy logic approach for real-time tuning of proportional-integral-derivative controller in automatic voltage regulator system, IET Generation Transmission and Distribution, 3 (7), 641-649, 2009.
3. Gaing Z.-L., A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system, IEEE Transactions on Energy Conversion, 19 (2), 384-391, 2004.
4. Gozde H., Taplamacioglu M.C., Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system, Journal of the Franklin Institute, 348 (8), 1927-1946, 2011.
5. Tang Y., Cui M., Hua C., Li L., Yang Y., Optimum design of fractional order PID μ controller for AVR system using chaotic ant swarm, Expert Systems with Applications, 39 (8), 6887-6896, 2012.
6. Mohanty P.K., Sahu B.K., Panda S., Tuning and assessment of proportional-integral-derivative controller for an automatic voltage regulator system employing local unimodal sampling algorithm, Electric Power Components and Systems, 42 (9), 959-969, 2014.
7. Sahib M.A., A novel optimal PID plus second order derivative controller for AVR system, Engineering Science and Technology, an International Journal, 18 (2), 194-206, 2015.
8. Zeng G.-Q., Chen J., Dai Y.-X., Li L.-M., Zheng C.-W., Chen M.-R., Design of fractional order PID controller for automatic regulator voltage system based on multi-objective extremal optimization, Neurocomputing, 160, 173-184, 2015.
9. Güvenç U., Yiğit T., Işık A.H., Akkaya İ., Performance analysis of biogeography-based optimization for automatic voltage regulator system, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 24, 1150-1162, 2016.
10. Chatterjee S., Mukherjee V., PID controller for automatic voltage regulator using teaching learning based optimization technique, International Journal of Electric Power and Energy Systems, 77, 418-429, 2016.
11. Duman S., Yörükeren N., Altaş İ.H., Gravitational search algorithm for determining controller parameters in an automatic voltage regulator system, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 24, 2387-2400, 2016.
12. Sambariya D.K., Paliwal D., Optimal design of PIDA controller using harmony search algorithm for AVR power system, 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India, 1-6, 4-6 March, 2016.
13. Lahcene R., Abdeldjalil S., Aissa K., Optimal tuning of fractional order PID controller for AVR system using simulated annealing optimization algorithm, 2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B), Boumerdes, Algeria, 1-6, 29-31 October, 2017.
14. Pradhan R., Majhi S.K., Pati B.B., Design of PID controller for automatic voltage regulator system using ant lion optimizer, World Journal of Engineering, 15 (3), 373-387, 2018.
15. Bingul Z., Karahan O., A novel performance criterion approach to optimum design of PID controller using cuckoo search algorithm for AVR system, Journal of the Franklin Institute, 355 (13), 5534-5559, 2018.
16. Sikander A., Thakur P., Bansal R.C., Rajasekar S., A novel technique to design cuckoo search based FOPID controller for AVR in power systems, Computers & Electrical Engineering, 70, 261-274, 2018.
17. Ekinci S., Hekimoğlu B., Kaya S., Tuning of PID controller for AVR system using salp swarm algorithm,

- 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), Malatya, Turkey, 424-429, 28-30 September, 2018.
18. Çelik E., Incorporation of stochastic fractal search algorithm into efficient design of PID controller for an automatic voltage regulator system, *Neural Computing and Applications*, 30 (6), 1991-2002, 2018.
 19. Hekimoğlu B., Ekinci S., Grasshopper optimization algorithm for automatic voltage regulator system, 2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), Istanbul, Turkey, 152-156, 3-5 May, 2018.
 20. Celik E., Durgut R., Performance enhancement of automatic voltage regulator by modified cost function and symbiotic organisms search algorithm, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21 (5), 1104-1111, 2018.
 21. Gong C., Jaya algorithm-optimized PID controller for AVR system, *Advances in Intelligent, Interactive Systems and Applications, Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent, Interactive Systems and Applications (IISA2018)*, Vol. 885, Eds: Xhafa F., Patnaik S., Tavana M., Springer Nature, HongKong, China, 382-393, 2018.
 22. Zhou Y., Zhang J., Yang X., Ling Y., Optimization of PID controller based on water wave optimization for an automatic voltage regulator system, *Information Technology and Control*, 48 (1), 160-171, 2019.
 23. Ekinci S., Hekimoğlu B., Improved kidney-inspired algorithm approach for tuning of PID controller in AVR system, *IEEE Access*, 7, 39935-39947, 2019.
 24. Ekinci S., Hekimoğlu B., Multi-machine power system stabilizer design via HPA algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1271-1285, 2017.
 25. Ekinci S., Optimal design of power system stabilizer using sine cosine algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1329-1350, 2019.
 26. Tizhoosh H.R., Opposition-based learning: A new scheme for machine intelligence, *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, Vienna, Austria, 695-701, 28-30 November, 2005.
 27. Elaziz M.A., Oliva D., Xiong S., An improved opposition-based sine cosine algorithm for global optimization, *Expert Systems with Applications*, 90, 484-500, 2017.
 28. Elaziz M.A., Oliva D., Parameter estimation of solar cells diode models by an improved opposition-based whale optimization algorithm, *Energy Conversion and Management*, 171, 1843-1859, 2018.
 29. Ibrahim R.A., Elaziz M.A., Oliva D., Cuevas E., Lu S., An opposition-based social spider optimization for feature selection, *Soft Computing*, 1-21, 2019.
 30. Pradhan M., Roy P.K., Pal T., Oppositional based grey wolf optimization algorithm for economic dispatch problem of power system, *Ain Shams Engineering Journal*, 9 (4), 2015-2025, 2018.
 31. Bao X., Jia H., Lang C., Dragonfly algorithm with opposition-based learning for multilevel thresholding Color Image Segmentation, *Symmetry*, 11 (5), 716, 2019.
 32. Zhao W., Wang L., Zhang Z., Atom search optimization and its application to solve a hydrogeologic parameter estimation problem, *Knowledge-Based Systems*, 163, 283-304, 2019.
 33. Zhao W., Wang L., Zhang Z., A novel atom search optimization for dispersion coefficient estimation in groundwater, *Future Generation Computer Systems*, 91, 601-610, 2019.
 34. Hekimoğlu B., Optimal tuning of fractional order PID controller for DC motor speed control via chaotic atom search optimization algorithm, *IEEE Access*, 7, 38100-38114, 2019.
 35. Mirjalili S., SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems, *Knowledge-Based Systems*, 96, 120-133, 2016.
 36. Saadat H., *Power System Analysis*, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1999.
 37. Raju M., Saikia L.C., Sinha N., Automatic generation control of a multi-area system using ant lion optimizer algorithm based PID plus second order derivative controller, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 80, 52-63, 2016.

