



T.C.

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DENGELİ ARİTMETİK OPTİMİZASYON
ALGORİTMASI İLE OTOMATİK GERİLİM
REGÜLATÖR SİSTEMİNİN ETKİN
KONTROLÜ**

Haluk ÇETİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Kasım-2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Haluk ÇETİN tarafından hazırlanan “Dengeli Aritmetik Optimizasyon Algoritması ile Otomatik Gerilim Regülatör Sisteminin Etkin Kontrolü” adlı tez çalışması 08/11/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Davut İZCİ

.....

Danışman

Doç. Dr. Serdar EKİNCİ

.....

Üye

Doç. Dr. Cafer BUDAK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Haluk ÇETİN

Tarih: 08.11.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENGELİ ARİTMETİK OPTİMİZASYON ALGORİTMASI İLE OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖR SİSTEMİNİN ETKİN KONTROLÜ

Haluk ÇETİN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Serdar EKİNCİ

2023, 49 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Serdar EKİNCİ

Doç. Dr. Davut İZCİ

Doç. Dr. Cafer BUDAK

Bu çalışma, otomatik gerilim regülatörlerinin (AVR) elektrik güç sistemlerindeki kritik rolünü dikkate alınıp yeni bir kontrol mekanizması önerilmektedir. AVR'lerin temel görevi, güç sistemlerinin çıkış gerilimini sabit ve istikrarlı bir seviyede tutarak bağlı cihazların performansını ve ömrünü korumaktır. AVR'ler, güç dalgalanmalarını ve gerilim sapmalarını düzelteren önemli cihazlardır. Ancak, AVR'lerin etkili çalışabilmesi için doğru kontrol mekanizmalarına ihtiyaç vardır. Bu nedenle, doğru kontrol yöntemi ve algoritmaları geliştirmek, AVR sistemlerinin verimli çalışmasını sağlamak ve enerji kesintilerinin etkilerini azaltmak için kritik bir öneme sahiptir. Bu tez çalışması ile, yeni bir yapay zekâ optimizasyon tekniği kullanarak AVR sistemlerinin daha verimli kontrolünü önerilmektedir. Bu bağlamda aritmetik optimizasyon algoritması elit karşıt tabanlı öğrenme ve örüntü arama teknikleri ile dengeli hale getirilip RPIDD² kontrolörü tasarlanmıştır. Bu önerilen kontrol yöntemi, karşılaştırmalı analizlerde üstün performans göstermiştir. Böylece AVR sistemi için güçlü bir kontrol mekanizması yeni bir yaklaşım olarak sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aritmetik optimizasyon algoritması, Elit karşıt tabanlı öğrenme, Kontrolör tasarımı, Otomatik gerilim regülatör sistemi, Örüntü arama.

ABSTRACT

MS THESIS

A BALANCED ARITHMETIC OPTIMIZATION ALGORITHM FOR EFFICIENT CONTROL OF AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR

Haluk ÇETİN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Serdar EKİNCİ

2023, 49 Pages

Jury

Assoc. Prof. Serdar EKİNCİ

Assoc. Prof. Davut İZCİ

Assoc. Prof. Cafer BUDAK

This study takes into consideration the critical role of automatic voltage regulators (AVR) in electrical power systems and proposes a new control mechanism. The primary function of AVR devices is to maintain a stable and consistent output voltage in power systems, thereby preserving the performance and lifespan of connected devices. AVR devices play a vital role in mitigating power fluctuations and voltage deviations. However, to ensure the effective operation of AVR devices, the need for the right control mechanisms is paramount. Therefore, the development of the correct control methods and algorithms is crucial for the efficient operation of AVR systems and reducing the impact of power interruptions. This thesis suggests an improved control approach for AVR systems using a novel artificial intelligence optimization technique. In this context, an arithmetic optimization algorithm is balanced using elite opposition-based learning and pattern search techniques to design an RPIDD² controller. The proposed control method has demonstrated superior performance in comparative analyses, presenting a new approach for a robust control mechanism in AVR systems.

Keywords: Arithmetic optimization algorithm, Elite opposition based learning, Controller design, Automatic voltage regulator system, Pattern Search.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca fikir ve destekleriyle beni destekleyen, çalışmalarında bana yön veren, bilgi sunan, özveriyle bana katkı sağlayan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Serdar EKİNCİ'ye, hep bilgilerine başvurduğumuz ayrıca beraber çalıştığımız Sayın Doç. Dr. Davut İZCİ'ye, ikinci üniversite okurken ve yüksek lisans tezimde bana verdiği katkılardan dolayı Öğr. Gör. Veysel GİDER'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Yüksek lisans boyunca gerekli kolaylığı bana sağlayan Batman Mesleki Eğitim Merkezi Müdürü Sayın Ferit ALTUN'a, çocuklarıma yokluğumu hissettirmeyen sevgili eşim Yüstra'ya, oğullarım Miran ve Mert'e ve bu güne gelmemde varlığını yanımda hissettiğim annem'e, kendinden feragat edip okumam için hayatı çalışmakla geçen yakın zamanda kaybettiğim babama şükranlarımı sunuyorum.

Haluk ÇETİN
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması.....	1
1.2. Tezin Literatüre Katkıları	4
2. ARİTMETİK OPTİMİZASYON ALGORİTMASI.....	6
3. DENGELİ ARİTMETİK OPTİMİZASYON ALGORİTMASI	9
4. KULLANILAN TEST FONKSİYONLARI VE ÖZELLİKLERİ	13
4.1. Tek Modlu Test Fonksiyonları	13
4.1.1. Sphere Fonksiyonu	13
4.1.2. Schwefel 2.2 Fonksiyonu.....	13
4.1.3. Schwefel 1.2 Fonksiyonu.....	13
4.1.4. Schwefel 2.21 Fonksiyonu.....	14
4.1.5. Rosenbrock Fonksiyonu	14
4.1.6. Step Fonksiyonu	14
4.1.7. Quartic Fonksiyonu.....	15
4.2. Çok Modlu Test Fonksiyonları	15
4.2.1. Schwefel Fonksiyonu.....	15
4.2.2. Rastrigin Fonksiyonu	15
4.2.3. Ackley Fonksiyonu	16
4.2.4. Griewank Fonksiyonu.....	16
4.2.5. Penalized Fonksiyonu	16
4.2.6. Penalized2 Fonksiyonu	17
4.3. Sabit Boyutlu Test Fonksiyonları	17
4.3.1. Foxholes Fonksiyonu	17
4.3.2. Kowalik Fonksiyonu.....	18
4.3.3. Six-Hump Camel Fonksiyonu	18
4.3.4. Branin Fonksiyonu.....	18
4.3.5. Goldstein-Price Fonksiyonu	19
4.3.6. Hartman 3 Fonksiyonu.....	19
4.3.7. Hartman 6 Fonksiyonu.....	20
4.3.8. Shekel 5 Fonksiyonu.....	20
4.3.9. Shekel 7 Fonksiyonu.....	20
4.3.10. Shekel 10 Fonksiyonu.....	21
5. İSTATİSTİKİ PERFORMANS ANALİZİ	22

5.1. Karşılaştırma için Kullanılan Sezgisel-üstü Algoritmalar	22
5.2. Tek Modlu Test Fonksiyonlarından Elde Edilen İstatistiki Sonuçlar	22
5.3. Çok Modlu Test Fonksiyonlarından Elde Edilen İstatistiki Sonuçlar	23
5.4. Sabit Boyutlu Test Fonksiyonlarının İstatistiki Sonuçları	24
6. OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖR (AVR) SİSTEMİ.....	26
6.1. AVR Sisteminin Modellenmesi ve Sistem Bileşenleri	26
6.2. Kontrolsüz AVR Sisteminin Kutup-Sıfır Haritası Analizi	27
6.3. Kontrolsüz AVR Sisteminin Zaman Cevabı Analizi	28
6.4. Kontrolsüz Açık Çevrim AVR Sisteminin Frekans Cevabı Analizi.....	29
7. AVR SİSTEMİ İÇİN ÖNERİLEN YENİ TASARIM METODU	30
7.1. Sıklıkla Kullanılan Kontrolör Tipleri ve RPIDD ² Kontrolör.....	30
7.2. Amaç Fonksiyonu	31
7.3. Algoritmanın RPIDD ² Kontrollü AVR Sistemine Entegrasyonu.....	32
8. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA	33
8.1. b-AOA ve AOA Metotlarının İstatistiki Performansı.....	33
8.2. En İyi Kontrol Parametreleri ve Elde Edilen Transfer Fonksiyonları	33
8.3. Önerilen Tasarım Metodunun Kararlılık Performansının Doğrulanması	34
8.4. Karşılaştırma Amacıyla Seçilen Yaklaşımlar ve Transfer Fonksiyonları	36
8.5. Karşılaştırmalı Zaman Cevabı Analizi	41
8.6. Karşılaştırmalı Frekans Cevabı Analizi	42
8.7. Literatürdeki Güncel Çalışmalarla Karşılaştırmalar	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	52

1. GİRİŞ

Otomatik gerilim regülatörleri (AVR), elektrik güç sistemlerinde kritik bir rol oynarlar. Bu cihazların temel işlevi, bir güç sisteminin çıkış gerilimini istikrarlı ve sabit bir seviyede tutmaktır. Bu, bağlı cihazların performansı ve ömrü için hayati öneme sahiptir. AVR'ler, güç dalgalanmalarını ve gerilim sapmalarını düzelteren, böylece elektrikli cihazların düzgün ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayan önemli araçlardır (Izci & Ekinci, 2022).

AVR'lerin önemi, günlük yaşantımızda elektrikli cihazların güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sürdürmek için kritiktir. Bu cihazlar olmadan, gerilim dalgalanmaları ve sapmaları, cihazların hızlı bir şekilde bozulmasına veya yanmasına neden olabilir. Ayrıca, endüstriyel işletmelerden ev kullanımına kadar birçok alanda kesintisiz güç sağlama görevini üstlenirler.

Ancak AVR'lerin etkili bir şekilde çalışabilmesi için uygun bir kontrol mekanizması gerekmektedir. Bu kontrol mekanizmaları, AVR'nin çıkış gerilimini doğru bir şekilde ayarlamak ve dalgalanmaları düzeltmek için tasarlanır. Bu nedenle, AVR sistemlerinin verimli çalışabilmesi ve enerji kesintilerinin etkilerinin azaltılabilmesi için doğru bir kontrol yöntemi ve algoritmaları geliştirmek kritik bir öneme sahiptir (Furat & Cucu, 2022).

1.1. Literatür Taraması

Giriş bölümünde de belirtildiği gibi, AVR sisteminin verimliliği için kontrol mekanizması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda literatürde rapor edilmiş farklı yaklaşımlara denk gelmek mümkündür. Tablo 1.1'de de görüleceği üzere, AVR sistemi kontrolü için iyi bir performans yakalamak için yapılmış olan çalışmaların önerdiği yeni ve etkili kontrol mekanizmalarının bir listesi sunulmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, bir kontrolör mekanizması ile ayarlama algoritmasının uygun bir kontrol yöntemi oluşturmak için iki ana unsur olduğu kolayca görülebilir.

Kontrolörler açısından oransal-integral-türev (PID) (Ekinci, Izci, Abu Zitar, vd., 2022), PID artı ikinci dereceden türev (PIDD²) (Izci, Ekinci, & Zeynelgil, 2023), PID hızlandırma (PIDA) (Mosaad vd., 2019), filtreli PID (PID-F) (Dogruer & Can, 2022), bulanık PID (Dogruer & Can, 2022), sigmoid PID (Suid & Ahmad, 2022), kesir dereceli

PID (FOPID) (Sikander vd., 2018) ve referans modeli FOPID (Li vd., 2017) kontrolörleri gibi birçok farklı yapı ile karşılaşılabılır.

Literatürdeki ilgili çalışmaların çoğu, daha basit tasarımı ve daha kolay uygulanabilirliği nedeniyle PID kontrolör kullanma eğilimindedir (Ekinci, Izci, Abu Zitar, vd., 2022). Bununla birlikte, bir tesisin dinamik performansının artırılması gerektiğinde PID kontrolörü yeterince efektif olmayabilir (Izci, Ekinci, Zeynelgil, vd., 2021). Böyle bir durumda, iyi bir kontrol performansı sağlayabildiği için bir FOPID kontrolörü tercih edilebilir, ancak barındırdığı kesirli merteye nedeniyle, yüksek hesaplama maliyeti büyük bir yük haline gelir (Izci, Ekinci, & Hekimoğlu, 2022). Daha yüksek hesaplama maliyeti PIDA kontrolörü için de bir sorun olmaya devam etmektedir (Ekinci, Izci, & Kayri, 2022). Bu sorunlar göz önüne alındığında, bu tez çalışması faz marjı, doğruluğu ve kararlılığı iyileştirme kabiliyeti nedeniyle gerçek PIDD² (RPIDD²) kontrolörünün kullanılmasını önermektedir (Ekinci, Izci, & Kayri, 2022). Bu şekilde AVR sistem kontrolü için daha sağlam bir kontrolör mekanizması oluşturulabilir.

Daha önce de belirtildiği gibi, bir kontrolörün istenen performansa ulaşmasında uygun bir ayarlama algoritmasının kuşkusuz katkısı vardır. Tablo 1.1'de, rapor edilen kontrolör tipleri için ilgili ayarlama algoritmaları da verilmiştir. Tablodan da görülebileceği gibi, listelenen tüm ayarlama mekanizmaları meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarıdır. Bir meta-sezgisel optimize edicisinin kullanılmasının nedeni, problemin doğasından bağımsız olarak etkin optimizasyon yeteneklerinden kaynaklanmaktadır (Izci, 2021a, 2021b, 2022a, 2022b; Snášel vd., 2023). Önceki çalışmalarda, araştırmacılar farklı meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarını farklı kontrolör tipleri ile birleştirmeye çalışmış ve AVR sistemi için iyi bir performans ve sağlamlık elde etmeyi amaçlamışlardır. Bu bağlamda karşılaştırmalı olarak performans analizleri gerçekleştirilmiş ve zaman ile frekans cevapları açısından incelenmiştir.

Karşılaştırmalı analizler bazı yöntemlerin hiç aşım yapmadığını, ancak yükselme ve oturma sürelerine ilişkin performanslarının değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu alandaki araştırmacılar, aşım yüzdesi, yükselme süresi ve oturma süresine ilişkin tüm değerleri mümkün olduğunca küçük tutmak için sürekli olarak yeni yöntemler oluşturma eğilimindedir. Bu çabanın bir parçası olarak, bu tezde belirtilen performans ölçütleri için en düşük değerlerin elde edilebilmesi için yeni bir kontrol yöntemi önerilmektedir. Bu şekilde, AVR sistem kontrolü için verimli ve sağlam bir kontrol yaklaşımı önerilmektedir.

Tablo 1.1. Son yıllara ait literatürde önerilen yaklaşımlar

Kaynak	Yıl	Kontrolör tipi	Ayarlama algoritması
(Agwa vd., 2022)	2022	PID-F	Arşimet optimizasyon algoritması
(Ozgenc vd., 2022)		PID-F	Simbiyotik organizma arama algoritması
(Padiachy vd., 2022)		Two degree of freedom fractional-order PI	Balina optimizasyon algoritması
(Ekinci, Izci, Abu Zitar, vd., 2022)		PID	Nelder-Mead ile Lévy uçuş tabanlı sürünge arama algoritması
(Munagala & Jatoth, 2022)		FOPID	Kaotik kara dul algoritması
(Dogruer & Can, 2022)		Fuzzy PID	Genetik algoritma
(Ayas & Sahin, 2021)	2021	FOPID with fractional filter	Sinüs-kosinüs algoritması
(Izci & Ekinci, 2021)		PID	Balçık kalıp algoritması
(Micev vd., 2021)		PIDD ²	Hibrit simüle edilmiş tavlama-manta ışını yiyecek arama optimizasyon algoritması
(Izci, Ekinci, Zeynelgil, vd., 2021)		FOPID	Geliştirilmiş balçık kalıp algoritması
(Altbawi vd., 2021)		FOPID	Gradyan tabanlı optimizasyon algoritması
(Suid & Ahmad, 2022)		Sigmoid PID	Doğrusal olmayan sinüs-kosinüs algoritması
(Ekinci, Demiroren, vd., 2020)	2020	PIDD ²	Karşıt tabanlı atom arama optimizasyon algoritması
(Micev vd., 2020)		FOPID	Kaotik sarı eyer keçi balığı algoritması
(Ekinci, Izci, vd., 2020)		FOPID	Henry gazı çözünürlüğü optimizasyon algoritması
(Mokeddem & Mirjalili, 2020)		PIDD ²	Geliştirilmiş balina optimizasyon algoritması
(Gong, 2019)	2019	PID	Jaya algoritması
(Hekimoğlu, 2019)		PID	Sinüs-kosinüs algoritması
(Bhookya & Jatoth, 2019)		FOPID	Sinüs-kosinüs algoritması
(Mosaad vd., 2019)		PIDA	Balina optimizasyon algoritması
(Ayas, 2019)		Fractional high-order differential feedback	Parçacık sürüşü optimizasyonu
(Bourouba vd., 2019)		FOPID	Karınca aslanı optimizasyonu
(Khan vd., 2019)	2018	FOPID	Salp sürüşü algoritması
(Hekimoğlu & Ekinci, 2018)		PID	Çekirge optimizasyon algoritması
(Bingul & Karahan, 2018)		PID	Guguk kuşu arama algoritması
(Sikander vd., 2018)		FOPID	Guguk kuşu arama algoritması
(Celik, 2018)	2017	PID	Stokastik fraktal arama algoritması
(Li vd., 2017)		FOPID with reference model	Parçacık sürüşü optimizasyonu
(Chatterjee & Mukherjee, 2016)	2016	PID-F	Öğretme-öğrenmeye dayalı optimizasyon
(Duman vd., 2016)		PID	Yerçekimi arama algoritması
(Sahib, 2015)	2015	PIDD ²	Parçacık sürüşü optimizasyonu

1.2. Tezin Literatüre Katkıları

Tablo 1.1'de listelenen tüm meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kendi kontrolörlerini ayarlamak için iyi bir yetenek göstermiş olsa da en iyi kontrolör parametrelerini elde etmek her zaman önemli bir zorluk olmaya devam etmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmalar ve yapay zeka optimizasyon tekniklerinin vaatleri göz önüne alındığında, bu makale geliştirilmiş bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması oluşturarak yeni bir yapay zeka optimizasyon tekniği önermektedir. Bu bağlamda, aritmetik optimizasyon algoritması (Abualigah vd., 2021) olarak bilinen yakın zamanda geliştirilmiş bir optimizasyon tekniği kullanılmış ve yeteneği, örüntü arama algoritması (Lewis & Torczon, 1999) ve elit karşıt tabanlı öğrenme mekanizması (Ekinci, Izci, Abualigah, vd., 2023) kullanılarak artırılmıştır. Bu makalede önerilen güçlendirilmiş ve dengeli aritmetik optimizasyon algoritması, elit karşıt tabanlı öğrenme yardımıyla daha iyi bir keşfe ve örüntü arama mekanizması aracılığıyla daha iyi bir sömürüye ulaşmaktadır. Önerilen dengeli aritmetik optimizasyon algoritması, bir AVR sisteminde kullanılan gerçek bir PIDD² (RPIDD²) kontrolörünü ayarlamak için kullanılmıştır. Bu şekilde, yeni bir geliştirilmiş meta-sezgisel algoritma AVR sistem kontrolü için daha verimli bir yaklaşım olarak yeni bir kontrol yöntemi önerilmektedir. ZLG (Izci, 2021b) olarak bilinen bir performans indeksi, daha iyi sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmak için bir amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Karşılaştırmalı zaman ve frekans cevapları ile ilgili analizler, önerilen yöntemin bir AVR sistemini kontrol etmek için iyi bir kabiliyete sahip olduğunu doğrulamıştır. Bu tezin katkıları kısaca şu şekilde sıralanabilir.

- Elit karşıt tabanlı öğrenme ile örüntü arama teknikleri aracılığıyla orijinal aritmetik optimizasyon algoritması keşif ve sömürü açısından dengeli hale getirilmiştir.
- Söz konusu bu denge 23 adet klasik test fonksiyonu aracılığıyla teyit edilmiştir.
- Önerilen algoritma kullanılarak AVR sisteminin kontrolü için RPIDD² kontrolörü ayarlanmıştır.
- Oluşturulan yeni algoritmanın daha efektif ayar yapabilmesi için ZLG amaç fonksiyonu kullanılmıştır.
- Önerilen algoritma tabanlı RPIDD² kontrolörünün AVR sistemi için daha iyi zaman ve frekans cevabı karakteristiklerine sahip olduğu ve daha efektif olduğu karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

- Karşılaştırmalar için son yıllara ait güncel ve etkili yaklaşımlar seçilerek önerilen yöntemin üstünlüğü gösterilmiştir.



2. ARİTMETİK OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Aritmetik optimizasyon algoritması (AOA), meta-sezgisel bir algoritma olup matematikteki aritmetik konseptinden esinlenilerek geliştirilmiştir (Abualigah vd., 2021). AOA, Denklem (2.1) aracılığıyla bir dizi rastgele çözümü üreterek çözüm sürecini başlatmaktadır.

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & \cdots & x_{1,j} & x_{1,n-1} & x_{1,n} \\ x_{2,1} & \cdots & \cdots & x_{2,j} & \cdots & x_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N-1,1} & \cdots & \cdots & x_{N-1,j} & \cdots & x_{N-1,n} \\ x_{N,1} & \cdots & \cdots & x_{N,j} & x_{N,n-1} & x_{N,n} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

"Math Optimizer Accelerated" (*MopA*) adı verilen bir fonksiyon, başlatma işleminin ardından keşif ve sömürü görevlerini gerçekleştirmek için kullanılır. *MopA* Denklem (2.2) ile tanımlanır:

$$MopA(t) = Min + t \times \left(\frac{Max - Min}{t_{max}} \right) \quad (2.2)$$

Burada t mevcut iterasyonu, t_{max} maksimum iterasyon sayısını ve $MopA(t)$ mevcut iterasyonun fonksiyon değerini göstermektedir. Hızlandırılmış fonksiyonun minimum ve maksimum değerleri sırasıyla Min ve Max ile temsil edilir. Bu algoritmanın keşif aşaması $r_1 > MopA$ için gerçekleştirilir. Burada r_1 rastgele üretilen bir sayıyı temsil etmektedir. Keşif aşamasında Denklem (2.3) ile tanımlanan çarpma (*Mult*) ve bölme (*Div*) operatörleri kullanılır:

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} best(x_j) \times MopP \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & r_2 > 0.5 \\ best(x_j) \div (MopP + \epsilon) \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & r_2 < 0.5 \end{cases} \quad (2.3)$$

Burada i çözümünün mevcut iterasyondaki j . konumu $x_{i,j}(t)$ ile, i 'nin bir sonraki iterasyondaki çözümü $x_i(t+1)$ ile, en iyi çözümün j . konumu (o ana kadar elde edilen) $best(x_j)$ ile, ϵ küçük bir tam sayı ve μ arama sürecini ayarlayan bir kontrol parametresidir. Burada, UB_j ve LB_j sırasıyla j . konumun üst ve alt sınırlarını temsil

etmektedir. Ayrıca, " Math optimizer probability" fonksiyonu $MopP$ ile gösterilir ve Denklem (2.4) ile hesaplanır:

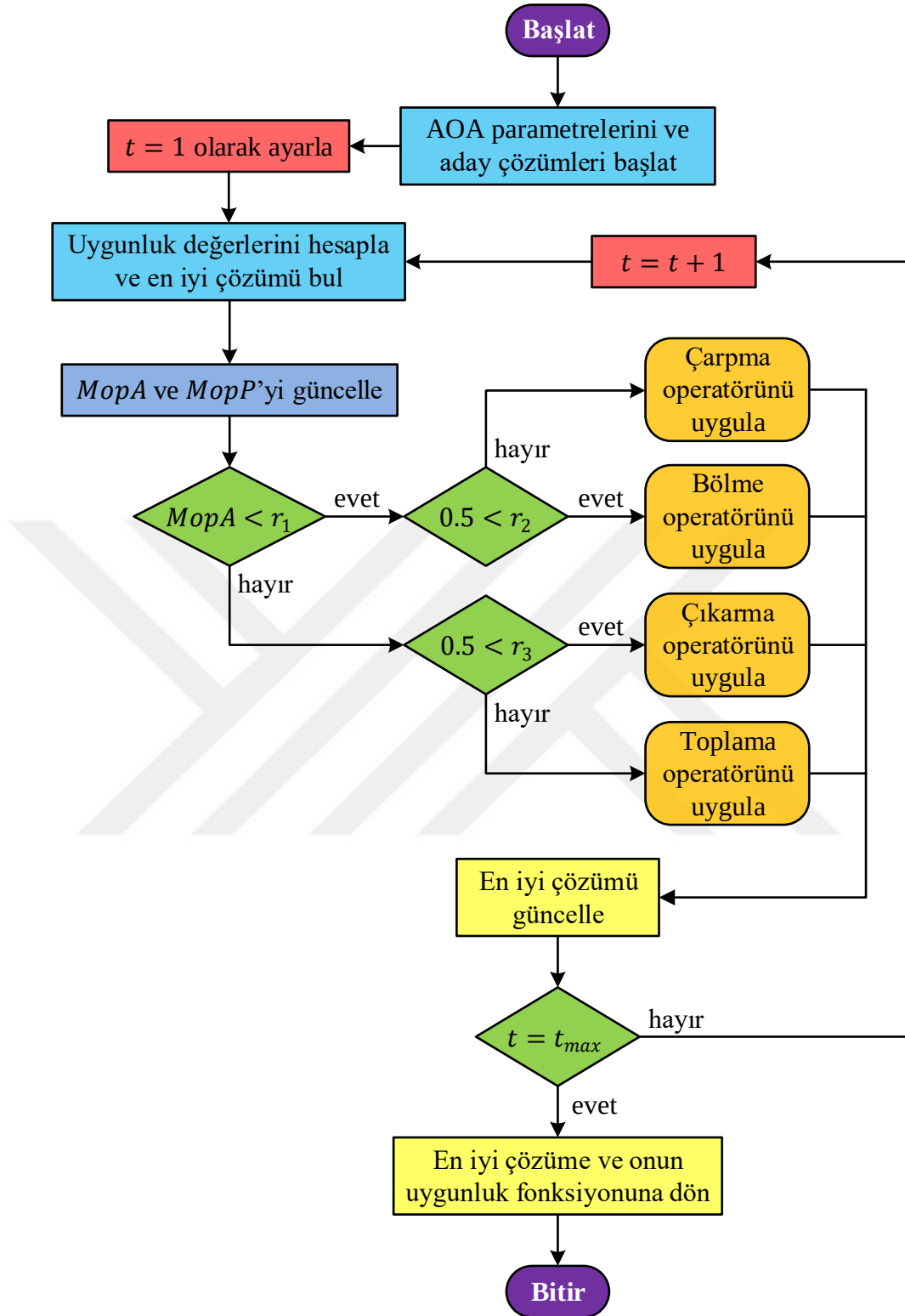
$$MopP(t) = 1 - \frac{(t)^{1/\alpha}}{(t_{max})^{1/\alpha}} \quad (2.4)$$

Burada α , iterasyonlar boyunca sömürü doğruluğunu temsil eder. r_2 terimi ise konum güncellemesi için kullanılan başka bir rastgele sayıyı temsil eder, öyle ki $r_2 > 0.5$ için konum güncellemesinde *Mult* operatörü, aksi halde *Div* operatörü kullanılır.

Öte yandan, $r_1 < MopA$ için sömürü aşaması gerçekleşir. Bu aşamada aşağıdaki tanım kullanılarak toplama (*Add*) ve çıkarma (*Sub*) operatörleri kullanılır.

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} best(x_j) + MopP \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & r_3 > 0.5 \\ best(x_j) - MopP \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & r_3 < 0.5 \end{cases} \quad (2.5)$$

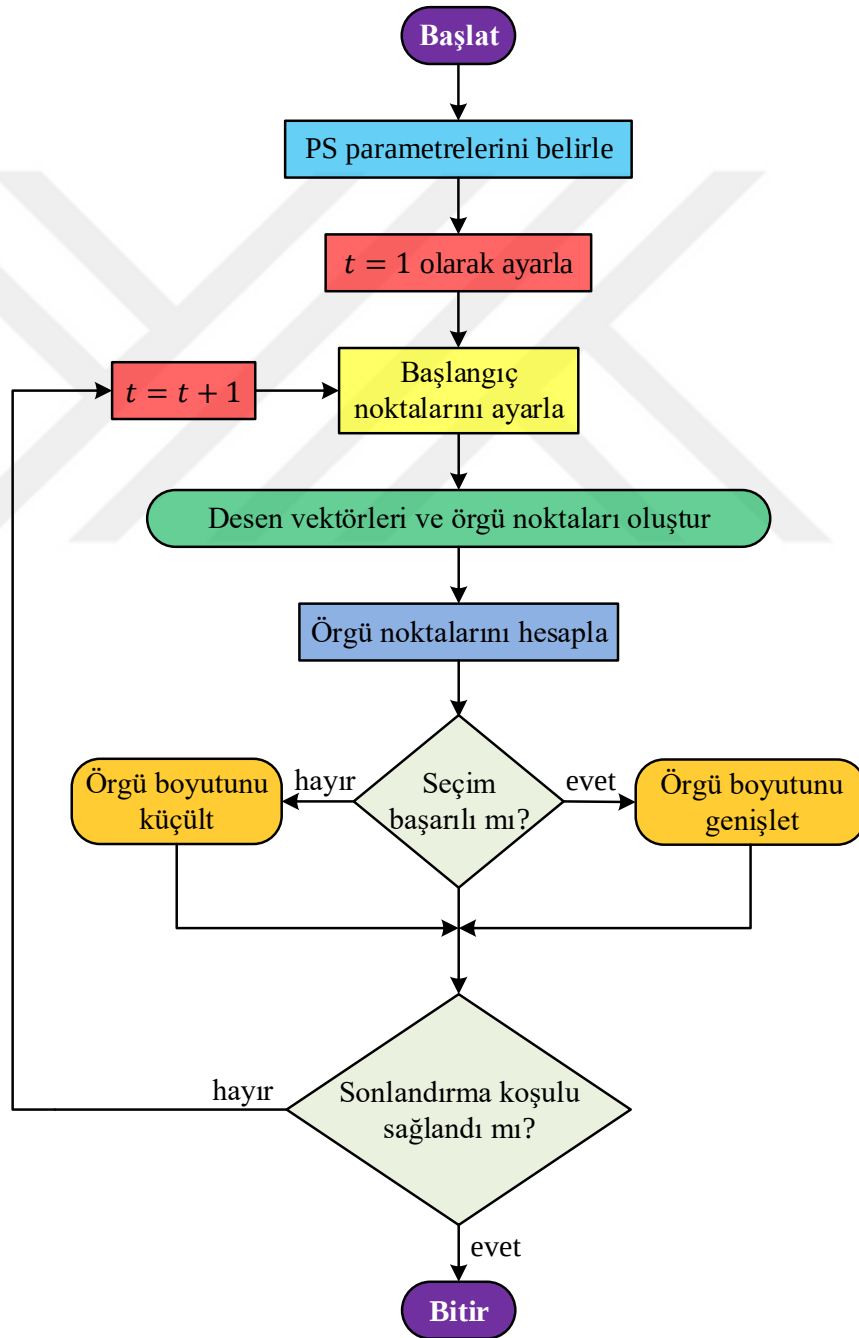
r_3 terimi, *Add* ve *Sub* işlemlerini belirleyen rastgele bir sayıdır. *Add* operatörü $r_3 > 0.5$ için, *Sub* ise $r_3 < 0.5$ için kullanılır. Şekil 2.1, AOA algoritmasının ayrıntılı bir akış şemasını sunmaktadır. Söz konusu AOA algoritması ve farklı varyantları farklı mühendislik sistemleri için kullanılmış olup, etkinliği geniş bir yelpaze de gösterilmiştir (Dahou vd., 2022; Ekinci, Izci, Al Nasar, vd., 2022; Fang vd., 2022; Izci, Ekinci, & Cetin, 2022; Izci, Ekinci, Eker, vd., 2021; Izci, Ekinci, Kayri, vd., 2022; Kaveh & Biabani Hamedani, 2022; Montano vd., 2022; Shi vd., 2023; R.-B. Wang vd., 2021).



Şekil 2.1. AOA tekniğine ilişkin akış diyagramı

3. DENGELİ ARİTMETİK OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

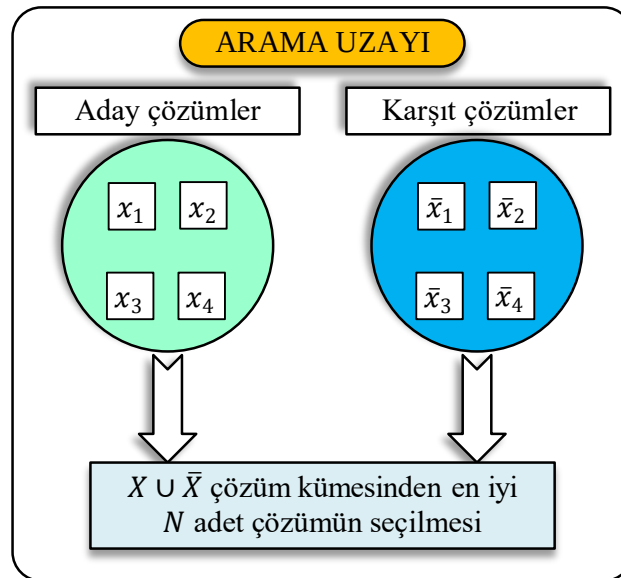
Örüntü arama (PS) algoritması, türevden bağımsız bir yapıya sahip olup iyi bir arama kabiliyetini barındırmaktadır (Lewis & Torczon, 1999). Bu sebeple farklı algoritmaların geliştirilmesi sürecinde kullanılmıştır (Ekinci, İzci, Eker, Abualigah, vd., 2023; Eslami vd., 2022; Koessler & Almomani, 2021; Taib & Bahreininejad, 2021). PS algoritmasının akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Örüntü arama algoritması akış diyagramı

İşleyiş olarak, PS algoritması tarafından optimum çözüme yakın olan veya olmayan bir dizi nokta oluşturulur. Mevcut bir nokta etrafında bir nokta koleksiyonu (ağ olarak da adlandırılır) oluşturulur ve bu ağda daha düşük bir amaç fonksiyonu değerine sahip yeni bir nokta bulunması durumunda bir sonraki iterasyonda güncellenir. PS algoritmasında kullanıcı bir başlangıç noktası (X_0) tanımlar ve algoritma aramaya bu noktadan başlar. İlk iterasyonda ağın boyutu 1 olarak kabul edilir ve yön (desen) vektörleri $X_0 + [0 \ 1]$, $X_0 + [1 \ 0]$, $X_0 + [-1 \ 0]$ ve $X_0 + [0 \ -1]$ olarak oluşturulur. Bu şekilde yeni örgü noktaları üretilir. Daha sonra, üretilen noktalar için amaç fonksiyonları hesaplanır. İkinci prosedür X_0 'dan daha küçük bir değer bulunana kadar devam eder. Eğer daha küçük bir değer bulunursa, $f(X_1) < f(X_0)$, (başarılı yoklama), ilgili nokta kaynak noktası olarak belirlenir. Başarılı yoklamadan sonra, PS algoritması mevcut ağ boyutunu 2 ile çarparak (genişleterek) ikinci iterasyonu gerçekleştirir, böylece aşağıdaki gibi yeni noktalar oluşturulur: $X_1 + 2 \times [0 \ 1]$, $X_1 + 2 \times [1 \ 0]$, $X_1 + 2 \times [-1 \ 0]$ ve $X_1 + 2 \times [0 \ -1]$. Daha düşük amaç fonksiyonuna sahip daha yeni bir nokta elde edilirse genişleme aşaması devam eder. Aksi takdirde, ağ boyutu 0,5 (küçültme faktörü) ile çarpılarak küçültülür (daraltılır). Genel süreç, sonlandırma koşulu karşılanana kadar devam eder.

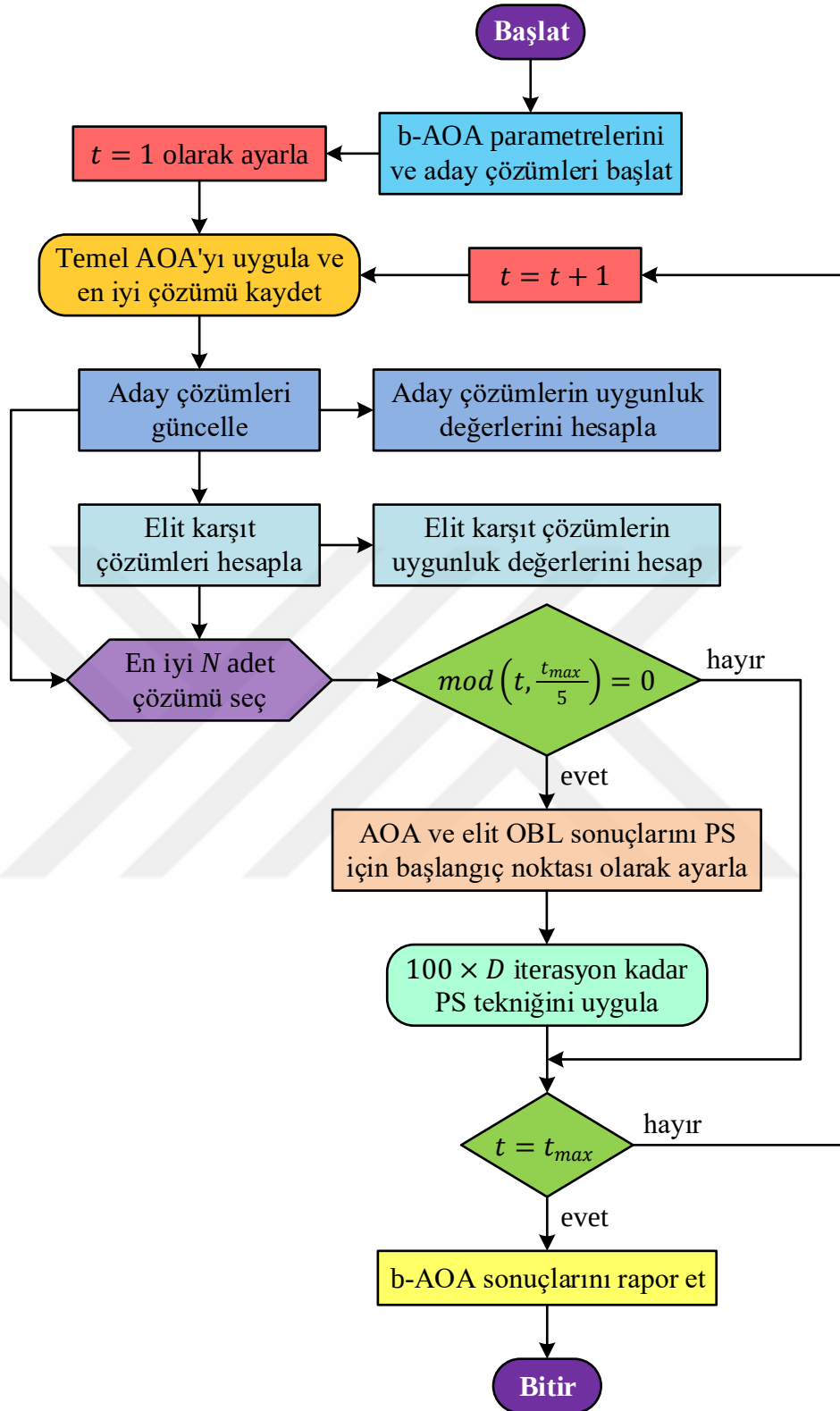
Şekil 3.2'de OBL mekanizmasının şeması gösterilmektedir. Karşıt tabanlı öğrenme (OBL) (Tizhoosh, 2005), meta-sezgisel algoritmaların performansını artırmak için bir makine öğrenme tekniği olarak kullanılmakta olup literatürde farklı varyantlarına denk gelmek mümkündür (Izci, Ekinci, Eker, vd., 2022; Long vd., 2019; H. Wang vd., 2011).



Şekil 3.2. Karşıt tabanlı öğrenme şeması

Elit OBL (EOBL) ise OBL mekanizmasının özel bir türü olarak önerilmiş olup farklı problemlerin çözümü için meta-sezgisel algoritmalara entegre edilmiştir (Ekinci, Izci, Abualigah, vd., 2023; Mehta vd., 2023; Yildiz vd., 2021). OBL tekniğinde, daha iyi keşfe ulaşmak için mevcut arama ajanları ve karşıtları aynı anda dikkate alınırken, EOBL stratejisi elit (en iyi) bireyleri mevcut bireylerle birlikte dikkate alır ve uygunluk değerlerini değerlendirmek için elit arama ajanlarının karşıt çözümlerini üretir. EOBL stratejisini matematiksel olarak açıklamak için, $X = \langle x_1, x_2 \dots, x_k \rangle$ 'yi k karar değişkenine sahip elit bir aday çözüm olarak varsayalım. Ardından, elit OBL tabanlı çözümü (X^o) tanımlamak için $X^o = \langle x_1^o, x_2^o \dots, x_k^o \rangle$ ifadesi kullanılabilir. Burada $x_i^o = \delta(da_i + db_i) - x_i$ ve δ karşıt tabanın büyüklüğünü kontrol etmek için kullanılan (0, 1) değerlerinde bir parametredir. Dinamik sınırlar da_i ve db_i ile temsil edilir. Bu sınırlar $da_i = \min(x_i)$, $db_i = \max(x_i)$ şeklinde tanımlanır. Karşıt bir karar değişkeninin $[Lb_i, Ub_i]$ sınırlarını aşmasını önlemek için, EOBL stratejisinde şu kural da kullanılır; $x_i^o = rand(Lb_i, Ub_i)$, eğer $x_i^o < Lb_i$ ya da $x_i^o > Ub_i$. Burada $rand(Lb_i, Ub_i)$, (Lb_i, Ub_i) içindeki rastgele bir sayıyı ifade eder.

Önerilen dengeli AOA (b-AOA) algoritması için daha iyi bir keşif ve sömürü kabiliyetine ulaşmak adına, AOA algoritmasının orijinal yapısı EOBL stratejisi ve PS algoritması yardımıyla geliştirilmiştir. Önerilen b-AOA algoritması, daha fazla keşif gücüne ulaşmak için EOBL stratejisini kullanırken, PS algoritması gelişmiş sömürü ile ona yardımcı olur. Şekil 3.3, önerilen b-AOA algoritmasının ayrıntılı bir akış şemasını sunmaktadır. İlgili akış şemasından görülebileceği gibi, b-AOA algoritması orijinal AOA algoritması ile başlar ve en iyi çözümü üretir ve daha sonra EOBL stratejisinin entegrasyonu ile değerlendirilir. Burada N adet en iyi çözüm elde edilmekte ve PS algoritması daha iyi sömürüye ulaşmak için devreye girmektedir. Bununla birlikte, PS'nin her iterasyonda çalıştırılması yerine, toplamda 5 kez çalıştırıldığını ve $100 \times D$ iterasyon boyunca çalıştığını belirtmek gerekir. Burada, D problemin boyutunu temsil etmektedir. Söz konusu bu konfigürasyona kapsamlı simülasyonlardan sonra karar verilmiştir. Bu şekilde, AOA algoritmasının yeteneği önemli ölçüde artırılmıştır.



Şekil 3.3. Önerilen b-AOA akış diyagramı

4. KULLANILAN TEST FONKSİYONLARI VE ÖZELLİKLERİ

Bu tez çalışmasında algoritmanın genel kabiliyetini göstermek için üç farklı (tek modlu, çok modlu ve sabit boyutlu) özelliğe sahip 23 adet test fonksiyonu kullanılmıştır. Bu test fonksiyonları aşağıdaki alt bölümlerde detaylıca açıklanmaktadır.

4.1. Tek Modlu Test Fonksiyonları

4.1.1. Sphere Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.1) ile ifade edilmektedir.

$$Func_1 = \sum_{i=1}^{Dim} x_i^2 \quad (4.1)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -100$ ve üst sınır ise $UB = 100$ 'dür. Sphere tek modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.1.2. Schwefel 2.2 Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.2) ile ifade edilmektedir.

$$Func_2 = \sum_{i=1}^{Dim} |x_i| + \prod_{i=1}^{Dim} |x_i| \quad (4.2)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -10$ ve üst sınır ise $UB = 10$ 'dür. Schwefel 2.2 tek modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.1.3. Schwefel 1.2 Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.3) ile ifade edilmektedir.

$$Func_3 = \sum_{i=1}^{Dim} \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2 \quad (4.3)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -100$ ve üst sınır ise $UB = 100$ 'dür. Schwefel 1.2 tek modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.1.4. Schwefel 2.21 Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.4) ile ifade edilmektedir.

$$Func_4 = \max_i \{|x_i|, 1 \leq i \leq Dim\} \quad (4.4)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -100$ ve üst sınır ise $UB = 100$ 'dür. Schwefel 2.21 tek modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.1.5. Rosenbrock Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.5) ile ifade edilmektedir.

$$Func_5 = \sum_{i=1}^{Dim-1} (100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2) \quad (4.5)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -30$ ve üst sınır ise $UB = 30$ 'dür. Rosenbrock tek modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.1.6. Step Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.6) ile ifade edilmektedir.

$$Func_6 = \sum_{i=1}^{Dim} (x_i + 0.5)^2 \quad (4.6)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -100$ ve üst sınır ise $UB = 100$ 'dür. Step tek modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.1.7. Quartic Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.7) ile ifade edilmektedir.

$$Func_7 = \sum_{i=1}^{Dim} ix_i^4 + random[0, 1) \quad (4.7)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -1.28$ ve üst sınır ise $UB = 1.28$ 'dür. Quartic tek modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.2. Çok Modlu Test Fonksiyonları

4.2.1. Schwefel Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.8) ile ifade edilmektedir.

$$Func_8 = - \sum_{i=1}^{Dim} \left(x_i \sin(\sqrt{|x_i|}) \right) \quad (4.8)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -500$ ve üst sınır ise $UB = 500$ 'dür. Schwefel çok modlu fonksiyonunun optimal değeri $-1.2569E+04$ 'tür.

4.2.2. Rastrigin Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.9) ile ifade edilmektedir.

$$Func_9 = \sum_{i=1}^{Dim} [10 + x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)] \quad (4.9)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -5.12$ ve üst sınır ise $UB = 5.12$ 'dür. Rastrigin çok modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.2.3. Ackley Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.10) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{10} = 20 + e - 20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{Dim} \sum_{i=1}^{Dim} x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{Dim} \sum_{i=1}^{Dim} \cos(2\pi x_i) \right) \quad (4.10)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -32$ ve üst sınır ise $UB = 32$ 'dür. Ackley çok modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.2.4. Griewank Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.11) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{11} = \sum_{i=1}^{Dim} \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^{Dim} \cos \left(\frac{x_i}{\sqrt{i}} \right) + 1 \quad (4.11)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -600$ ve üst sınır ise $UB = 600$ 'dür. Griewank çok modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.2.5. Penalized Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.12) ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
Func_{12} = \frac{\pi}{Dim} & \left\{ 10 \sin^2(\pi y_1) \right. \\
& + \sum_{i=1}^{Dim-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})] \\
& \left. + (y_{Dim} - 1)^2 \right\} + \sum_{i=1}^{Dim} u(x_i, 10, 100, 4)
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -50$ ve üst sınır ise $UB = 50$ 'dür. Penalized çok modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.2.6. Penalized2 Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.13) ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
Func_{13} = 0.1 & \left\{ \sin^2(3\pi x_1) \right. \\
& + \sum_{i=1}^{Dim-1} (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_{i+1})] + (x_{Dim} - 1)^2 [1 \\
& \left. + \sin^2(2\pi x_{Dim})] \right\} + \sum_{i=1}^{Dim} u(x_i, 5, 100, 4)
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 30$, her değişken için alt sınır $LB = -50$ ve üst sınır ise $UB = 50$ 'dür. Penalized2 çok modlu fonksiyonunun optimal değeri 0'dır.

4.3. Sabit Boyutlu Test Fonksiyonları

4.3.1. Foxholes Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.14) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{14} = \frac{1}{\left(\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6} \right)} \quad (4.14)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 2$, her değişken için alt sınır $LB = -65.536$ ve üst sınır ise $UB = 65.536$ 'dür. Foxholes sabit boyutlu çok modlu fonksiyonunun optimal değeri 0.998'dir.

4.3.2. Kowalik Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.15) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{15} = \sum_{i=1}^{11} \left[a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_3 + x_4} \right]^2 \quad (4.15)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 4$, her değişken için alt sınır $LB = -5$ ve üst sınır ise $UB = 5$ 'dür. Kowalik sabit boyutlu çok modlu fonksiyonunun optimal değeri 3.0749E-04'tür.

4.3.3. Six-Hump Camel Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.16) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{16} = 4x_1^2 - 2.1x_1^4 + \frac{1}{3}x_1^6 + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4 \quad (4.16)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 2$, her değişken için alt sınır $LB = -5$ ve üst sınır ise $UB = 5$ 'dür. Six-Hump Camel sabit boyutlu çok modlu fonksiyonunun optimal değeri -1.0316'dir.

4.3.4. Branin Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.17) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{17} = 10 \left(1 - \frac{1}{8\pi} \right) \cos x_1 + 10 + \left(x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2} x_1^2 + \frac{5}{\pi} x_1 - 6 \right)^2 \quad (4.17)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 2$, x_1 değişkeni için alt ve üst sınırlar sırasıyla $LB = -5$ ve $UB = 10$ ve x_2 değişkeni için alt ve üst sınırlar sırasıyla $LB = 0$ ve $UB = 15$ 'dir. Branin sabit boyutlu çok modlu fonksiyonunun optimal değeri 0.39789'dir.

4.3.5. Goldstein-Price Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.18) ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} Func_{18} = & [30 + (2x_1 - 3x_2)^2 \\ & \times (18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)] \\ & \times [1 \\ & + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 \\ & + 3x_2^2)] \end{aligned} \quad (4.18)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 2$, her değişken için alt sınır $LB = -2$ ve üst sınır ise $UB = 2$ 'dir. Goldstein-Price sabit boyutlu çok modlu fonksiyonunun optimal değeri 3'tür.

4.3.6. Hartman 3 Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.19) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{19} = - \sum_{i=1}^4 c_i \exp \left(- \sum_{j=1}^3 a_{ij} (x_j - p_{ij})^2 \right) \quad (4.19)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 3$, her değişken için alt sınır $LB = 0$ ve üst sınır ise $UB = 1$ 'dir. Hartman 3 sabit boyutlu çok modlu fonksiyonunun optimal değeri -3.8628 'dir.

4.3.7. Hartman 6 Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.20) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{20} = - \sum_{i=1}^4 c_i \exp \left(- \sum_{j=1}^6 a_{ij} (x_j - p_{ij})^2 \right) \quad (4.20)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 6$, her değişken için alt sınır $LB = 0$ ve üst sınır ise $UB = 1$ 'dir. Hartman 6 sabit boyutlu çok modlu fonksiyonunun optimal değeri -3.322 'dir.

4.3.8. Shekel 5 Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.21) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{21} = - \sum_{i=1}^5 \frac{1}{(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i} \quad (4.21)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 4$, her değişken için alt sınır $LB = 0$ ve üst sınır ise $UB = 10$ 'dur. Shekel 5 sabit boyutlu çok modlu fonksiyonunun optimal değeri -10.1532 'dir.

4.3.9. Shekel 7 Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.22) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{22} = - \sum_{i=1}^7 \frac{1}{(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i} \quad (4.22)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 4$, her değişken için alt sınır $LB = 0$ ve üst sınır ise $UB = 10$ 'dur. Shekel 7 sabit boyutlu çok modlu fonksiyonunun optimal değeri -10.4029 'dur.

4.3.10. Shekel 10 Fonksiyonu

Bu fonksiyon, Denklem (4.23) ile ifade edilmektedir.

$$Func_{23} = - \sum_{i=1}^{10} \frac{1}{(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i} \quad (4.23)$$

Fonksiyonun boyutu (değişken sayısı) $Dim = 4$, her değişken için alt sınır $LB = 0$ ve üst sınır ise $UB = 10$ 'dur. Shekel 10 sabit boyutlu çok modlu fonksiyonunun optimal değeri -10.5364 'tür.



5. İSTATİSTİKİ PERFORMANS ANALİZİ

5.1. Karşılaştırma için Kullanılan Sezgisel-üstü Algoritmalar

Adil koşullar altında, SCA (Mirjalili, 2016), INFO (Ahmadianfar vd., 2022), MPA (Faramarzi vd., 2020), AOA (Abualigah vd., 2021) ve b-AOA (Özmen vd., 2023) algoritmaları 30 kez bağımsız şekilde koşturulmuştur. Tüm algoritmalara ilişkin popülasyon büyüklükleri, maksimum iterasyon sayıları ve diğer parametrelerinin değerleri Tablo 5.1’de listelenmiştir.

Tablo 5.1. Test fonksiyonları optimizasyonu için algoritmaların parametre ayarları

Algoritmalar	Popülasyon büyüklüğü	Maksimum iterasyon sayısı	Diğer parametrelerin değerleri
SCA	30	500	$A = 2$
INFO	30	500	$c = 2, d = 4$
MPA	30	500	$FADs = 0.2, P = 0.5$
AOA	30	500	$\alpha = 5, \mu = 0.4975, Min = 0.2, Max = 1$
b-AOA	30	500	$\alpha = 5, \mu = 0.4975, Min = 0.2, Max = 1$, ilk ağ boyutu = 1, ağ genişleme faktörü = 2, ağ daralma faktörü = 0.5, tüm toleranslar = 10^{-6}

5.2. Tek Modlu Test Fonksiyonlarından Elde Edilen İstatistikî Sonuçlar

Önerilen b-AOA algoritmasının performansı ilk olarak keşif ve sömürü yetenekleri açısından test edilmiştir. Tek modlu kıyaslama fonksiyonları ($Func_1$ - $Func_7$) sömürü değerlendirmesi için kullanılabilir. Tablo 5.2, b-AOA algoritmasının tek modlu kıyaslama fonksiyonlarına karşı diğer bazı güncel algoritmalara göre istatistiksel performansını vermektedir. Bu tablodan da görülebileceği gibi, önerilen b-AOA algoritması karşılaştırılan diğer algoritmalarından daha iyi performans göstermektedir. Bu sonuçlar, b-AOA algoritmasının sömürü açısından üstün yeteneğini göstermektedir.

Tablo 5.2. Tek modlu test fonksiyonlarına ait istatistiki sonuçlar

Fonksiyon	Algoritma	Ortalama	Standart sapma	En iyi	En kötü
<i>Func₁</i>	SCA	16.537	36.426	9.5633E-06	175.47
	INFO	1.0185E-53	4.997E-54	3.3545E-55	2.0178E-53
	MPA	4.0116E-23	6.3963E-23	3.6461E-25	2.7727E-22
	AOA	0.00029656	0.0011413	3.9226E-38	0.0060134
	b-AOA	0	0	0	0
<i>Func₂</i>	SCA	0.021241	0.031567	0.00013767	0.13042
	INFO	1.0943E-26	3.6605E-27	4.7283E-27	1.9892E-26
	MPA	2.6444E-13	2.8514E-13	8.2406E-15	1.2622E-12
	AOA	2.8674E-186	0	9.6235E-296	8.6022E-185
	b-AOA	8.5996E-241	0	4.333E-320	2.2954E-239
<i>Func₃</i>	SCA	8640.8	4939.5	1709.5	20103
	INFO	1.4606E-50	1.1602E-50	8.6654E-52	3.9712E-50
	MPA	9.9612E-05	0.00022346	7.2658E-09	0.001186
	AOA	1.6011	3.3816	1.3815E-07	16.177
	b-AOA	0	0	0	0
<i>Func₄</i>	SCA	37.033	13.087	12.166	61.964
	INFO	2.1028E-27	1.4215E-27	3.5852E-28	7.4954E-27
	MPA	2.7542E-09	1.5152E-09	3.1553E-10	6.0257E-09
	AOA	0.15416	0.094877	0.014632	0.36318
	b-AOA	9.0422E-244	0	1.2808E-253	2.6479E-242
<i>Func₅</i>	SCA	1.3673E+05	3.2682E+05	107.54	1175700
	INFO	22.585	0.51711	21.298	23.462
	MPA	25.268	0.45451	24.487	26.042
	AOA	28.693	0.27549	27.902	29.18
	b-AOA	0.61615	1.8814	3.0737E-09	6.3967
<i>Func₆</i>	SCA	14.254	13.542	4.7191	55.025
	INFO	1.2654E-08	3.7987E-08	3.9266E-11	2.07E-07
	MPA	4.1868E-08	2.2575E-08	1.3296E-08	1.2965E-07
	AOA	3.7524	0.33331	3.0561	4.4582
	b-AOA	2.4395E-12	9.2009E-13	1.086E-12	5.8521E-12
<i>Func₇</i>	SCA	0.099158	0.090509	0.0085847	0.44986
	INFO	0.0015937	0.0012634	0.00017227	0.0049221
	MPA	0.0013495	0.00060352	0.00041966	0.0026601
	AOA	9.4896E-05	7.1313E-05	2.0672E-06	0.00029718
	b-AOA	3.629E-05	2.8489E-05	6.8524E-07	0.00010771

5.3. Çok Modlu Test Fonksiyonlarından Elde Edilen İstatistiki Sonuçlar

Tablo 5.3, çok modlu kıyaslama fonksiyonlarına (*Func₈-Func₁₃*) karşı karşılaştırmalı istatistiksel performansı sunmaktadır. Bu tip kıyaslama fonksiyonları keşif kabiliyetini değerlendirmek için kullanılabilir. Tablo 5.3'teki sayısal sonuçlardan da görüldüğü üzere, önerilen b-AOA algoritması çok modlu kıyaslama fonksiyonları için de en iyi veya optimal çözümlere ulaşarak keşif açısından daha yüksek performans sergilediğini göstermektedir.

Tablo 5.3. Çok modlu test fonksiyonlarına ait istatistiki sonuçlar

Fonksiyon	Algoritma	Ortalama	Standart sapma	En iyi	En kötü
<i>Func₈</i>	SCA	-3848.4	286.86	-4371	-3283.7
	INFO	-8630.7	700.38	-9763.3	-7101.2
	MPA	-8736.9	438.15	-9687.9	-7946.9
	AOA	-7980.7	446.84	-9196.5	-7230.3
	b-AOA	-12536	172.87	-12569	-11623
<i>Func₉</i>	SCA	29.308	30.189	0.13996	122.46
	INFO	0	0	0	0
	MPA	0	0	0	0
	AOA	0	0	0	0
	b-AOA	0	0	0	0
<i>Func₁₀</i>	SCA	14.208	8.3212	0.043401	20.382
	INFO	8.8818E-16	0	8.8818E-16	8.8818E-16
	MPA	1.7196E-12	1.1519E-12	2.7045E-13	5.8482E-12
	AOA	8.8818E-16	0	8.8818E-16	8.8818E-16
	b-AOA	8.8818E-16	0	8.8818E-16	8.8818E-16
<i>Func₁₁</i>	SCA	0.84569	0.41164	0.23545	1.9083
	INFO	0	0	0	0
	MPA	0	0	0	0
	AOA	194.12	65.896	72.408	323.52
	b-AOA	0	0	0	0
<i>Func₁₂</i>	SCA	52428	1.5261E+05	1.0947	614430
	INFO	1.4456E-09	2.8117E-09	5.3463E-12	1.1459E-08
	MPA	0.00014286	0.0005059	2.4157E-09	0.0023059
	AOA	0.29154	0.053809	0.14538	0.43947
	b-AOA	2.1943E-13	1.5539E-13	5.0331E-14	6.0379E-13
<i>Func₁₃</i>	SCA	1.0872E+05	2.7869E+05	2.2042	1305400
	INFO	0.063752	0.14273	3.2034E-10	0.69157
	MPA	0.012215	0.036876	2.8969E-08	0.19763
	AOA	2.4484	0.16915	2.1217	2.8078
	b-AOA	3.1668E-12	2.4141E-12	7.6907E-13	9.0849E-12

5.4. Sabit Boyutlu Test Fonksiyonlarının İstatistiki Sonuçları

Önerilen b-AOA algoritmasının çözüm kalitesini değerlendirmek için sabit boyutlu kıyaslama fonksiyonları (*Func₁₄*-*Func₂₃*) da kullanılmıştır. Tablo 5.4, sabit boyutlu kıyaslama fonksiyonları için karşılaştırmalı sayısal sonuçları listelemektedir. Bu tablodan da görülebileceği gibi, önerilen b-AOA algoritması çözüm kalitesi açısından da oldukça yeteneklidir, çünkü diğer güncel algoritmalarla kıyasla en iyi veya optimal çözümlere ulaşmıştır.

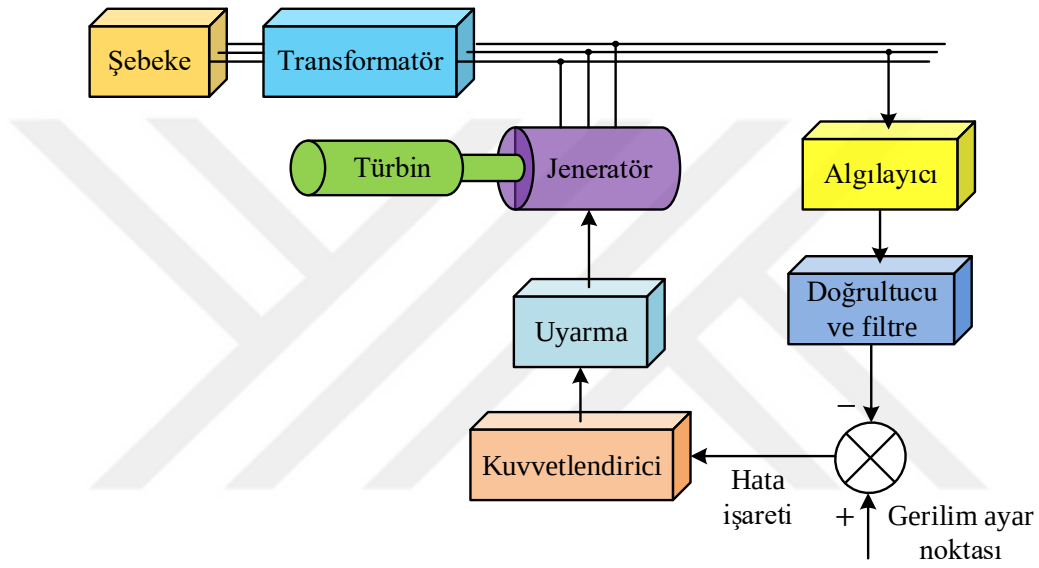
Tablo 5.4. Sabit boyutlu test fonksiyonlarına ait istatistiki sonuçlar

Fonksiyon	Algoritma	Ortalama	Standart sapma	En iyi	En kötü
<i>Func₁₄</i>	SCA	1.795	0.9859	0.998	2.9821
	INFO	2.1111	2.5903	0.998	10.763
	MPA	0.998	1.515E-16	0.998	0.998
	AOA	8.3696	3.2389	0.998	12.671
	b-AOA	0.998	1.5701E-17	0.998	0.998
<i>Func₁₅</i>	SCA	0.0010661	0.00037002	0.0005829	0.0015477
	INFO	0.0024352	0.0060863	0.00030749	0.020363
	MPA	0.00030749	4.3122E-15	0.00030749	0.00030749
	AOA	0.015417	0.025604	0.00037189	0.11249
	b-AOA	0.00030749	1.4923E-15	0.00030749	0.00030749
<i>Func₁₆</i>	SCA	-1.0316	3.7905E-05	-1.0316	-1.0315
	INFO	-1.0316	6.5843E-16	-1.0316	-1.0316
	MPA	-1.0316	4.4024E-16	-1.0316	-1.0316
	AOA	-1.0316	6.0816E-07	-1.0316	-1.0316
	b-AOA	-1.0316	1.9902E-16	-1.0316	-1.0316
<i>Func₁₇</i>	SCA	0.40026	0.0023543	0.39797	0.40949
	INFO	0.39789	0	0.39789	0.39789
	MPA	0.39789	9.5078E-15	0.39789	0.39789
	AOA	0.40987	0.009864	0.39844	0.43767
	b-AOA	0.39789	0	0.39789	0.39789
<i>Func₁₈</i>	SCA	3	5.4359E-05	3	3.0002
	INFO	3	8.6883E-16	3	3
	MPA	3	2.1709E-15	3	3
	AOA	6.6	9.3351	3	30
	b-AOA	3	0	3	3
<i>Func₁₉</i>	SCA	-3.8547	0.0024361	-3.861	-3.8495
	INFO	-3.8628	2.6823E-15	-3.8628	-3.8628
	MPA	-3.8628	2.4945E-15	-3.8628	-3.8628
	AOA	-3.8523	0.0038518	-3.8593	-3.842
	b-AOA	-3.8628	2.4116E-15	-3.8628	-3.8628
<i>Func₂₀</i>	SCA	-2.8784	0.34163	-3.1199	-1.6747
	INFO	-3.2784	0.058273	-3.322	-3.2031
	MPA	-3.322	1.7554E-11	-3.322	-3.322
	AOA	-3.0471	0.091025	-3.1762	-2.8234
	b-AOA	-3.322	2.1608E-13	-3.322	-3.322
<i>Func₂₁</i>	SCA	-2.6202	2.0715	-7.8686	-0.49728
	INFO	-9.1039	2.4723	-10.153	-2.6305
	MPA	-10.153	4.1471E-11	-10.153	-10.153
	AOA	-3.5023	1.1997	-6.0307	-1.8035
	b-AOA	-10.153	7.6605E-13	-10.153	-10.153
<i>Func₂₂</i>	SCA	-3.2023	1.8303	-5.9956	-0.52105
	INFO	-9.0488	2.7774	-10.403	-2.7659
	MPA	-10.403	5.9857E-11	-10.403	-10.403
	AOA	-3.5619	1.2118	-6.8762	-1.4002
	b-AOA	-10.403	1.1144E-12	-10.403	-10.403
<i>Func₂₃</i>	SCA	-3.7421	1.7935	-6.1434	-0.94135
	INFO	-9.0039	3.151	-10.536	-2.4217
	MPA	-10.536	2.5368E-11	-10.536	-10.536
	AOA	-3.8733	1.6156	-6.5892	-1.5825
	b-AOA	-10.536	3.2315E-12	-10.536	-10.536

6. OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖR (AVR) SİSTEMİ

6.1. AVR Sisteminin Modellenmesi ve Sistem Bileşenleri

Bir AVR sistemini modellemek için amplifikatör(kuvvetlendirici), uyarıcı, generatör ve sensör olarak adlandırılan dört bileşen kullanılır. AVR sistemini modellemek için ana bileşenler doğrusallaştırılarak transfer fonksiyonu elde edilebilir. Bir AVR sisteminin tipik bir şematik diyagramı (dört ana bileşen dâhil) Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Tipik bir AVR sisteminin şematik gösterimi

Söz konusu bu bileşenlerin (amplifikatör, uyarıcı, generatör ve sensör) transfer fonksiyonları sırası ile denklem (6.1), (6.2), (6.3) ve (6.4)' de verilmiştir.

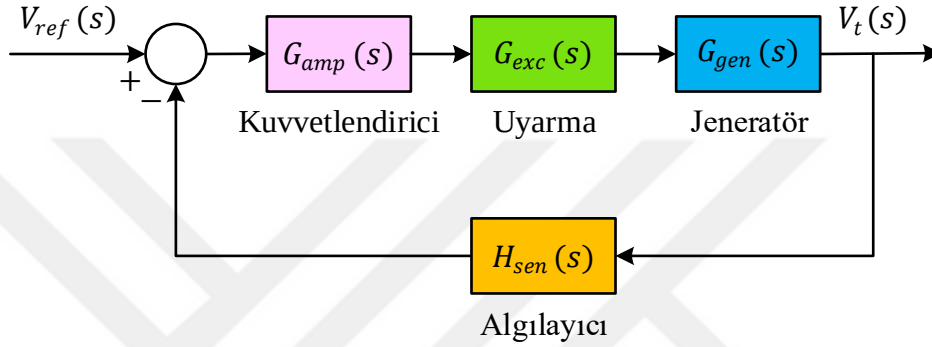
$$G_{amp} = \frac{K_{amp}}{1 + sT_{amp}} \quad (6.1)$$

$$G_{exc} = \frac{K_{exc}}{1 + sT_{exc}} \quad (6.2)$$

$$G_{gen} = \frac{K_{gen}}{1 + sT_{gen}} \quad (6.3)$$

$$H_{sen} = \frac{K_{sen}}{1 + sT_{sen}} \quad (6.4)$$

Bu bileşenlerin ilgili parametre aralıkları $10 \leq K_{amp} \leq 40$ ve $0.02 \leq T_{amp} \leq 0.1$; $1 \leq K_{exc} \leq 10$ ve $0.4 \leq T_{exc} \leq 1$; $0.7 \leq K_{gen} \leq 1$ ve $1 \leq T_{gen} \leq 2$; $0.9 \leq K_{sen} \leq 1.1$ ve $0.001 \leq T_{sen} \leq 0.06$ olarak ayarlanmıştır. Bunun yanı sıra $K_{amp} = 10$, $T_{amp} = 0.1$ s, $K_{exc} = 1$, $T_{exc} = 0.4$ s, $K_{gen} = 1$, $T_{gen} = 1$ s, $K_{sen} = 1$ ve $T_{sen} = 0.01$ s değerleri de daha önce rapor edilen çalışmalar ile adil bir karşılaştırma sağlamak için seçilmiştir (Hekimoğlu, 2019; Izci, Ekinci, Zeynelgil, vd., 2021; Mosaad vd., 2019; Sahib, 2015). Şekil 6.2, kontrolsüz bir AVR sistemini göstermektedir.



Şekil 6.2. Kontrolör içermeyen AVR sistemi

Söz konusu şekilde verilen bu sistem ve bahsi geçen ilgili değerler dikkate alındığında, kontrolsüz bir AVR sisteminin transfer fonksiyonu Denklem (6.5) ile elde edilebilir.

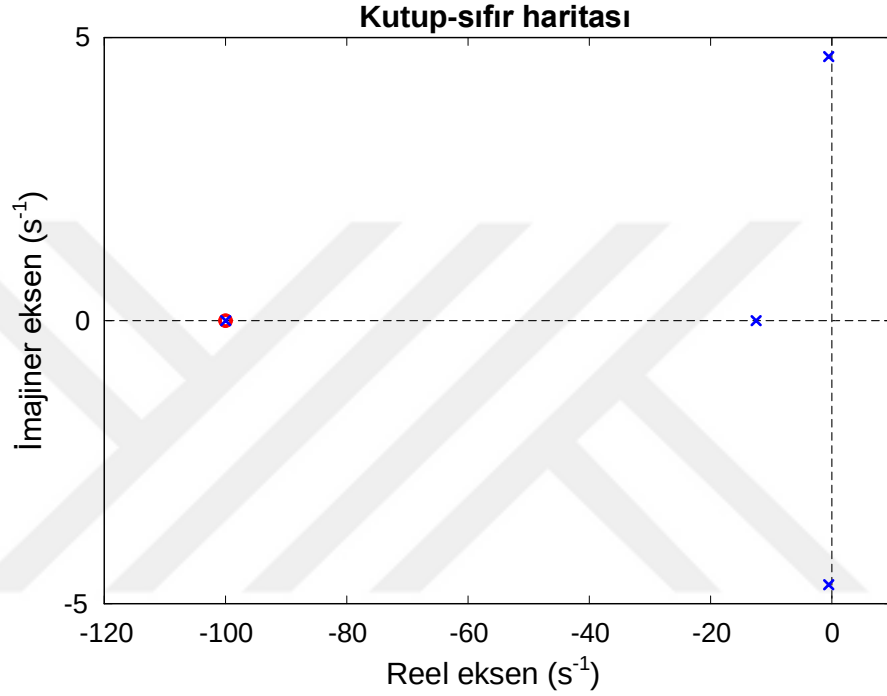
$$\begin{aligned}
 T_{kontrolsüz}(s) &= \frac{G_{amp}(s)G_{exc}(s)G_{gen}(s)}{1 + G_{amp}(s)G_{exc}(s)G_{gen}(s)H_{sen}(s)} \\
 &= \frac{0.1s + 10}{0.0004s^4 + 0.0454s^3 + 0.555s^2 + 1.51s + 11}
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

6.2. Kontrolsüz AVR Sisteminin Kutup-Sıfır Haritası Analizi

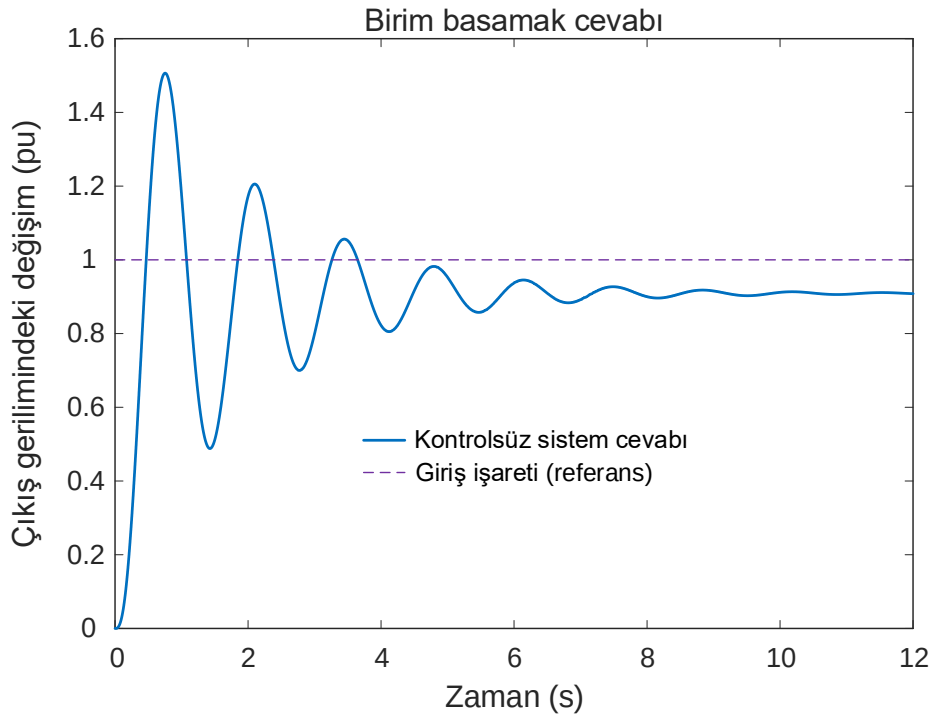
Kontrol içermeyen AVR sisteminin kutup-sıfır haritası Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Sistemin kutupları -99.9712 , -12.4892 ve $-0.5198 \pm 4.6642i$ ve sıfırları ise sadece -100 'dür. Karmaşık kutuplara ilişkin sönüm oranı çok düşük (%11.1) olduğu için kontrolsüz sistemin performans iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

6.3. Kontrolsüz AVR Sisteminin Zaman Cevabı Analizi

Kontrolsüz AVR sisteminin birim basamak cevabı Şekil 6.4'te gösterilmiştir. İlgili sistemin maksimum aşımı %65.7226, yükselme zamanı 0.2607 s, yerleşme zamanı 6.9865 s ve tepe zamanı ise 0.7522 s'dir. Bu değerler bir güç sistemi için oldukça büyüktür ve önerilen kontrolör yaklaşımıyla AVR sisteminin performansının iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir.



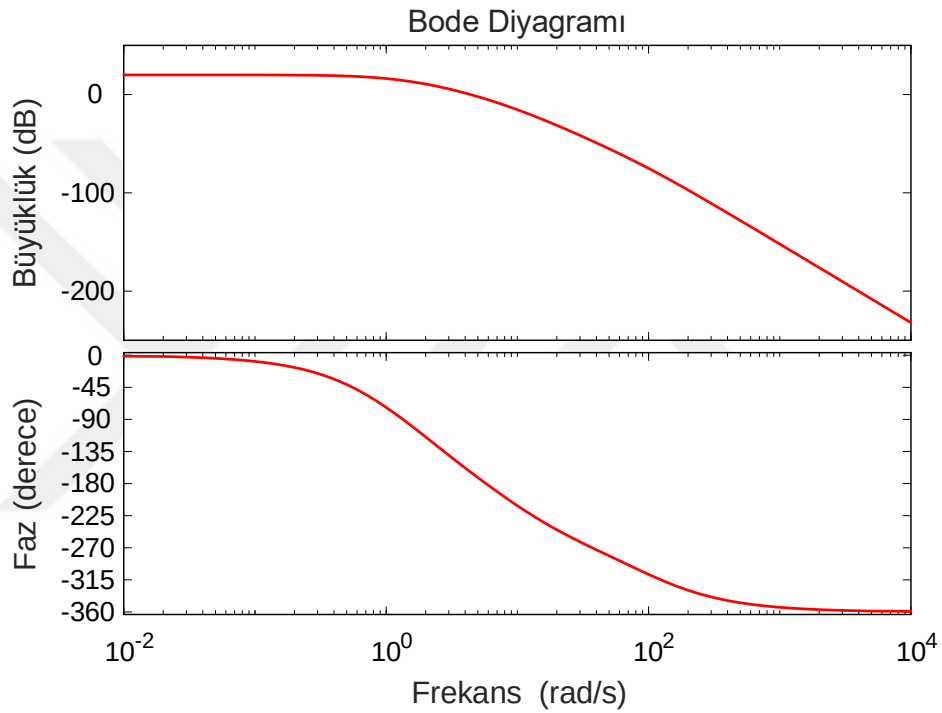
Şekil 6.3. Kontrolsüz AVR sisteminin kutup-sıfır haritası



Şekil 6.4. Kontrolsüz AVR sisteminin birim basamak cevabı

6.4. Kontrolsüz Açık Çevrim AVR Sisteminin Frekans Cevabı Analizi

Kontrolsüz açık çevrim AVR sisteminin Bode diyagramı Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Bu sistemin kazanç payı 4.6176 dB, faz payı 16.1028° ve bant genişliği ise 6.9454 rad/s'dir. Zaman cevabı ölçütlerinde olduğu gibi frekans cevabı ölçütlerinin de etkili bir kontrolör yaklaşımı ile iyileştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 6.5. Kontrolsüz AVR sisteminin açık çevrim Bode diyagramı

7. AVR SİSTEMİ İÇİN ÖNERİLEN YENİ TASARIM METODU

7.1. Sıklıkla Kullanılan Kontrolör Tipleri ve RPIDD² Kontrolör

Literatürde sıklıkla kullanılan kontrolörler PID, PIDA, FOPID, PIDD² ve RPIDD² olarak sıralanabilir (Ekinci, Izci, Eker, & Abualigah, 2023; Izci, Ekinci, Mirjalili, vd., 2023). Bu kontrolörlere ilişkin transfer fonksiyonları sırasıyla Denklem (7.1), Denklem (7.2), Denklem (7.3), Denklem (7.4) ve Denklem (7.5)'te verilmiştir.

$$Con_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (7.1)$$

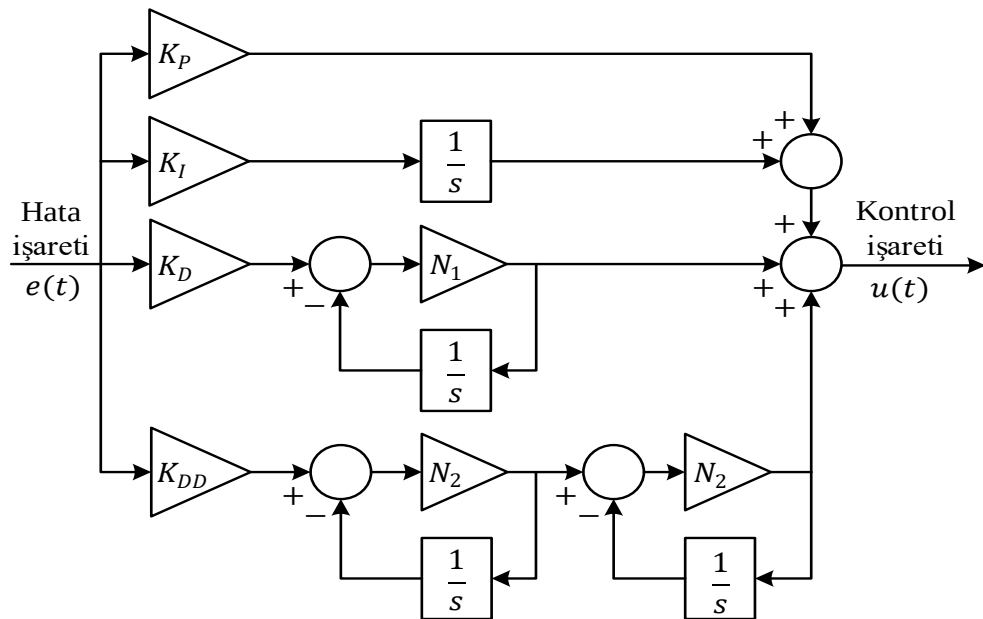
$$Con_{PIDA}(s) = \frac{K_A s^3 + K_D s^2 + K_P s + K_I}{s^3 + \alpha s^2 + \beta s} \quad (7.2)$$

$$Con_{FOPID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (7.3)$$

$$Con_{PIDD^2}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s + K_{DD} s^2 \quad (7.4)$$

$$Con_{RPIDD^2}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \frac{N_1 s}{s + N_1} + K_{DD} \left(\frac{N_2 s}{s + N_2} \right)^2 \quad (7.5)$$

Bu tez çalışmasında kullanılan RPIDD² kontrolörünün blok diyagramı Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. RPIDD² kontrolörün blok diyagramı

7.2. Amaç Fonksiyonu

Literatürde yaygın kullanılan hata tabanlı amaç fonksiyonları IAE , ISE , $ITAE$ ve $ITSE$ 'dir ve bu amaç fonksiyonlarının tanımı Denklem (7.6), Denklem (7.7), Denklem (7.8) ve Denklem (7.9) ile ifade edilir. (Ekinci, Izci, & Kayri, 2022; Izci & Ekinci, 2023).

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| \cdot dt \quad (7.6)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} (e(t))^2 \cdot dt \quad (7.7)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| \cdot dt \quad (7.8)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t \cdot (e(t))^2 \cdot dt \quad (7.9)$$

Yukarıda verilen denklemlerdeki $e(t)$ hata işareti olup AVR sistemi için $e(t) = V_t - V_{ref}$ 'dir. Bununla birlikte zaman cevabı performans ölçütlerini kullanana ZLG amaç fonksiyonu da literatürde çokça kullanılmaktadır. ZLG amaç fonksiyonu Denklem (7.10)'da verilmiştir.

$$ZLG = (1 - \rho) \cdot (MP + ES) + \rho \cdot (ST - RT) \quad (7.10)$$

Denklem (7.10)'da, MP maksimum aşımı, ES sürekli hal hatasını, ST yerleşme zamanını ve RT ise yükselme zamanını temsil etmektedir. Ayrıca denklemdeki ρ parametresi bir ağırlık faktörüdür ve bu tezdeki değeri $e^{-1} = 0.3679$ olarak alınmıştır. Tez çalışmasında, ZLG amaç fonksiyonu tercih edilmiştir.

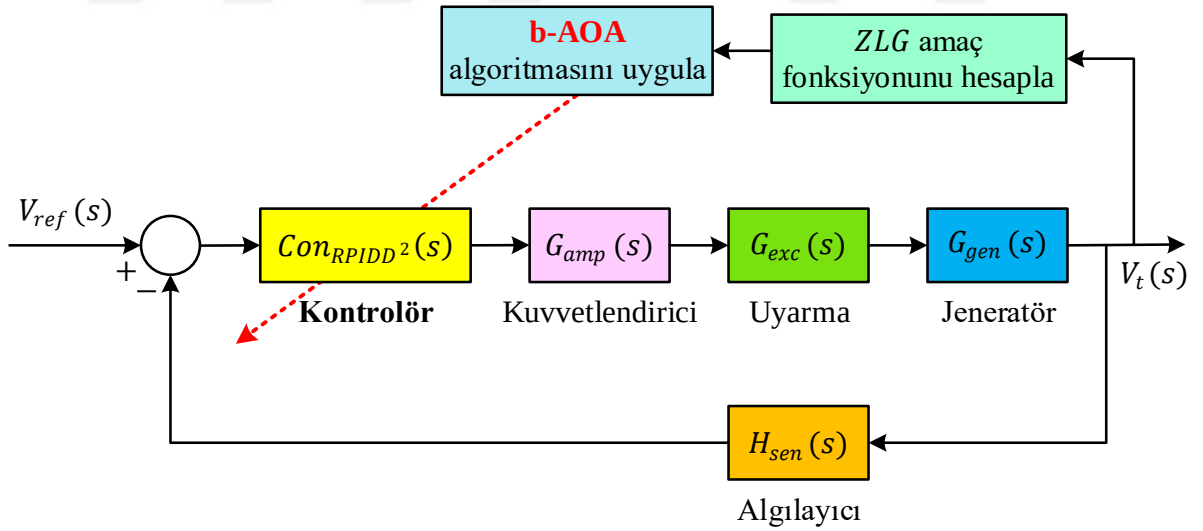
7.3. Algoritmanın RPIDD² Kontrollü AVR Sistemine Entegrasyonu

Tablo 7.1’de önerilen b-AOA algoritmasının RPIDD² kontrolörüne uygulanırken kontrolör parametreleri için kullanılan alt ve üst sınır değerleri listelenmektedir. Bu değerler optimizasyon sürecinde kullanılan ve parametre değerlerinin hangi aralıkta aranması gerektiğini belirtilen sınırlar olarak kullanılmıştır.

Tablo 7.1. RPIDD² kontrolörün parametrelerinin alt ve üst sınırları

Parametre	Alt sınır	Üst sınır
K_P	0.001	5
K_I	0.001	5
K_D	0.001	5
K_{DD}	0.001	5
N_1	50	2000
N_2	50	2000

Şekil 7.2, önerilen b-AOA algoritmasının RPIDD² kontrolörü ve ZLG amaç fonksiyonu ile beraber AVR sistemine uygulanmasını gösteren blok diyagramını göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere, ZLG amaç fonksiyonun minimizasyonunu temel alarak ilgili kontrolör parametrelerinin en iyi değerleri hesaplanmaktadır.



Şekil 7.2. Algoritmanın AVR problemine uygulanmasını gösteren blok diyagramı

8. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA

8.1. b-AOA ve AOA Metotlarının İstatistikî Performansı

AVR sisteminin optimizasyonunda b-AOA ve AOA algoritmaları 30 kez çalıştırılmıştır. Amaç fonksiyonun minimize edilmesinde popülasyon büyüklüğü 30 ve maksimum iterasyon sayısı da 50 olarak alınması uygun görülmüştür. Tüm çalıştırmadan elde edilen istatistikî sonuçlar Tablo 8.1’de verilmiştir. Tablo 8.1’den görüleceği üzere ZLG amaç fonksiyonun optimizasyonunda, tüm istatistikî ölçütler b-AOA algoritmasıyla en iyi çıkmıştır. Bu sonuçlar ayrıca b-AOA algoritmasının istatistikî olarak kararlı olduğunu da teyit etmektedir.

Tablo 8.1. Amaç fonksiyonunun minimizasyonuna ilişkin istatistikî sonuçlar

Algoritma	Ortalama	Standart sapma	En iyi	En kötü
AOA	0.0078863	0.00012395	0.0076825	0.0081212
b-AOA	0.0065138	9.3497E-05	0.0063522	0.0067022

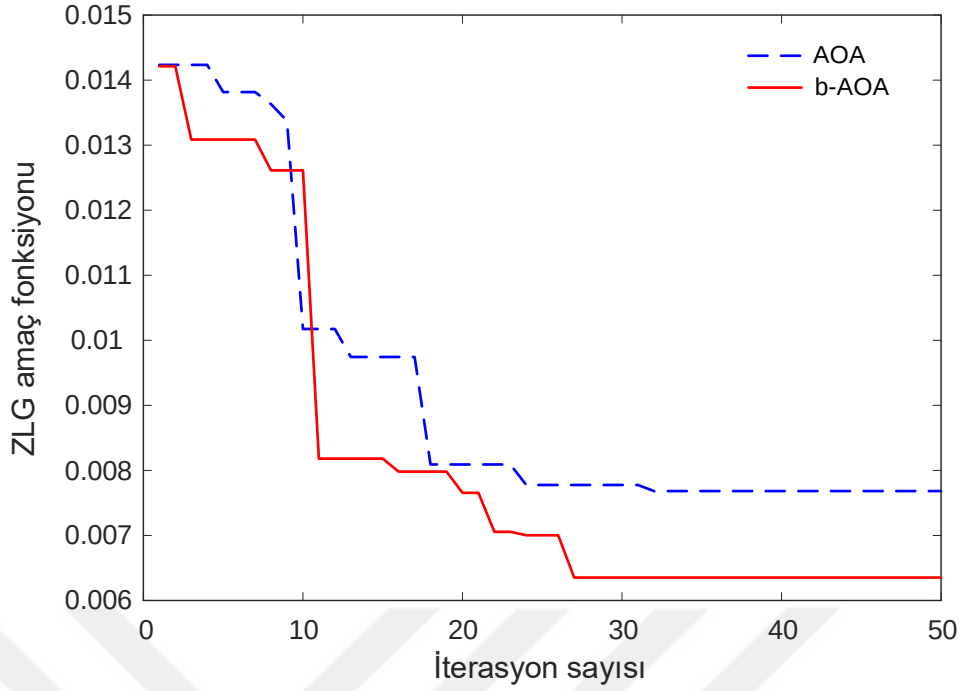
8.2. En İyi Kontrol Parametreleri ve Elde Edilen Transfer Fonksiyonları

Şekil 8.1, AOA ve b-AOA algoritmaları ile minimize edilen amaç fonksiyonunun iterasyona göre değişimlerini göstermektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere, b-AOA algoritması daha düşük ZLG amaç fonksiyonuna erişebilmektedir. Bu durum, önerilen algoritmanın daha efektif olduğunu göstermektedir.

Tablo 8.2 ise orijinal AOA ile önerilen b-AOA algoritmaları aracılığıyla elde edilen optimal RPIDD² kontrolör parametrelerini listelemektedir. Bu değerlerin kullanımı ile AOA ve b-AOA tabanlı transfer fonksiyonları sırası ile Denklem (8.1) ve Denklem (8.2)’de verilmiştir.

$$T_{AOA-RPIDD^2}(s) = \frac{1.015e04s^5 + 1.674e07s^4 + 1.77e09s^3 + 2.026e10s^2 + 4.661e10s + 2.486e10}{0.0004s^8 + 1.36s^7 + 1531s^6 + 6.279e05s^5 + 5.621e07s^4 + 2.229e09s^3 + 2.157e10s^2 + 4.754e10s + 2.486e10} \quad (8.1)$$

$$T_{b-AOA-RPIDD^2}(s) = \frac{5.876e04s^5 + 1.003e08s^4 + 1.057e10s^3 + 1.157e11s^2 + 3.035e11s + 1.255e11}{0.0004s^8 + 2.26s^7 + 4322s^6 + 2.944e06s^5 + 2.929e08s^4 + 1.29e10s^3 + 1.22e11s^2 + 3.084e11s + 1.255e11} \quad (8.2)$$



Şekil 8.1. Minimize edilen amaç fonksiyonunun iterasyona göre değişimi

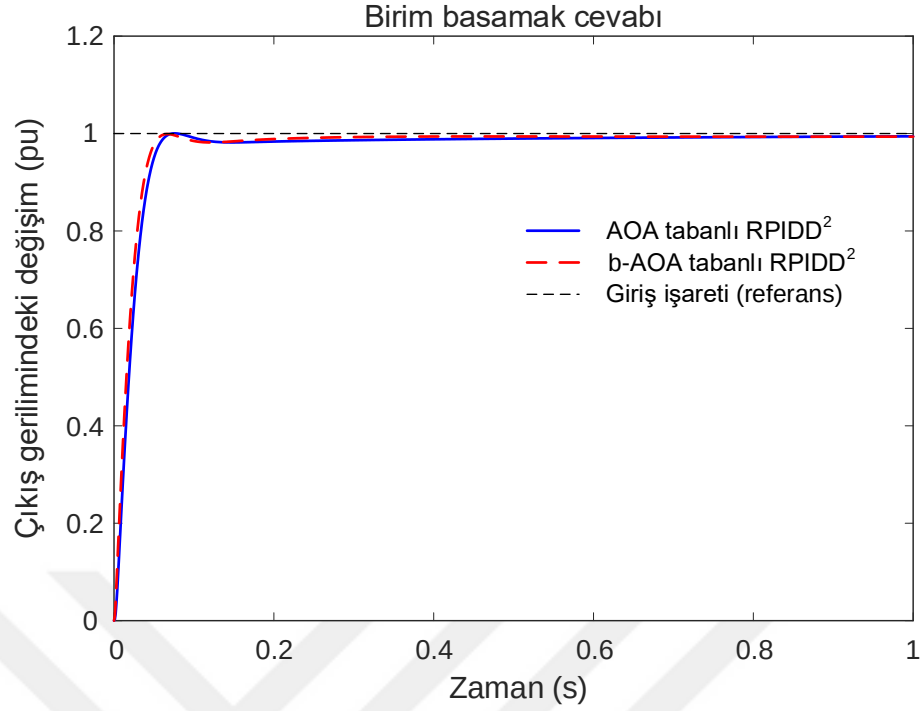
Tablo 8.2. AOA ve b-AOA ile elde edilen optimal RPIDD² kontrolör parametreleri

Parametre	AOA	b-AOA
K_P	3.9448	4.8723
K_I	2.1188	2.0240
K_D	1.6757	1.8094
K_{DD}	0.13014	0.15049
N_1	1544.2	1595.2
N_2	871.72	1971.2

8.3. Önerilen Tasarım Metodunun Kararlılık Performansının Doğrulanması

Bu tez çalışmasında önerilen tasarım metodunun kararlılık performansını göstermek amacıyla hem zaman hem de frekans domeninde çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda Şekil 8.2, çıkış gerilimindeki değişimi gösteren birim basamak cevabını görüntülemektedir. İlgili şekilden de anlaşılabacağı üzere, önerilen b-AOA algoritması sistemin daha uygun bir davranış sergilemesini sağlamıştır. Bu durum Tablo 8.3'te verilen yükselme ve yerleşme zamanları ile maksimum aşım gibi parametrelerin nümerik değerleri ile de ayrıca teyit edilmektedir. Bahis geçen şekil ve tablo dolayısıyla önerilen tasarım metodunun zaman domenindeki kararlılığını ifade etmektedir.

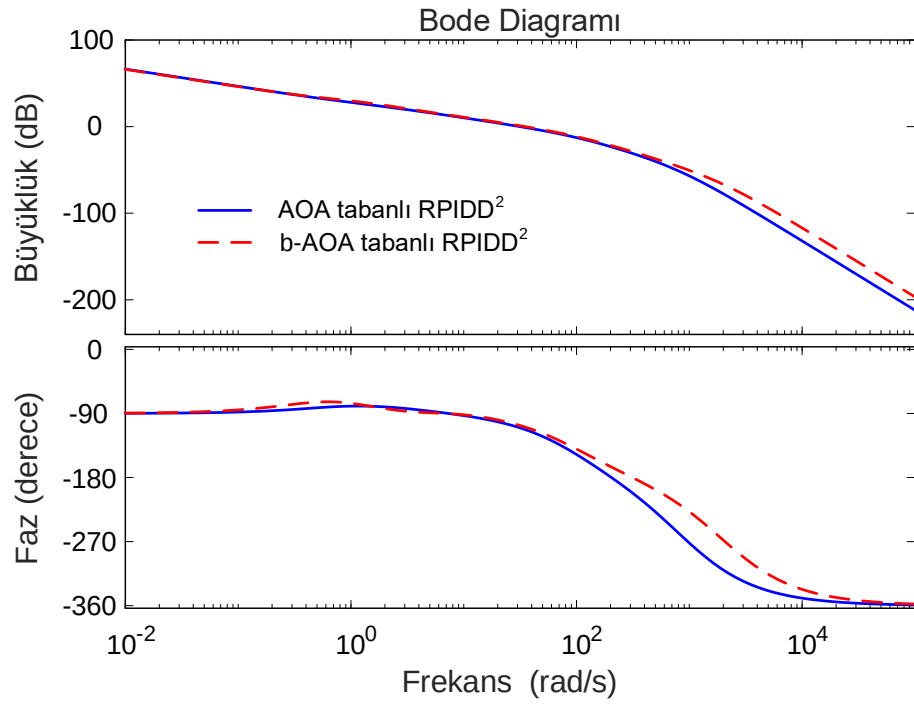
Söz konusu durumun frekans bağlamında da analizi için sistemin açık çevrim Bode diyagramları da Şekil 8.3'te verildiği gibi çizdirilmiştir.



Şekil 8.2. Çıkış gerilimindeki değişimi gösteren birim basamak cevabı

Tablo 8.3. Elde edilen performans parametreleri

Kontrolör tasarım metodu	Yükselme zamanı (s)	Yerleşme zamanı (s)	Maksimum aşım (%)
b-AOA tabanlı RPIDD ²	0.033485	0.050752	Aşım yok
AOA tabanlı RPIDD ²	0.037393	0.057523	0.043859



Şekil 8.3. Açık çevrim Bode diyagramı

Tablo 8.4 ise frekans cevabına ilişkin nümerik değerleri barındırmaktadır. Şekil 8.3 ve Tablo 8.4 birlikte değerlendirildiğinde, önerilen tasarım metodunun daha büyük

faz ve kazanç payları ile bant genişliğine sahip olduğu görülecektir. Zaman cevabında olduğu gibi, önerilen algoritmanın frekans domeninde de daha kararlı bir yapı sergilediği böylelikle doğrulanmış olmaktadır.

Tablo 8.4. Frekans cevabına ilişki nümerik performans değerleri

Kontrolör tasarım metodu	Faz payı (°)	Kazanç payı (dB)	Bant genişliği (rad/s)
b-AOA tabanlı RPIDD ²	70.797	28.888	64.820
AOA tabanlı RPIDD ²	69.810	23.368	57.819

8.4. Karşılaştırma Amacıyla Seçilen Yaklaşımlar ve Transfer Fonksiyonları

Bu tez çalışması kapsamında literatürdeki en bilinen metotlarla karşılaştırmalara da ayrıca yer verilmiştir. Bu yaklaşımların kullandığı kontrolör tipleri ise; SCA tabanlı PID kontrolör (Hekimoğlu, 2019), WOA tabanlı PIDA kontrolör (Mosaad vd., 2019), SMA tabanlı FOPID kontrolör (Izci, Ekinci, Zeynelgil, vd., 2021) ve PSO tabanlı PIDD² kontrolördür (Sahib, 2015).

SCA tabanlı PID kontrolör parametreleri $K_p = 0.9826$, $K_I = 0.8337$ ve $K_D = 0.4982$ 'dir (Hekimoğlu, 2019). Ayrıca bu yaklaşımı kullanan kapalı çevrim AVR sisteminin transfer fonksiyonu Denklem (8.3)'te verilmiştir.

$$T_{SCA-PID}(s) = \frac{0.04982s^3 + 5.08s^2 + 9.909s + 8.337}{0.0004s^5 + 0.0454s^4 + 0.555s^3 + 6.492s^2 + 10.83s + 8.337} \quad (8.3)$$

Bu sisteme ilişkin birim basamak cevabı ve Bode diyagramı sırasıyla Şekil 8.4 ve Şekil 8.5'te gösterilmiştir.

WOA tabanlı PIDA kontrolör parametreleri $K_p = 777.401$, $K_I = 397.741$, $K_D = 500.652$, $K_A = 103.02$, $\alpha = 550.118$ ve $\beta = 915.041$ 'dir (Mosaad vd., 2019). Ayrıca bu yaklaşımı kullanan kapalı çevrim AVR sisteminin transfer fonksiyonu Denklem (8.4)'te verilmiştir.

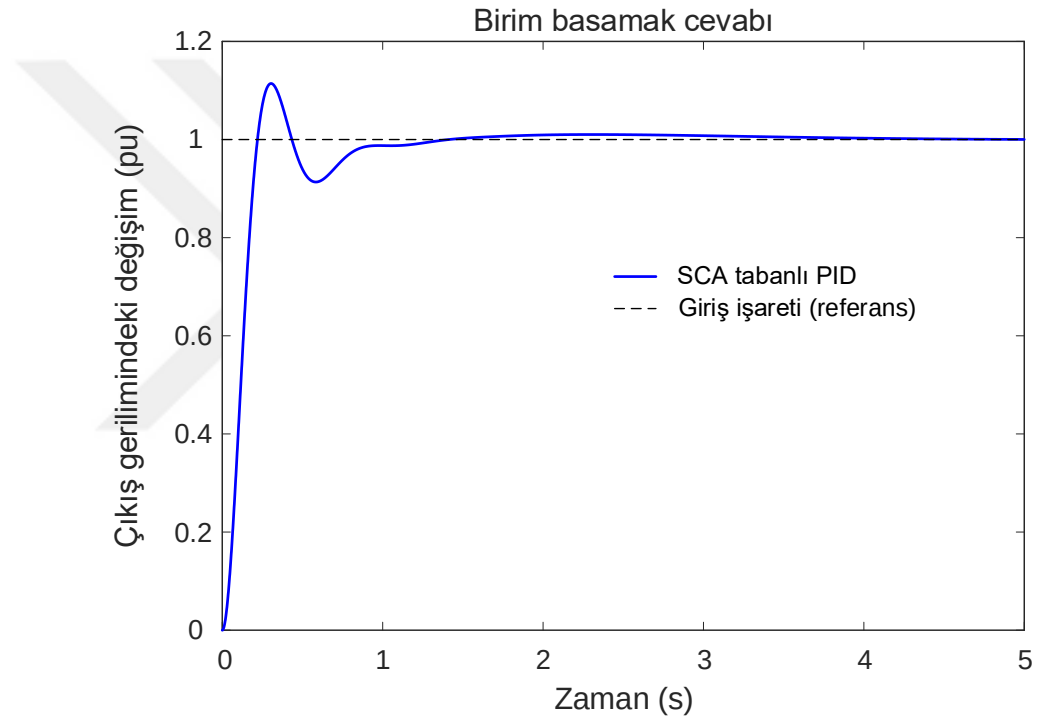
$$T_{WOA-PIDA}(s) = \frac{10.3s^4 + 1080s^3 + 5084s^2 + 7814s + 3977}{0.0004s^7 + 0.2654s^6 + 25.9s^5 + 348.4s^4 + 2370s^3 + 6938s^2 + 8689s + 3977} \quad (8.4)$$

Bu sisteme ilişkin birim basamak cevabı ve Bode diyagramı sırasıyla Şekil 8.6 ve Şekil 8.7'de gösterilmiştir.

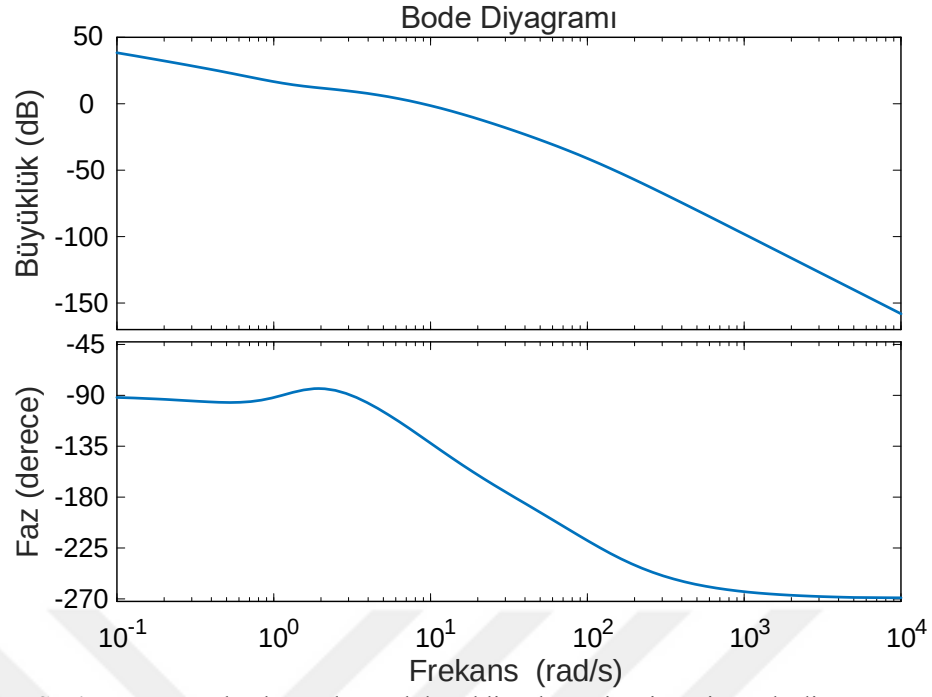
SMA tabanlı FOPID kontrolör parametreleri $K_P = 2.2554$, $K_I = 1.2586$, $K_D = 0.6472$, $\lambda = 1.0274$ ve $\mu = 1.1877$ 'dir (Izci, Ekinci, Zeynelgil, vd., 2021). Ayrıca bu yaklaşımı kullanan kapalı çevrim AVR sisteminin transfer fonksiyonu Denklem (8.5)'te verilmiştir.

$$T_{SMA-FOPID}(s) = \frac{0.06472s^{3.2151} + 6.472s^{2.2151} + 0.22554s^{2.0274} + 22.554s^{1.0274} + 0.12586s + 12.586}{0.0004s^{5.0274} + 0.0454s^{4.0274} + 0.555s^{3.0274} + 6.472s^{2.2151} + 1.51s^{2.0274} + 23.554s^{1.0274} + 12.586} \quad (8.5)$$

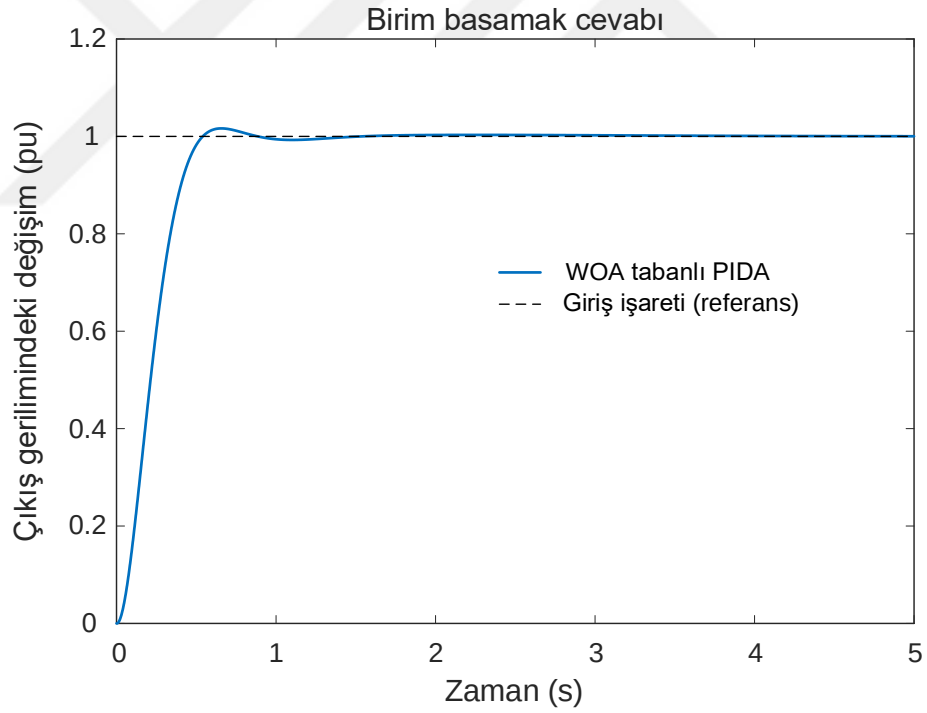
Bu sisteme ilişkin birim basamak cevabı ve Bode diyagramı sırasıyla Şekil 8.8 ve Şekil 8.9'da gösterilmiştir.



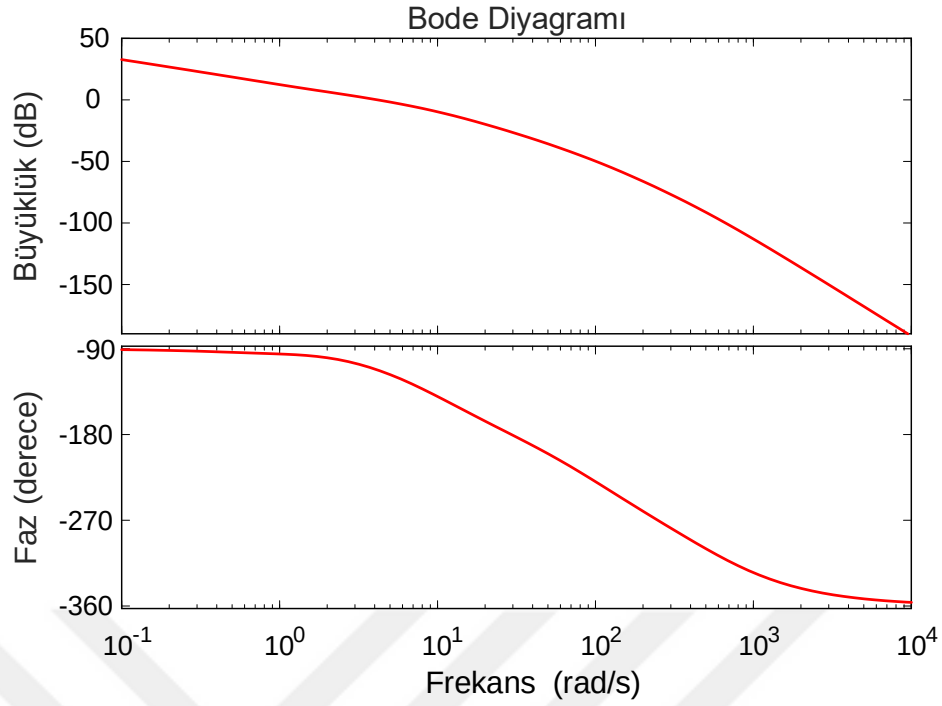
Şekil 8.4. SCA tabanlı PID kontrol destekli AVR sistemin basamak cevabı



Şekil 8.5. SCA tabanlı PID kontrol destekli açık çevrim sistemin Bode diyagramı



Şekil 8.6. WOA tabanlı PIDA kontrol destekli AVR sistemin basamak cevabı

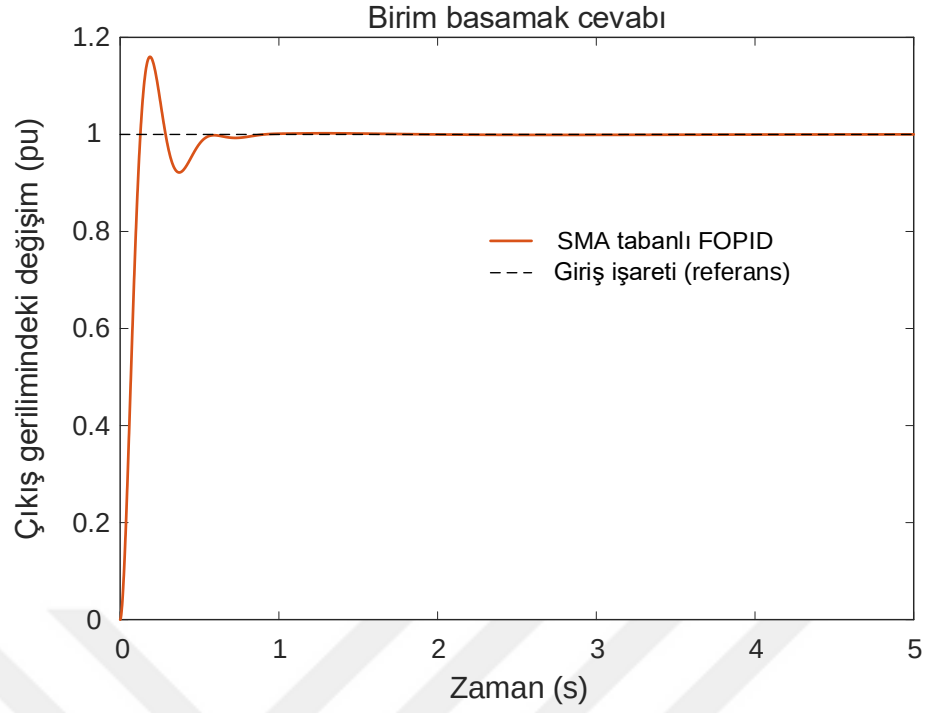


Şekil 8.7. WOA tabanlı PIDA kontrol destekli açık çevrim sistemin Bode diyagramı

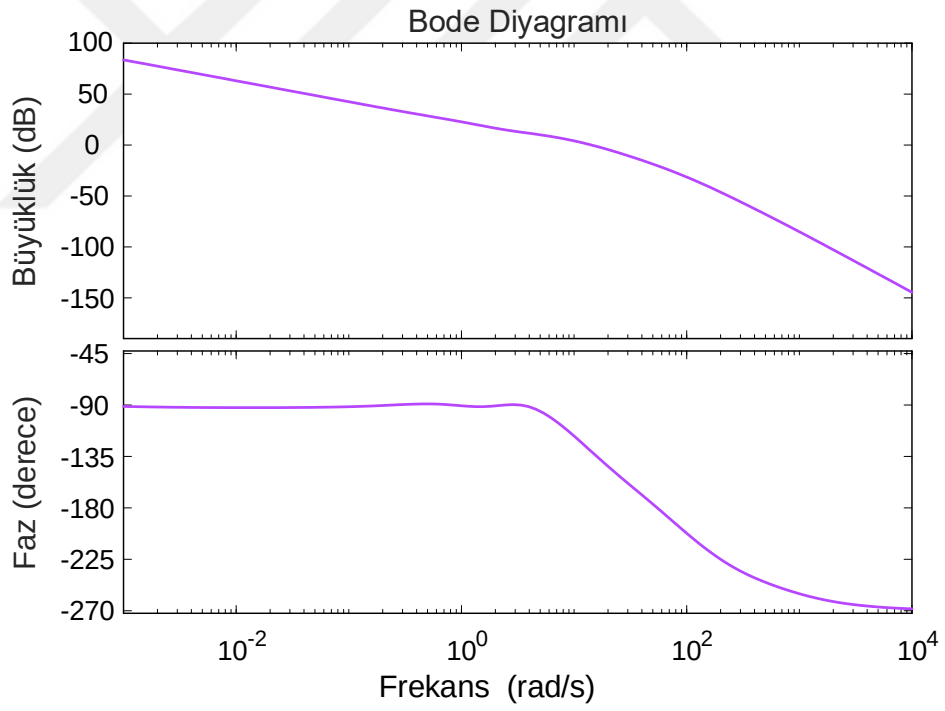
PSO tabanlı PIDD² kontrolör parametreleri $K_p = 2.7784$, $K_I = 1.8521$, $K_D = 0.9997$ ve $K_{DD} = 0.07394$ 'dir (Sahib, 2015). Ayrıca bu yaklaşımı kullanan kapalı çevrim AVR sisteminin transfer fonksiyonu Denklem (8.6)'da verilmiştir.

$$T_{PSO-PIDD^2}(s) = \frac{0.007394s^4 + 0.8394s^3 + 10.27s^2 + 27.97s + 18.52}{0.0004s^5 + 0.0454s^4 + 1.294s^3 + 11.51s^2 + 28.78s + 18.52} \quad (8.6)$$

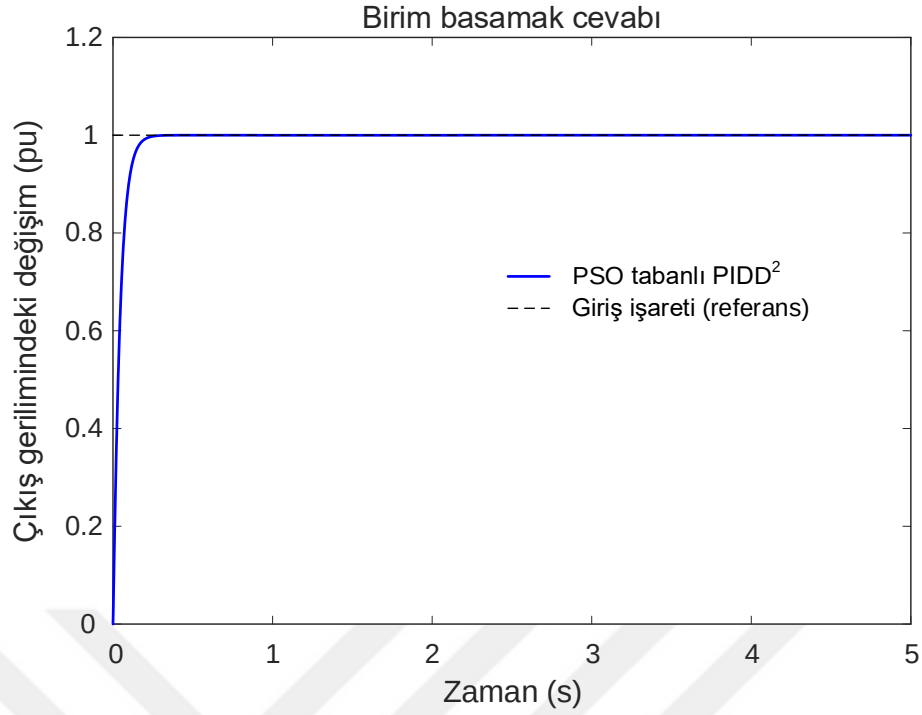
Bu sisteme ilişkin birim basamak cevabı ve Bode diyagramı sırasıyla Şekil 8.10 ve Şekil 8.11'de gösterilmiştir.



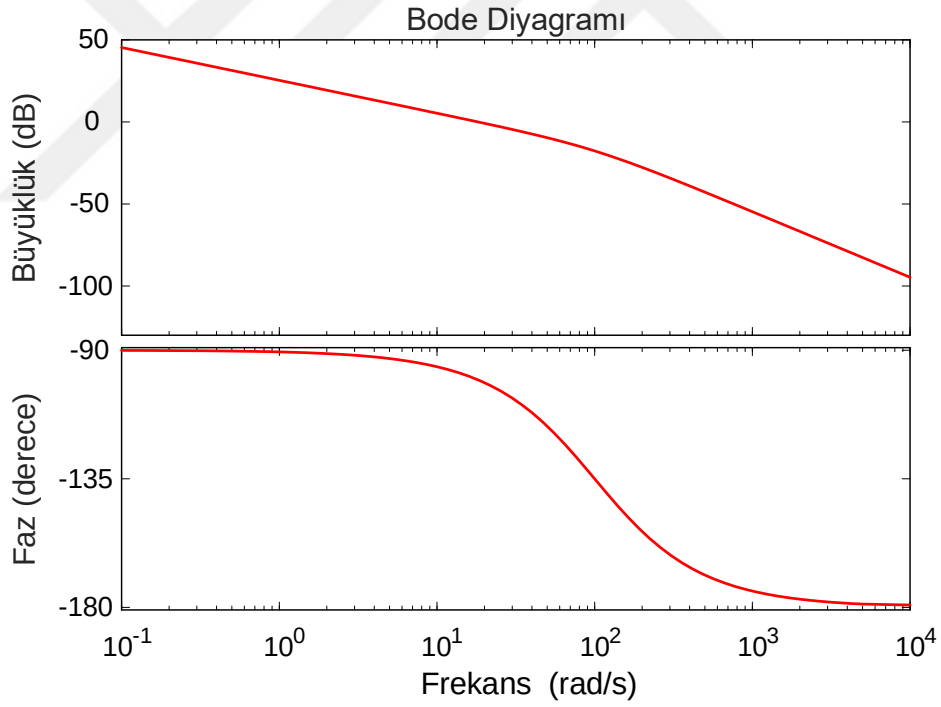
Şekil 8.8. SMA tabanlı FOPID kontrol destekli AVR sistemin basamak cevabı



Şekil 8.9. SMA tabanlı FOPID kontrol destekli açık çevrim sistemin Bode diyagramı



Şekil 8.10. PSO tabanlı PIDD² kontrol destekli AVR sistemin basamak cevabı

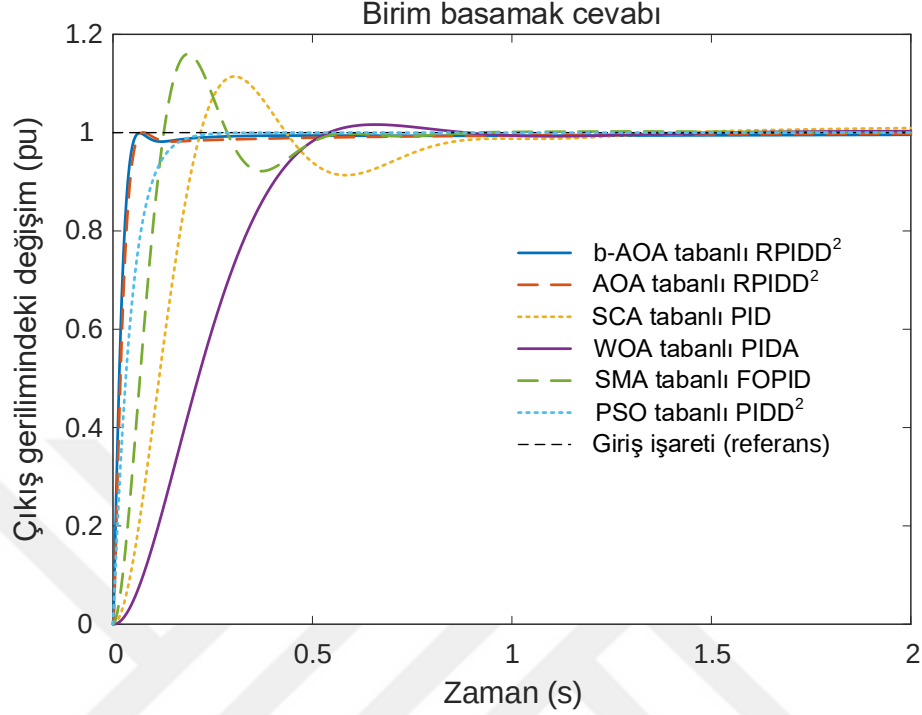


Şekil 8.11. PSO tabanlı PIDD² kontrol destekli açık çevrim sistemin Bode diyagramı

8.5. Karşılaştırmalı Zaman Cevabı Analizi

Yukarıdaki bölümde bahsi geçen literatürdeki etkili yaklaşımlar kullanılarak performans analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sisteme ait karşılaştırmalı zaman cevabı analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.12, karşılaştırmalı birim basamak cevabını görüntülemektedir. Tablo 8.5 ise karşılaştırmalı zaman cevabına ait nümerik değerleri

göstermektedir. Şekil 8.12 ve Tablo 8.5, bu tez çalışmasında önerilen tasarım metodunun en iyi zaman cevabını ürettiğini göstermektedir. Bu durum da ilgili metodun etkinliğini teyit etmektedir.



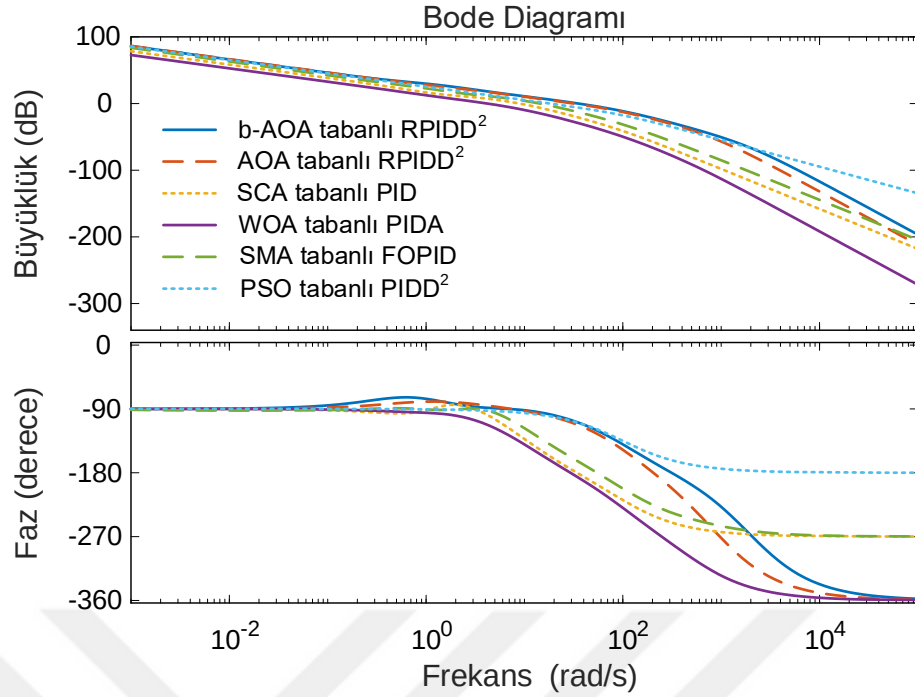
Şekil 8.12. Karşılaştırmalı çıkış gerilimi değişimini gösteren birim basamak cevabı

Tablo 8.5. Karşılaştırmalı zaman cevabına ait nümerik değerler

Kontrolör tasarım metodu	Yükselme zamanı (s)	Yerleşme zamanı (s)	Maksimum aşım (%)
b-AOA tabanlı RPIDD ²	0.033485	0.050752	Aşım yok
AOA tabanlı RPIDD ²	0.037393	0.057523	0.043859
SCA tabanlı PID	0.1472	0.84133	11.425
WOA tabanlı PIDA	0.32772	0.49543	1.6483
SMA tabanlı FOPID	0.087541	0.4979	15.998
PSO tabanlı PIDD ²	0.092935	0.16347	0.0025797

8.6. Karşılaştırmalı Frekans Cevabı Analizi

Karşılaştırmalı analizler için ikinci iş olarak sisteme ait frekans cevabı analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.13 karşılaştırmalı Bode diyagramını görüntülemektedir. Tablo 8.6 ise karşılaştırmalı frekans cevabına ait nümerik değerleri göstermektedir. İlgili şekil ve tablo, bu tez çalışmasında önerilen tasarım metodunun en iyi frekans cevabını ürettiğini göstermektedir. Bu durum da ilgili metodun frekans cevabı açısından da etkinliğini teyit etmektedir.



Şekil 8.13. Karşılaştırmalı açık çevrim Bode diyagramı

Tablo 8.6. Karşılaştırmalı frekans cevabına ait nümerik değerler

Kontrolör tasarım metodu	Faz payı (°)	Kazanç payı (dB)	Bant genişliği (rad/s)
b-AOA tabanlı RPIDD ²	70.797	28.888	64.820
AOA tabanlı RPIDD ²	69.810	23.368	57.819
SCA tabanlı PID	52.596	20.300	14.821
WOA tabanlı PIDA	67.671	26.123	6.7076
SMA tabanlı FOPID	49.142	20.193	23.914
PSO tabanlı PIDD ²	79.638	Sonsuz	23.503

8.7. Literatürdeki Güncel Çalışmalarla Karşılaştırmalar

Bu tez çalışması kapsamında son olarak da literatürde rapor edilmiş olan güncel çalışmalar dikkate alınarak zaman cevabı açısından karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Son yıllara ait olan güncel çalışmalar ve bu çalışmalara ait yükselme ve yerleşme zamanları ile maksimum aşımaları gösteren değerler Tablo 8.7’de verilmektedir. İlgili tablodaki nümerik değerler incelendiğinde, önerilen b-AOA tabanlı RPIDD² kontrolörün en iyi zaman cevabı değerlerini sağladığı görülmektedir. Bu sebeple önerilen tasarım metodu daha efektif bir yaklaşım olarak bu noktada karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 8.7. Güncel çalışmalar ile yapılan karşılaştırma sonuçları

Kaynak	Yükselme zamanı (s)	Yerleşme zamanı (s)	Maksimum aşım (%)
(Agwa vd., 2022)	0.2549	0.3816	1.9977
(Ozgenc vd., 2022)	0.267	0.371	0.007
(Padiachy vd., 2022)	1.12	1.74	1.17
(Ekinci, Izci, Abu Zitar, vd., 2022)	0.3076	0.4669	0.9582
(Munagala & Jatoth, 2022)	0.1103	0.169	1.1838
(Dogruer & Can, 2022)	0.1857	0.2963	1.0407
(Ayas & Sahin, 2021)	0.1230	0.1670	0.1262
(Izci & Ekinci, 2021)	0.3149	0.4817	0.6071
(Micev vd., 2021)	0.0535	0.0798	0.7562
(Izci, Ekinci, Zeynelgil, vd., 2021)	0.0889	0.4215	2.8296
(Altbawi vd., 2021)	0.0885	0.653	11.3
(Suid & Ahmad, 2022)	0.498	0.579	2.2
(Ekinci, Demiroren, vd., 2020)	0.0662	0.0864	Aşım yok
(Micev vd., 2020)	0.1347	0.2	1.89
(Ekinci, Izci, vd., 2020)	0.0892	0.4257	2.8626
(Mokeddem & Mirjalili, 2020)	0.0584	0.0982	0.0653
(Gong, 2019)	0.32259	0.50130	0.0016
(Bhookya & Jatoth, 2019)	0.1549	0.2183	0.01
(Ayas, 2019)	0.373	0.685	0.001
(Bourouba vd., 2019)	0.0626	0.353	10.90
(Khan vd., 2019)	0.0981	0.551	15.5
(Hekimoğlu & Ekinci, 2018)	0.130	0.971	20.5
(Bingul & Karahan, 2018)	0.3080	0.4260	0.0001
(Sikander vd., 2018)	0.1042	0.4507	Aşım yok
(Celik, 2018)	0.103	0.584	22.8
(Li vd., 2017)	0.1592	0.2114	1.08
(Chatterjee & Mukherjee, 2016)	0.3537	0.5603	Aşım yok
(Duman vd., 2016)	0.107	0.597	24.0
Önerilen b-AOA tabanlı RPIDD ²	0.033485	0.050752	Aşım yok

KAYNAKLAR

- Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., & Gandomi, A. H. (2021). The Arithmetic Optimization Algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 376, 113609. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609>
- Agwa, A., Elsayed, S., & Ahmed, M. (2022). Design of Optimal Controllers for Automatic Voltage Regulation Using Archimedes Optimizer. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 31(2), 799-815. <https://doi.org/10.32604/iasc.2022.019887>
- Ahmadianfar, I., Heidari, A. A., Noshadian, S., Chen, H., & Gandomi, A. H. (2022). INFO: An efficient optimization algorithm based on weighted mean of vectors. *Expert Systems with Applications*, 195, 116516. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116516>
- Altbawi, S. M. A., Mokhtar, A. S. Bin, Jumani, T. A., Khan, I., Hamadneh, N. N., & Khan, A. (2021). Optimal design of Fractional order PID controller based Automatic voltage regulator system using gradient-based optimization algorithm. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.07.009>
- Ayas, M. S. (2019). Design of an optimized fractional high-order differential feedback controller for an AVR system. *Electrical Engineering*, 101(4), 1221-1233. <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00842-5>
- Ayas, M. S., & Sahin, E. (2021). FOPID controller with fractional filter for an automatic voltage regulator. *Computers & Electrical Engineering*, 90, 106895. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106895>
- Bhookya, J., & Jatoth, R. K. (2019). Optimal FOPID/PID controller parameters tuning for the AVR system based on sine-cosine-algorithm. *Evolutionary Intelligence*, 12(4), 725-733. <https://doi.org/10.1007/s12065-019-00290-x>
- Bingul, Z., & Karahan, O. (2018). 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. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.05.056>
- Bourouba, B., Ladaci, S., & Schulte, H. (2019). Optimal design of fractional order PI λ D μ controller for an AVR system using Ant Lion Optimizer. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 200-205. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.304>
- Celik, E. (2018). 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. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3335-7>
- Chatterjee, S., & Mukherjee, V. (2016). PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 77, 418-429. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.010>

- Dahou, A., Al-qaness, M. A. A., Abd Elaziz, M., & Helmi, A. (2022). Human activity recognition in IoHT applications using Arithmetic Optimization Algorithm and deep learning. *Measurement*, 199, 111445. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111445>
- Dogruer, T., & Can, M. S. (2022). Design and robustness analysis of fuzzy PID controller for automatic voltage regulator system using genetic algorithm. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 44(9), 1862-1873. <https://doi.org/10.1177/01423312211066758>
- Duman, S., Yörükeren, N., & Altaş, İ. H. (2016). Gravitational search algorithm for determining controller parameters in an automatic voltage regulator system. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24(4), 2387-2400. <https://doi.org/10.3906/elk-1404-14>
- Ekinci, S., Demiroren, A., Zeynelgil, H., & Hekimoğlu, B. (2020). An opposition-based atom search optimization algorithm for automatic voltage regulator system. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35, 1141-1158. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.598576>
- Ekinci, S., Izci, D., Abu Zitar, R., Alsoud, A. R., & Abualigah, L. (2022). Development of Lévy flight-based reptile search algorithm with local search ability for power systems engineering design problems. *Neural Computing and Applications*, 34(22), 20263-20283. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07575-w>
- Ekinci, S., Izci, D., Abualigah, L., Hussien, A. G., Thanh, C.-L., & Khatir, S. (2023). Revolutionizing Vehicle Cruise Control: An Elite Opposition-Based Pattern Search Mechanism Augmented INFO Algorithm for Enhanced Controller Design. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 16(1), 129. <https://doi.org/10.1007/s44196-023-00304-8>
- Ekinci, S., Izci, D., Al Nasar, M. R., Abu Zitar, R., & Abualigah, L. (2022). Logarithmic spiral search based arithmetic optimization algorithm with selective mechanism and its application to functional electrical stimulation system control. *Soft Computing*, 26(22), 12257-12269. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07068-x>
- Ekinci, S., Izci, D., Eker, E., & Abualigah, L. (2023). An effective control design approach based on novel enhanced aquila optimizer for automatic voltage regulator. *Artificial Intelligence Review*, 56(2), 1731-1762. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10216-2>
- Ekinci, S., Izci, D., Eker, E., Abualigah, L., Thanh, C.-L., & Khatir, S. (2023). Hunger games pattern search with elite opposite-based solution for solving complex engineering design problems. *Evolving Systems*. <https://doi.org/10.1007/s12530-023-09526-9>
- Ekinci, S., Izci, D., & Hekimoglu, B. (2020). Henry Gas Solubility Optimization Algorithm Based FOPID Controller Design for Automatic Voltage Regulator. *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179406>

- Ekinci, S., Izci, D., & Kayri, M. (2022). An Effective Controller Design Approach for Magnetic Levitation System Using Novel Improved Manta Ray Foraging Optimization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(8), 9673-9694. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06321-z>
- Eslami, M., Akbari, E., Seyed Sadr, S. T., & Ibrahim, B. F. (2022). A novel hybrid algorithm based on rat swarm optimization and pattern search for parameter extraction of solar photovoltaic models. *Energy Science & Engineering*, 10(8), 2689-2713. <https://doi.org/10.1002/ese3.1160>
- Fang, H., Fu, X., Zeng, Z., Zhong, K., & Liu, S. (2022). An Improved Arithmetic Optimization Algorithm and Its Application to Determine the Parameters of Support Vector Machine. *Mathematics*, 10(16), 2875. <https://doi.org/10.3390/math10162875>
- Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S., & Gandomi, A. H. (2020). Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic. *Expert Systems with Applications*, 152, 113377. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113377>
- Furat, M., & Cucu, G. G. (2022). Design, Implementation, and Optimization of Sliding Mode Controller for Automatic Voltage Regulator System. *IEEE Access*, 10, 55650-55674. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3177621>
- Gong, C. (2019). Jaya Algorithm-optimized PID controller for AVR system. İçinde F. Xhafa, S. Patnaik, & M. Tavana (Ed.), *Advances in Intelligent Systems and Computing* (C. 885, ss. 382-393). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02804-6_52
- Hekimoğlu, B. (2019). Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(6), 1761-1771. <https://doi.org/10.1177/0142331218811453>
- Hekimoğlu, B., & Ekinci, S. (2018). Grasshopper optimization algorithm for automatic voltage regulator system. *2018 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2018*, 152-156. <https://doi.org/10.1109/ICEEE2.2018.8391320>
- Izci, D. (2021a). An Enhanced Slime Mould Algorithm for Function optimization. *2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/HORA52670.2021.9461325>
- Izci, D. (2021b). Design and application of an optimally tuned PID controller for DC motor speed regulation via a novel hybrid Lévy flight distribution and Nelder–Mead algorithm. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43(14), 3195-3211. <https://doi.org/10.1177/01423312211019633>
- Izci, D. (2022a). A novel improved atom search optimization algorithm for designing power system stabilizer. *Evolutionary Intelligence*, 15(3), 2089-2103. <https://doi.org/10.1007/s12065-021-00615-9>

- Izci, D. (2022b). A novel modified arithmetic optimization algorithm for power system stabilizer design. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 40(3), 529-541. <https://doi.org/10.14744/sigma.2022.00056>
- Izci, D., & Ekinici, S. (2021). Comparative Performance Analysis of Slime Mould Algorithm For Efficient Design of Proportional–Integral–Derivative Controller. *Electrica*, 21(1), 151-159. <https://doi.org/10.5152/electrica.2021.20077>
- Izci, D., & Ekinici, S. (2022). An improved RUN optimizer based real PID plus second-order derivative controller design as a novel method to enhance transient response and robustness of an automatic voltage regulator. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2, 100071. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2022.100071>
- Izci, D., & Ekinici, S. (2023). A novel-enhanced metaheuristic algorithm for FOPID-controlled and Bode's ideal transfer function-based buck converter system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 45(10), 1854-1872. <https://doi.org/10.1177/01423312221140671>
- Izci, D., Ekinici, S., & Cetin, H. (2022). Arithmetic Optimization Algorithm based Controller Design for Automatic Voltage Regulator System. *2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ASYU56188.2022.9925431>
- Izci, D., Ekinici, S., Eker, E., & Dunder, A. (2021). Improving Arithmetic Optimization Algorithm Through Modified Opposition-based Learning Mechanism. *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT52890.2021.9604531>
- Izci, D., Ekinici, S., Eker, E., & Kayri, M. (2022). Augmented hunger games search algorithm using logarithmic spiral opposition-based learning for function optimization and controller design. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.03.001>
- Izci, D., Ekinici, S., & Hekimoğlu, B. (2022). A novel modified Lévy flight distribution algorithm to tune proportional, integral, derivative and acceleration controller on buck converter system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 44(2), 393-409. <https://doi.org/10.1177/01423312211036591>
- Izci, D., Ekinici, S., Kayri, M., & Eker, E. (2022). A novel improved arithmetic optimization algorithm for optimal design of PID controlled and Bode's ideal transfer function based automobile cruise control system. *Evolving Systems*, 13(3), 453-468. <https://doi.org/10.1007/s12530-021-09402-4>
- Izci, D., Ekinici, S., Mirjalili, S., & Abualigah, L. (2023). An intelligent tuning scheme with a master/slave approach for efficient control of the automatic voltage regulator. *Neural Computing and Applications*, 35(26), 19099-19115. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08740-5>
- Izci, D., Ekinici, S., & Zeynelgil, H. L. (2023). Controlling an automatic voltage regulator using a novel Harris hawks and simulated annealing optimization technique. *Advanced Control for Applications*. <https://doi.org/10.1002/adc2.121>

- Izci, D., Ekinici, S., Zeynelgil, H. L., & Hedley, J. (2021). Fractional Order PID Design based on Novel Improved Slime Mould Algorithm. *Electric Power Components and Systems*, 49(9-10), 901-918. <https://doi.org/10.1080/15325008.2022.2049650>
- Kaveh, A., & Biabani Hamedani, K. (2022). Improved arithmetic optimization algorithm and its application to discrete structural optimization. *Structures*, 35, 748-764. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.012>
- Khan, I. A., Alghamdi, A. S., Jumani, T. A., Alamgir, A., Awan, A. B., & Khidrani, A. (2019). Salp Swarm Optimization Algorithm-Based Fractional Order PID Controller for Dynamic Response and Stability Enhancement of an Automatic Voltage Regulator System. *Electronics*, 8(12), 1472. <https://doi.org/10.3390/electronics8121472>
- Koessler, E., & Almomani, A. (2021). Hybrid particle swarm optimization and pattern search algorithm. *Optimization and Engineering*, 22(3), 1539-1555. <https://doi.org/10.1007/s11081-020-09534-7>
- Lewis, R. M., & Torczon, V. (1999). Pattern Search Algorithms for Bound Constrained Minimization. *SIAM Journal on Optimization*, 9(4), 1082-1099. <https://doi.org/10.1137/S1052623496300507>
- Li, X., Wang, Y., Li, N., Han, M., Tang, Y., & Liu, F. (2017). Optimal fractional order PID controller design for automatic voltage regulator system based on reference model using particle swarm optimization. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 8(5), 1595-1605. <https://doi.org/10.1007/s13042-016-0530-2>
- Long, W., Jiao, J., Liang, X., Cai, S., & Xu, M. (2019). A Random Opposition-Based Learning Grey Wolf Optimizer. *IEEE Access*, 7, 113810-113825. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934994>
- Mehta, P., Sultan Yıldız, B., Pholdee, N., Kumar, S., Riza Yildiz, A., Sait, S. M., & Bureerat, S. (2023). A novel generalized normal distribution optimizer with elite oppositional based learning for optimization of mechanical engineering problems. *Materials Testing*, 65(2), 210-223. <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0259>
- Micev, M., Čalasan, M., Ali, Z. M., Hasanien, H. M., & Abdel Aleem, S. H. E. (2021). Optimal design of automatic voltage regulation controller using hybrid simulated annealing – Manta ray foraging optimization algorithm. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 641-657. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.010>
- Micev, M., Čalasan, M., & Oliva, D. (2020). Fractional Order PID Controller Design for an AVR System Using Chaotic Yellow Saddle Goatfish Algorithm. *Mathematics*, 8(7), 1182. <https://doi.org/10.3390/math8071182>
- Mirjalili, S. (2016). SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, 96, 120-133. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022>
- Mokeddem, D., & Mirjalili, S. (2020). Improved Whale Optimization Algorithm applied to design PID plus second-order derivative controller for automatic voltage regulator

- system. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 43(6), 541-552. <https://doi.org/10.1080/02533839.2020.1771205>
- Montano, J., Garzón, O. D., Rosales Muñoz, A. A., Grisales-Noreña, L. F., & Montoya, O. D. (2022). Application of the arithmetic optimization algorithm to solve the optimal power flow problem in direct current networks. *Results in Engineering*, 16, 100654. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100654>
- Mosaad, A. M., Attia, M. A., & Abdelaziz, A. Y. (2019). Whale optimization algorithm to tune PID and PIDA controllers on AVR system. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(4), 755-767. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.07.004>
- Munagala, V. K., & Jatoth, R. K. (2022). Improved fractional PI λ D μ controller for AVR system using Chaotic Black Widow algorithm. *Computers & Electrical Engineering*, 97, 107600. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107600>
- Ozgenc, B., Ayas, M. S., & Altas, I. H. (2022). Performance improvement of an AVR system by symbiotic organism search algorithm-based PID-F controller. *Neural Computing and Applications*, 34(10), 7899-7908. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-06892-4>
- Özmen, H., Ekinci, S., & Izci, D. (2023). Boosted arithmetic optimization algorithm with elite opposition-based pattern search mechanism and its promise to design microstrip patch antenna for WLAN and WiMAX. *International Journal of Modelling and Simulation*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/02286203.2023.2196736>
- Padiachy, V., Mehta, U., Azid, S., Prasad, S., & Kumar, R. (2022). Two degree of freedom fractional PI scheme for automatic voltage regulation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 30, 101046. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.08.003>
- Sahib, M. A. (2015). A novel optimal PID plus second order derivative controller for AVR system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(2), 194-206. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.11.006>
- Shi, X., Yu, X., & Esmaeili-Falak, M. (2023). Improved arithmetic optimization algorithm and its application to carbon fiber reinforced polymer-steel bond strength estimation. *Composite Structures*, 306, 116599. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116599>
- Sikander, A., Thakur, P., Bansal, R. C., & Rajasekar, S. (2018). A novel technique to design cuckoo search based FOPID controller for AVR in power systems. *Computers and Electrical Engineering*, 70, 261-274. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.07.005>
- Snášel, V., Rizk-Allah, R. M., Izci, D., & Ekinci, S. (2023). Weighted mean of vectors optimization algorithm and its application in designing the power system stabilizer. *Applied Soft Computing*, 136, 110085. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110085>

- Suid, M. H., & Ahmad, M. A. (2022). Optimal tuning of sigmoid PID controller using Nonlinear Sine Cosine Algorithm for the Automatic Voltage Regulator system. *ISA Transactions*, 128, 265-286. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.11.037>
- Taib, H., & Bahreininejad, A. (2021). Data clustering using hybrid water cycle algorithm and a local pattern search method. *Advances in Engineering Software*, 153, 102961. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102961>
- Tizhoosh, H. R. (2005). 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)*, 1, 695-701. <https://doi.org/10.1109/CIMCA.2005.1631345>
- Wang, H., Wu, Z., Rahnamayan, S., Liu, Y., & Ventresca, M. (2011). Enhancing particle swarm optimization using generalized opposition-based learning. *Information Sciences*, 181(20), 4699-4714. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.03.016>
- Wang, R.-B., Wang, W.-F., Xu, L., Pan, J.-S., & Chu, S.-C. (2021). An Adaptive Parallel Arithmetic Optimization Algorithm for Robot Path Planning. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 1-22. <https://doi.org/10.1155/2021/3606895>
- Yildiz, B. S., Pholdee, N., Bureerat, S., Yildiz, A. R., & Sait, S. M. (2021). Enhanced grasshopper optimization algorithm using elite opposition-based learning for solving real-world engineering problems. *Engineering with Computers*. <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01368-w>