

## Otomatik Gerilim Regülatörü Sistemi için Farklı Optimizasyon Teknikleri Ayarlı Denetleyici Tasarımı

Özay CAN<sup>1\*</sup> 

### Öz

Otomatik gerilim regülatörü (OGR), güç sistemlerindeki senkron generatörün uç gerilimini kontrol etmek ve düzenlemek amacıyla kullanılan önemli bir kontrol sistemidir. Bu amaçla, bu çalışmada, OGR sistemi için çeşitli meta-sezgisel optimizasyon teknikleri ayarlı denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. OGR sisteminde denetleyici olarak oransal – integral – türev (PID) denetleyici kullanılmıştır ve bu denetleyicinin parametreleri son yıllarda geliştirilmiş olan açlık oyunları algoritması (HGS), INFO algoritması ve goril birlikleri optimizasyonu (GTO) gibi optimizasyon teknikleri yardımıyla optimal olarak ayarlanmıştır. Amaçlanan optimizasyon teknikleri ayarlı PID denetleyicisinin geçici zaman performansları simülasyon çalışmaları yardımıyla incelenmiştir ve aşma değeri, yükselme süresi, yerleşme süresi gibi performans değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Ek olarak, denetleyiciler arasında kutup/sıfır analizi, bode analizi ve gürbüzlük analizi açısından karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan PID denetleyicinin parametrelerinin ayarlanması amacıyla kullanılan HGS, INFO ve GTO optimizasyon tekniklerinin birbirine yakın ve dikkate değer performans gösterdiği görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Otomatik gerilim regülatörü, PID denetleyici, Açlık oyunları algoritması, INFO algoritması, Goril birlikleri optimizasyonu.

## The Controller Design Tuned by Numerous Optimization Techniques for Automatic Voltage Regulator System

### Abstract

The automatic voltage regulator (AVR) is an important control system used to control and regulate the terminal voltage of the synchronous generator in power systems. For this purpose, in this study, various meta-heuristic optimization techniques tuned controller design for the AVR system has been carried out. A proportional – integral – derivative (PID) controller is used as the controller in the AVR system and the parameters of this controller are optimally adjusted using optimization techniques such as the hunger games algorithm (HGS), INFO algorithm and gorilla troops optimization (GTO) developed in recent years. The transient time performances of the PID controller tuned to the proposed optimization techniques were investigated with the help of simulation studies and compared in terms of performance values such as overshoot, rise time, settling time. In addition, comparisons were made between the controllers in terms of pole/zero analysis, bode analysis and robustness analysis. From the results obtained, it is seen that the HGS, INFO and GTO optimization techniques used for adjusting the parameters of the PID controller have close to each other and remarkable performance.

**Keywords:** Automatic voltage regulator, PID controller, Hunger games algorithm, INFO algorithm, Gorilla troops optimization.

<sup>1</sup>Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Rize, Türkiye, ozay.can@erdogan.edu.tr

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-1802-3502>

## 1. Giriş

Senkron generatörlerin uyarım kontrolü, güç sistemlerinin kararlılığını ve elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden birisidir. Otomatik gerilim regülatörü (OGR), senkron generatörün uç gerilimini belirlenen değerler arasında tutmak amacıyla kullanılan bir kontrol sistemidir. Uç gerilimi, generatörün uyarıcı gerilimi değiştirilerek kontrol edilmektedir. Generatör alan sargılarındaki yüksek empedans ve yük değişimi gibi nedenlerden dolayı regülatörün kararlı ve hızlı çalışması zorlaşmaktadır. Bu nedenle, güç sistemlerindeki generatörlere OGR eklenmesi gerekmektedir. Buna rağmen, OGR sistemi salınımlı geçici cevap, maksimum aşma ve kalıcı durum hatası gibi problemlere sahiptir. Bu problemler, OGR sisteminin bir denetleyici ile kontrol edilmesiyle ortadan kaldırılmalıdır.

Basit yapıda olması ve kolay uygulanabilirliği gibi özellikleri nedeniyle oransal – integral – türev (PID) denetleyiciler OGR sisteminde en sık kullanılan denetleyici çeşididir (Bhullar et al., 2020; Burnaz & Ayas, 2020; Çelik, 2018; İzci & Ekinici, 2021; Micev, Čalasan, & Oliva, 2021; Mosaad et al., 2019). PID denetleyicinin  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  olmak üzere üç adet parametresinin optimal olarak belirlenmesi karmaşık bir problemdir. Bu problem, Ziegler-Nichols ve Cohen-Coon (CC) gibi geleneksel yöntemler veya deneme yanılma yolu ile çözülebilir. Ancak, bu iki yöntem optimal değerleri bulamayabilir ve sistemde uzun süreli salınımlara ve istenmeyen aşmalara neden olmaktadır (Ayas ve Sahin, 2021; Hekimoğlu, 2019). Bu nedenle, araştırmacılar PID parametrelerini ayarlamak amacıyla böbrek ilhamlı algoritma (IKA) (Ekinici & Hekimoğlu, 2019), simbiyotik organizma arama algoritması (SOS) (Çelik ve Durgut, 2018), atom arama optimizasyonu (ASO) (Özgenç ve ark., 2020), yerçekimi arama algoritması (GSA) (Duman ve ark., 2016), hayalet vatoz arama algoritması (MRFO) (Micev ve ark., 2021b), ağaç tohumu algoritması (TSA) (Kose, 2020) gibi çeşitli optimizasyon teknikleri kullanmıştır. Buna ek olarak, PID denetleyici ile kıyaslandığında  $\lambda$  ve  $\mu$  olmak üzere iki adet fazla parametreye sahip olan kesir dereceli PID (FOPID) denetleyiciler (Jumani ve ark., 2020; Khan ve ark., 2019; Micev ve ark., 2020), PIDD<sup>2</sup> denetleyiciler (Ekinici et al., 2023; İzci et al., 2023; Micev, Čalasan, & Radulović, 2021) ve kesir dereceli PIDD<sup>2</sup> (FOPIDD<sup>2</sup>) (Tabak, 2021) denetleyiciler OGR sistemlerinde tercih edilmektedir. Ancak, söz konusu çalışmaların sayısı PID denetleyicilere kıyasla daha az sayıdadır.

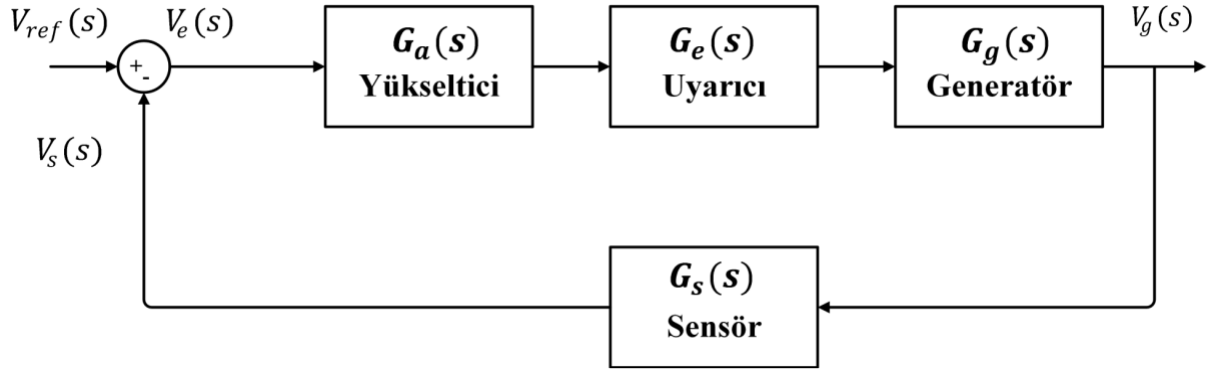
Konu ile ilgili literatür araştırmasından görüldüğü üzere, OGR sisteminde kullanılan denetleyici kadar bu denetleyicinin parametrelerinin optimal olarak ayarlanması amacıyla kullanılan optimizasyon tekniği de dikkate değer sonuçlar alma noktasında büyük önem arz etmektedir. Ancak OGR sisteminde şu ana kullanılan optimizasyon tekniklerinin tam olarak istenen performansı sağladığı söylenemez. Bu doğrultuda, OGR sisteminde sıkça kullanılan PID denetleyicinin parametrelerinin yeni optimizasyon teknikleriyle belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu

çalışmada, açıklık oyunları algoritması (HGS), INFO algoritması ve goril birlikleri optimizasyonu (GTO) gibi yeni geliştirilmiş ve daha önce OGR sisteminde kullanılmamış olan optimizasyon yöntemleri yardımıyla PID denetleyicinin parametrelerinin ayarlanması amaçlanmıştır. Söz konusu optimizasyon teknikleri ayarlı PID denetleyicinin performansı geçici durum analizi, kutup/sıfır analizi, bode analizi ve gürbüzlük analizi gibi durumlar altında incelenmiştir ve üç yöntemin de sistemin aşma değeri, yükselme süresi ve yerleşme süresi bakımından birbirine yakın ve dikkate değer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çalışmanın geri kalan kısımları şu şekilde oluşturulmuştur: OGR sistemi modeli hakkında bilgi Bölüm 2’de verilmiştir. PID denetleyicinin parametrelerini ayarlamak amacıyla kullanılan optimizasyon teknikleri Bölüm 3’te verilmiştir. Bölüm 4’te simülasyon çalışmaları ve bulgular verildikten sonra Bölüm 5’te çalışma sonlandırılmıştır.

## 2. PID Denetleyicili OGR Sistemi

Denetimsiz bir OGR sistemi, Şekil 1’de gösterildiği gibi, yükseltici, uyarıcı, generatör ve sensör olmak üzere dört farklı bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenlerin her biri bir kazanç ( $K$ ) ve bir zaman sabitinden ( $\tau$ ) oluşan birinci dereceden transfer fonksiyonları ile temsil edilmektedir. Şekilde,  $V_{ref}(s)$  referans giriş gerilimini,  $V_s(s)$  sensör çıkış gerilimini,  $V_e(s)$  hata gerilimini ve  $V_g(s)$  generatör çıkış gerilimini ifade etmektedir.



Şekil 1. Denetimsiz OGR sistemi modeli.

**Tablo 1.** OGR sistem bileşenlerinin transfer fonksiyonları ve parametreleri.

Bileşen	Transfer fonksiyonu	Kazanç aralığı	Zaman sabiti aralığı
Yükseltici	$G_a(s) = \frac{K_a}{1 + \tau_a s}$	$10 \leq K_a \leq 40$	$0,02 \leq \tau_a \leq 0,1$
Uyarıcı	$G_e(s) = \frac{K_e}{1 + \tau_e s}$	$1 \leq K_e \leq 10$	$0,4 \leq \tau_e \leq 1$
Generatör	$G_g(s) = \frac{K_g}{1 + \tau_g s}$	$0,7 \leq K_g \leq 1$	$1 \leq \tau_g \leq 2$
Sensör	$G_s(s) = \frac{K_s}{1 + \tau_s s}$	$0,9 \leq K_s \leq 1,1$	$0,001 \leq \tau_s \leq 0,06$

Tablo 1’de OGR sistem bileşenlerinin transfer fonksiyonları ve parametre aralıkları verilmiştir. Yükseltici, uyarıcı, generatör ve sensör bileşenlerinin kazanç değerleri sırasıyla 10, 1, 1 ve 1 seçilmiştir. Ek olarak, bileşenlerin zaman sabiteleri sırasıyla 0,1 sn, 0,4 sn, 1 sn ve 0,01 sn olarak belirlenmiştir (Ekinci ve ark., 2022).

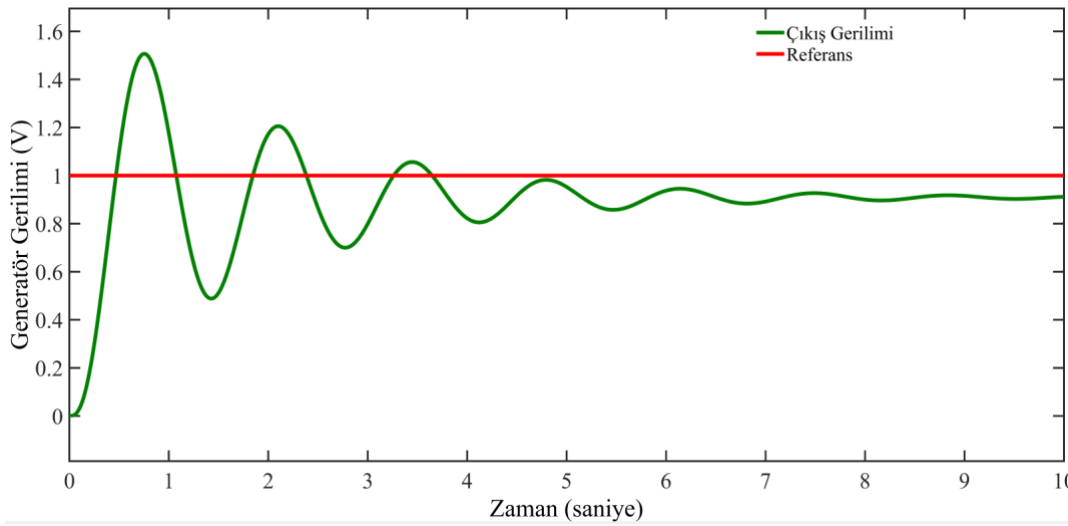
Sistem bileşenlerinin birinci dereceden transfer fonksiyonları kullanılarak elde edilen denetimsiz OGR sisteminin kapalı çevrim transfer fonksiyonu eşitlik (1)’de verilmiştir.

$$G_{OGR}(s) = \frac{V_g(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{G_a(s)G_e(s)G_g(s)}{1 + G_a(s)G_e(s)G_g(s)G_s(s)} \quad (1)$$

Seçilen parametre değerleri eşitlik (1)’de yerine yazıldığında aşağıdaki eşitlik (2) elde edilir.

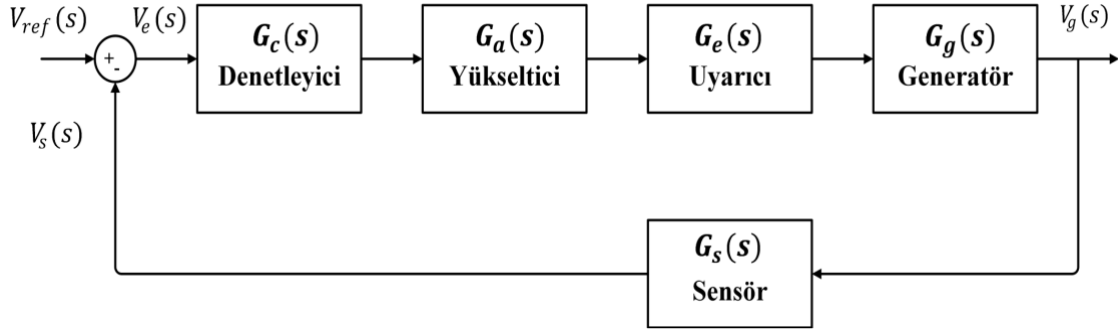
$$G_{OGR}(s) = \frac{0,1s + 10}{0,0004s^4 + 0,0454s^3 + 0,555s^2 + 1,51s + 11} \quad (2)$$

Eşitlik (2)’deki transfer fonksiyonuna sahip denetimsiz OGR sisteminin birim basamak cevabı Şekil 2’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, sistem kararlı olmasına rağmen sistemin birim basamak cevabı yüksek salınım içermektedir.



Şekil 2. Denetimsiz OGR sisteminin birim basamak cevabı.

Sistem,  $s_{p1,2} = -0,5198 \pm 4,6642j$  olmak üzere iki adet karmaşık kutba ve  $s_{p3} = -99,971$  ile  $s_{p4} = -12,489$  olmak üzere iki adet gerçek kutba sahiptir. Sistemin yükselme süresi 0,261 sn, yerleşme süresi 6,99 sn, aşması %65,7 ve kalıcı durum değeri 0,909 pu değerindedir. Bu değerlerden görülmektedir ki OGR sistemine Şekil 3’te görüldüğü gibi bir PID denetleyici eklenmesi gerekmektedir.



Şekil 3. PID denetleyicili OGR sistemi modeli.

PID denetleyici, sistemin dinamik performansını arttırmak ve kalıcı durum hatasını azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla kullanılmaktadır. PID denetleyicinin transfer fonksiyonu eşitlik (3)'te verilmiştir. Eşitlikte,  $K_p$  oransal kazancı,  $K_i$  integral kazancını,  $K_d$  ise türev kazancını temsil etmektedir. Oransal kazanç, yükselme zamanını, integral kazanç kalıcı durum hatasını azaltırken türev kazanç aşmayı azaltmaktadır.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3)$$

Optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan çeşitli amaç fonksiyonları bulunmaktadır. Mutlak hatanın toplamı (IAE), hata karelerinin toplamı (ISE), zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı (ITAE), zaman ağırlıklı hata karelerinin toplamı (ITSE) bunlardan en popüler olanlarıdır. Söz konusu amaç fonksiyonlarından IAE ve ISE küçük değerde aşma değeri sağlamasına rağmen uzun oturma süresi vermektedir. Buna karşın, ITAE ve ITSE oturma süresinin daha kısa olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak ITAE kullanılmıştır. ITAE eşitlik (4)'te gösterildiği gibidir. Ayrıca, ilgili literatür çalışması gözönünde bulundurularak denetleyici parametrelerinin alt sınırı 0,2 olarak üst sınırı ise 2 olarak belirlenmiştir (Ekinci & Hekimoğlu, 2019).

$$ITAE = \int_0^t t|e|dt \quad (4)$$

### 3. Optimizasyon Teknikleri

Çalışmanın bu bölümünde, OGR sistemi için PID denetleyicinin parametrelerinin optimal olarak belirlenmesi amacıyla kullanılan açıklık oyunları algoritması (HGS), INFO algoritması ve goril birlikleri optimizasyonu (GTO) isimli yenilikçi meta-sezgisel optimizasyon teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmada amaç, bu algoritmaların matematiksel modellerinin oluşturulması hakkında

bilgiler vermek olmadığı için kısa bilgiler verildikten sonra OGR sistemi ile ilgili benzetim çalışmaları ve bu çalışmaların sonuçlarına geçilmiştir.

### **3.1. Açlık Oyunları Algoritması (HGS)**

Açlık oyunları algoritması (HGS), sürü halinde yaşayan canlıların avlanma sürecini temel olarak geliştirilmiş bir optimizasyon tekniğidir (Yang ve ark., 2021). Söz konusu algoritmanın matematiksel modeli oluşturulurken “yiyecek yaklaşımı” ve “açlık rolü” olmak üzere iki farklı aşama gerçekleştirilir. Bu aşamalar ve gerekli matematiksel formüller ile ilgili daha fazla bilgiye (Yang et al., 2021) kaynağından ulaşılabilir.

### **3.2. INFO Algoritması**

INFO algoritması, bir arama uzayındaki vektör dizilerinin ortalama ağırlıklarını hesaplayan popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir (Ahmadianfar ve ark., 2022) Söz konusu algoritmanın matematiksel modeli oluşturulurken “kural güncelleme”, “vektör birleşimi” ve “yerel arama” olmak üzere üç farklı aşama gerçekleştirilir. Bu aşamalar ve gerekli matematiksel formüller ile ilgili daha fazla bilgiye (Ahmadianfar et al., 2022) kaynağından ulaşılabilir.

### **3.3. Goril Birlikleri Optimizasyonu (GTO)**

Goril birlikleri optimizasyonu (GTO), gorillerin yiycek arama davranışı ve sosyal yaşamı temel olarak geliştirilmiş bir optimizasyon tekniğidir (Abdollahzadeh ve ark., 2021). Söz konusu algoritmanın matematiksel modeli oluşturulurken “keşif” ve “işleme” olmak üzere iki farklı aşama gerçekleştirilir. Bu aşamalar ve gerekli matematiksel formüller ile ilgili daha fazla bilgiye (Abdollahzadeh et al., 2021) kaynağından ulaşılabilir.

## **4. Benzetim Çalışmaları ve Bulgular**

Çalışmanın bu bölümünde, HGS, INFO ve GTO ayarlı PID denetleyicinin performansı MATLAB/SIMULINK ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmaları yardımıyla değerlendirilmiştir. İlk olarak, Bölüm 2’de aktarılan OGR sistemi modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, amaçlanan optimizasyon teknikleri için denetleyici davranışı geçici cevap analizi, kutup/sıfır analizi, bode analizi ve gürbüzlük analizi gibi durumlar altında incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında, her bir algoritma için popülasyon sayısı 30 iterasyon sayısı ise 50 olarak alınmıştır.

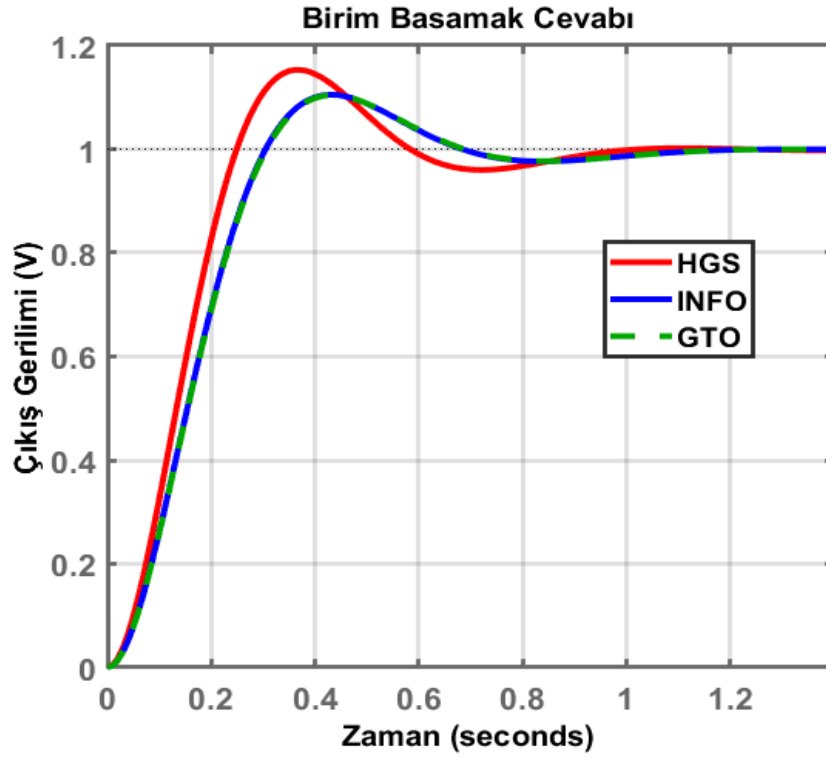
#### 4.1. Geçici Cevap Analizi

Yüzde aşma ( $\%M$ ), yükselme süresi ( $t_r$ ) ve yerleşme süresi ( $t_s$ ) gibi büyüklükler bir birim basamak girişi için sistemin geçici davranışını tanımlayan performans özellikleridir. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde, kullanılan optimizasyon teknikleri ayarlı PID denetleyicinin geçici cevap davranışı Tablo 2’de verilen optimal denetleyici parametreleri kullanılarak incelenmiştir.

**Tablo 2.** Üç optimizasyon tekniği için optimal denetleyici parametreleri.

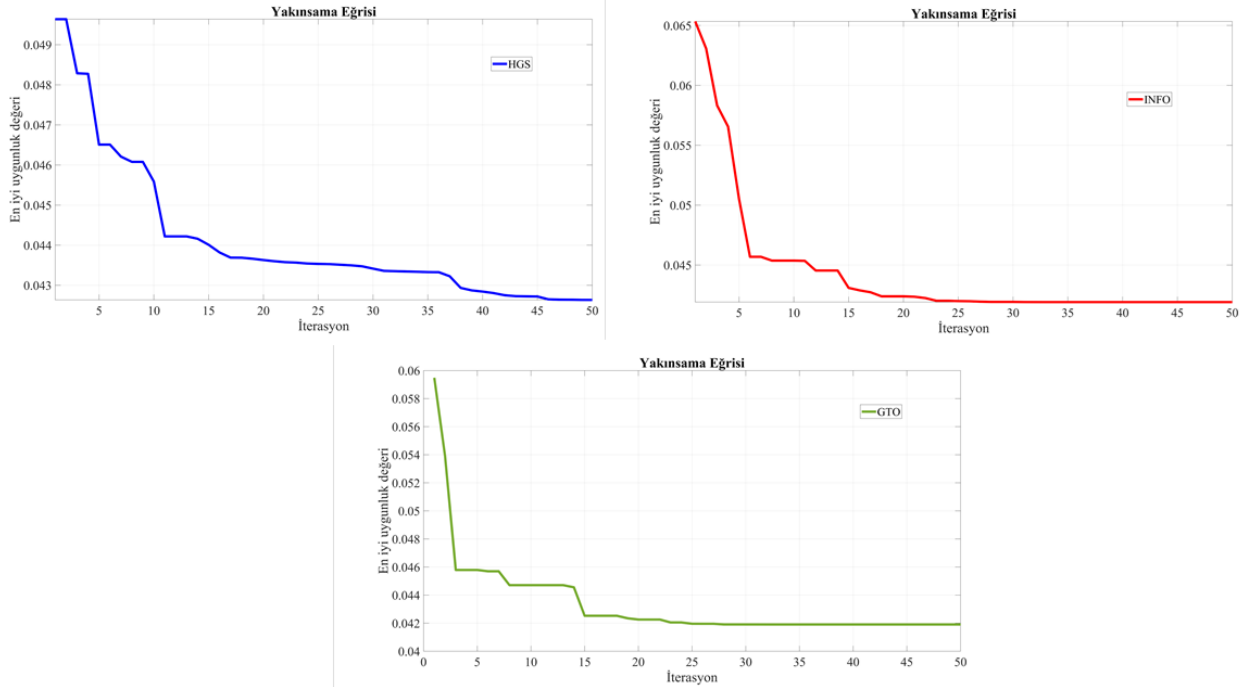
Optimizasyon Tekniği	$K_p$	$K_i$	$K_d$
HGS	1,1795	0,8126	0,37789
INFO	0,9584	0,6656	0,3004
GTO	0,9538	0,6628	0,2983

Tablo 2’de verilen denetleyici parametreleri kullanılarak elde edilen geçici cevap analizleri Şekil 4’te gösterilmiştir. Bu şekillerden elde edilen sistem parametre değerleri ise Tablo 3’te verilmiştir. Tablo ve şekilden görüldüğü üzere, üç optimizasyon tekniğinden INFO ve GTO algoritmaları sistemin  $\%M$  değeri bakımından HGS algoritmasına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Sistemin  $t_r$  ve  $t_s$  değeri açısından ise HGS yönteminin söz konusu iki yönetime göre daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, kullanılan algoritmalar ayarlı PID denetleyicinin performansı, çekirge algoritması (GOA) ayarlı PID denetleyici (Hekimoğlu & Ekinci, 2018) ve diferansiyel evrim (DE) ayarlı PID denetleyici (Gozde & Taplamacioglu, 2011) gibi yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Tablo 3’te verilen değerlerden bu çalışmada kullanılan algoritmalar ayarlı PID denetleyicinin söz konusu çalışmalardan daha iyi performans sergilediği görülmektedir.



Şekil 4. Üç optimizasyon algoritması için geçici cevap analizi.

Ek olarak, her üç yöntem de birbirine yakın değerde ITAE değeri vermiştir. ITAE için üç algoritmaya ait yakınsama grafikleri Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5. Üç algoritma ayarlı PID denetleyicisi için yakınsama eğrileri.



**Tablo 3.** Sistem parametre değerleri.

Optimizasyon Tekniği	%M	$t_r$ (sn)	$t_s$ (sn)	ITAE
HGS	15,3	0,168	0,869	0,042635
INFO	10,5	0,205	0,921	0,041907
GTO	10,4	0,206	0,92	0,0419
GOA	20,5	0,130	0,971	---
DE	33	0,156	0,952	---

#### 4.2. Kutup/Sıfır Analizi

Bir sistem için kutup/sıfır analizi kapalı çevrim kutuplarının konumları ile onlara karşılık gelen sönüm oranlarını verir ve sistemin karakteristik kararlılığını belirler. Bu çalışmada kullanılan üç yöntem ayarlı PID denetleyici için kapalı çevrim kutupları ve sönüm oranları Tablo 4’te verilmiştir. Tablodan görülmektedir ki tüm yöntemler için denetleyicinin kutupları sol yarı düzlemde yani sistem kararlıdır. Ek olarak, üç farklı optimizasyon tekniği için de sönüm oranlarının 1’e yakın olduğu anlaşılmaktadır.

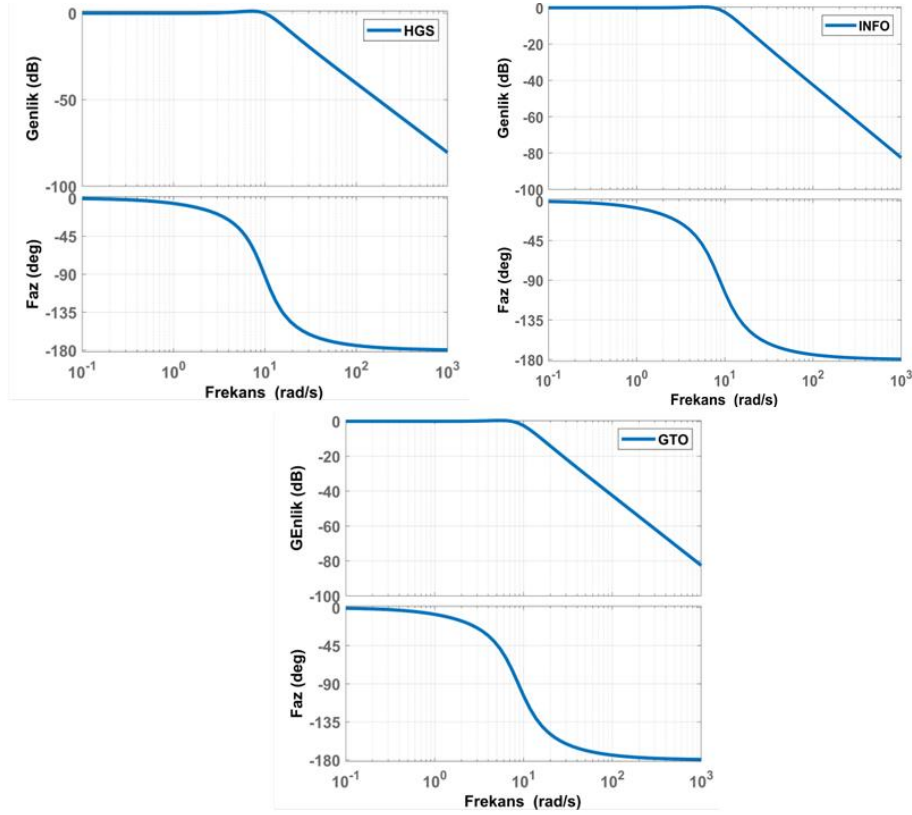
**Tablo 4.** Sistem kutupları ve sönüm oranları.

Optimizasyon Tekniği	Kapalı Çevrim Kutupları	Sönüm Oranları
HGS	-1,03	1
	-2,01	1
	-4,71-8,65j	0,479
	-4,71+8,65j	0,479
	-102	1
INFO	-1,03	1
	-2,08	1
	-4,79-7,39j	0,544
	-4,79+7,39j	0,544
	-102	1
GTO	-1,02	1
	-2,08	1
	-4,79-7,35j	0,546
	-4,79+7,35j	0,546
	-102	1

#### 4.3. Bode Analizi

Bode analizi, bir kontrol sisteminin frekans cevabını analiz etme noktasında faydalı bir yöntemdir. Çalışmada kullanılan HGS ayarlı PID, INFO ayarlı PID ve GTO ayarlı PID denetleyici için bode diyagramları Şekil 6’da gösterilmiştir. Ayrıca diyagramlardan elde edilen sayısal veriler Tablo 5’te verilmiştir. Yüksek faz ve gecikme marjini ile düşük maksimum kazanç sistemin frekans

cevabının iyi olduğunu göstergesidir. Tablodan, INFO ve GTO yöntemlerinin HGS yöntemine göre daha iyi performans sağladığı görülmektedir.



Şekil 6. Üç algoritma ayarlı PID denetleyicisi için bode diyagramları.

Tablo 5. Frekans cevabı için sayısal veriler.

Optimizasyon Tekniği	Maksimum Kazanç (dB)	Faz Marjini (derece)	Gecikme Marjini (sn)
HGS	1,22 (7,25 rad/sn)	88,6	0,156
INFO	0,493 (5,46 rad/sn)	106	0,249
GTO	0,481 (5,45 rad/sn)	106	0,252

#### 4.4. Gürbüzlük Analizi

Çalışmanın bu bölümünde, amaçlanan optimizasyon yöntemleri ayarlı PID denetleyicinin gürbüzlüğünü göstermek amacıyla sistem bileşenlerinin zaman sabitleri ( $\tau_a, \tau_e, \tau_g$ ) +%50, -%50, +%25 ve -%25 oranında değiştirilerek sistem davranışı incelenmiştir. Tablo 6'da  $\tau_a$  değerinin değişmesi durumunda, Tablo 7'de  $\tau_e$  değerinin değişmesi durumunda, Tablo 8'de ise  $\tau_g$  değerinin değişmesi durumunda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Tablodaki sonuçlardan her üç yöntem için de

zaman sabitlerinin değişimi durumunda sistemin  $\%M$ ,  $t_r$  ve  $t_s$  değerleri bakımından az etkilendiği görülmektedir. Bu sayede amaçlanan PID denetleyicinin gürbüzlüğü kanıtlanmış olur.

**Tablo 6.**  $\tau_a$  değişimi durumunda sistem performans değerleri.

Optimizasyon Tekniği	$\tau_a + \%50$			$\tau_a - \%50$		
	$\%M$	$t_r$	$t_s$	$\%M$	$t_r$	$t_s$
HGS	23	0,188	1,06	3,52	0,153	0,371
INFO	18	0,223	1,17	0,167	0,199	0,309
GTO	17,9	0,224	1,18	0,132	0,2	0,312
	$\tau_a + \%25$			$\tau_a - \%25$		
	$\%M$	$t_r$	$t_s$	$\%M$	$t_r$	$t_s$
HGS	19,5	0,178	0,969	10,1	0,159	0,748
INFO	14,6	0,214	1,06	5,63	0,198	0,537
GTO	14,5	0,215	1,06	5,55	0,199	0,54

**Tablo 7.**  $\tau_e$  değişimi durumunda sistem performans değerleri.

Optimizasyon Tekniği	$\tau_e + \%50$			$\tau_e - \%50$		
	$\%M$	$t_r$	$t_s$	$\%M$	$t_r$	$t_s$
HGS	16	0,217	0,835	15,7	0,112	1,03
INFO	12,9	0,263	1,04	8,81	0,137	1,12
GTO	12,9	0,264	1,04	8,64	0,138	1,12
	$\tau_e + \%25$			$\tau_e - \%25$		
	$\%M$	$t_r$	$t_s$	$\%M$	$t_r$	$t_s$
HGS	15,5	0,193	0,683	15,4	0,142	0,786
INFO	11,6	0,235	0,817	9,56	0,173	0,9
GTO	11,6	0,236	0,822	9,45	0,174	0,903

**Tablo 8.**  $\tau_g$  değişimi durumunda sistem performans değerleri.

Optimizasyon Tekniği	$\tau_g + \%50$			$\tau_g - \%50$		
	$\%M$	$t_r$	$t_s$	$\%M$	$t_r$	$t_s$
HGS	11	0,231	0,841	25,3	0,104	1,13
INFO	8,04	0,285	1,51	18,5	0,124	1,39
GTO	8,03	0,286	1,53	18,4	0,124	1,39
	$\tau_g + \%25$			$\tau_g - \%25$		
	$\%M$	$t_r$	$t_s$	$\%M$	$t_r$	$t_s$
HGS	12,7	0,2	0,672	19,2	0,137	0,793
INFO	8,79	0,244	0,803	13,5	0,165	0,925
GTO	8,75	0,246	0,809	13,4	0,166	0,929

## 5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, güç sistemlerindeki senkron generatörlerin uç gerilimini belirlenen değerlerde tutmak amacıyla kullanılan OGR sistemi için PID denetleyici tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla, PID denetleyicinin parametrelerinin optimal olarak ayarlanması için HGS, INFO ve GTO gibi son yıllarda geliştirilmiş ve daha önce OGR sisteminde kullanılmamış olan yöntemler kullanılmıştır.

Amaçlanan denetleyicinin geçici cevap analizleri benzetim çalışmaları yardımıyla incelenerek optimizasyon teknikleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca, kutup/sıfır analizi, bode analizi ve gürbüzlük analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan üç optimizasyon tekniğinin sistemin aşma değeri, yükselme süresi ve yerleşme süresi bakımından birbirine yakın ve dikkate değer performans gösterdiği görülmektedir. Bunun sonucunda, söz konusu algoritmalar ayarlı PID denetleyicinin OGR sisteminde güvenilir ve etkili bir yöntem olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### Kaynaklar

- Abdollahzadeh, B., Soleimani Gharehchopogh, F., & Mirjalili, S. (2021). Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(10), 5887–5958. <https://doi.org/10.1002/int.22535>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116516>
- Ayas, M. S., & Sahin, E. (2021). FOPID controller with fractional filter for an automatic voltage regulator. *Computers and Electrical Engineering*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106895>
- Bhullar, A. K., Kaur, R., & Sondhi, S. (2020). Enhanced crow search algorithm for AVR optimization. *Soft Computing*, 24(16), 11957–11987. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04640-w>
- BURNAZ, S. A. N., & AYAS, M. Ş. (2020). Effects of objective function in PID controller design for an AVR system. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, 245–255. <https://doi.org/10.18100/ijamec.803257>
- Çelik, 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>
- Çelik, E., & Durgut, R. (2018). 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. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.08.006>
- Duman, S., Yörükeren, N., & Altaş, I. H. (2016). Gravitational search algorithm for determining controller parameters in an automatic voltage regulator system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(4), 2387–2400. <https://doi.org/10.3906/elk-1404-14>
- Ekinci, S., & Hekimoğlu, B. (2019). Improved Kidney-Inspired Algorithm Approach for Tuning of PID Controller in AVR System. *IEEE Access*, 7, 39935–39947. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906980>
- Ekinci, S., Izci, D., Eker, E., & Abualigah, L. (2022). An effective control design approach based on novel enhanced aquila optimizer for automatic voltage regulator. *Artificial Intelligence Review*. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10216-2>
- 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>
- Gozde, H., & Taplamacioglu, M. C. (2011). Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. *Journal of the Franklin Institute*, 348(8), 1927–1946. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2011.05.012>

- 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). *5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE 2018) : May 3-5, 2018, Istanbul, Turkey.*
- İzci, D., & Ekinci, 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., Ekinci, 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>
- Jumani, T. A., Mustafa, M. W., Hussain, Z., Md. Rasid, M., Saeed, M. S., Memon, M. M., Khan, I., & Nisar, K. S. (2020). Jaya optimization algorithm for transient response and stability enhancement of a fractional-order PID based automatic voltage regulator system. *Alexandria Engineering Journal*, 59(4), 2429–2440. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.005>
- 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>
- Kose, E. (2020). Optimal Control of AVR System with Tree Seed Algorithm-Based PID Controller. *IEEE Access*, 8, 89457–89467. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993628>
- 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). <https://doi.org/10.3390/math8071182>
- Micev, M., Čalasan, M., & Oliva, D. (2021). Design and robustness analysis of an Automatic Voltage Regulator system controller by using Equilibrium Optimizer algorithm. *Computers and Electrical Engineering*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106930>
- Micev, M., Čalasan, M., & Radulović, M. (2021, February 16). Optimal design of real PID plus second-order derivative controller for AVR system. *2021 25th International Conference on Information Technology, IT 2021*. <https://doi.org/10.1109/IT51528.2021.9390145>
- 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>
- ÖZGENÇ, B., AYAS, M. Ş., & ALTAŞ, İ. (2020). Otomatik Gerilim Regülatörü için Evrimsel Algoritma Tabanlı Filtreli PID Denetleyici Tasarımı. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 74–90. <https://doi.org/10.31466/kfbd.719953>
- Tabak, A. (2021). Maiden application of fractional order PID plus second order derivative controller in automatic voltage regulator. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(12). <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13211>
- Yang, Y., Chen, H., Heidari, A. A., & Gandomi, A. H. (2021). Hunger games search: Visions, conception, implementation, deep analysis, perspectives, and towards performance shifts. *Expert Systems with Applications*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114864>