

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AVR SİSTEMİ İÇİN ADAPTİF GAUSS TABANLI KESİR DERECELİ
PID DENETLEYİCİ TASARIMI VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şeymanur BAŞLIK

MART 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AVR SİSTEMİ İÇİN ADAPTİF GAUSS TABANLI KESİR DERECELİ
PID DENETLEYİCİ TASARIMI VE ANALİZİ**

Şeymanur BAŞLIK

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 / 02 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 25 / 03 / 2025

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKYAZI

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“AVR Sistemi için Adaptif Gauss Tabanlı Kesir Dereceli PID Denetleyici Tasarımı ve Analizi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKYAZI’ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve değerli önerileri ile tezime büyük katkılar sağlayan, ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması sürecinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan Arş. Gör. Bora ÇAVDAR’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Son olarak, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan aile fertlerime ve desteği için değerli arkadaşım Ömer ÖZTÜRK’e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Şeymanur BAŞLIK
Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “AVR Sistemi için Adaptif Gauss Tabanlı Kesir Dereceli PID Denetleyici Tasarımı ve Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKYAZI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25/03/2025

Şeymanur BAŞLIK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Taraması	4
1.3. Tezin Motivasyonu, Amacı, Konusu ve Özgünlüğü	9
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	11
2.1. AVR Sistem Modeli Tanıtımı	11
2.2. Önerilen Gauss FOPID Denetleyicisi Tasarımı.....	13
2.3. Denizanası Optimizasyon Algoritması (JS)	21
2.3.1. Okyanus Akıntısı.....	22
2.3.2. Denizanası Sürüsü.....	24
2.3.3. Zaman Kontrol Mekanizması.....	25
2.4. Amaç Fonksiyonu Tanıtımı.....	27
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	29
3.1. Zaman Bölgesi Analizi ve Sonuçları.....	29
3.2. Gürbüzlük Analizi ve Sonuçları	34
3.3. Referans Sinyal Değişimi Analizi ve Sonuçları	43
3.4. Bozucu Yük Girişi Analizi ve Sonuçları	45
3.5. Doğrusal Olmayan Etki Analizi ve Sonuçları	48
4. SONUÇLAR.....	51
5. ÖNERİLER.....	53
6. KAYNAKLAR	54
7. EKLER.....	62
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

AVR SİSTEMİ İÇİN ADAPTİF GAUSS TABANLI KESİR DERECELİ PID DENETLEYİCİ TASARIMI VE ANALİZİ

Şeymanur BAŞLIK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKYAZI
2025, 61 Sayfa, 3 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasında, AVR sisteminin dinamik tepkisini ve sağlamlığını iyileştirme amacıyla yeni bir kontrol yöntemi olan gauss tabanlı PID (GPID) ve gauss tabanlı kesir dereceli PID (GFOPID) tasarlanmıştır. Başarılı bir optimizasyon algoritması olan denizanası arama algoritması (JS), GPID ve önerilen GFOPID kontrol stratejilerinin parametrelerini optimize etmek için kullanılmıştır. JS algoritmasıyla optimize edilen GPID ve GFOPID denetleyicilerinin optimizasyon sürecinde ZLG ve ITAE amaç fonksiyonları kullanılmıştır. JS-GPID ve JS-GFOPID denetleyicilerinin AVR sistemindeki etkinliği, zaman bölgesi, gürbüzlük, referans sinyal değişimi, bozucu yük girişi ve doğrusal olmayan etki analizleri ile kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, GPID denetleyicisi literatürde son yıllarda yapılan PID çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen GFOPID denetleyicisi ise son yıllarda önemli ölçüde kabul görmüş farklı meta sezgisel algoritmalar kullanılarak ayarlanmış kesir dereceli PID (FOPID) çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalı analizler sonucunda, JS-GFOPID kontrol tekniğinin diğer kontrol tekniklerine göre üstünlüğü doğrulanmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen JS-GFOPID kontrol tekniğinin kararlılık ve sağlamlık açısından oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: AVR, adaptif gauss tabanlı FOPID, ITAE, ZLG, denizanası arama algoritması

Master Thesis

SUMMARY

DESIGN AND ANALYSIS OF AN ADAPTIVE GAUSS-BASED FRACTIONAL ORDER PID CONTROLLER FOR AVR SYSTEM

Şeymanur BAŞLIK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Energy Systems Engineering Graduate Program
Supervisor: Dr. Asst. Prof. Ömür AKYAZI
2025, 61 Pages, 3 Pages Appendix

In this thesis, a new control method, Gaussian-based PID (GPID) and Gaussian-based fractional order PID (GFOPID), are designed to improve the dynamic response and robustness of the AVR system. The jellyfish search algorithm (JS), a successful optimization algorithm, is used to optimize the parameters of GPID and the proposed GFOPID control strategies. ZLG and ITAE objective functions are used in the optimization process of GPID and GFOPID controllers optimized by JS algorithm. The effectiveness of the JS-GPID and JS-GFOPID controllers in the AVR system is comprehensively evaluated through time domain, robustness, reference signal variation, disturbance load input and nonlinear analysis. The simulation results are compared with the recent PID studies in the literature. The proposed GFOPID controller is compared with the fractional order PID (FOPID) tuned using different meta-heuristic algorithms that have been widely accepted in recent years. As a result of this comparative analysis, the superiority of the JS-GFOPID control technique over other control techniques is verified. Simulation results show that the proposed JS-GFOPID control technique is highly successful in terms of stability and robustness.

Key Words: AVR, adaptive gauss-based FOPID, ITAE, ZLG, jellyfish search algorithm

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. AVR blok diyagramı gösterimi	11
Şekil 2. Denetleyici olmadan AVR sisteminin geçici yanıtı	13
Şekil 3. PID blok diyagramı gösterimi	14
Şekil 4. Koordinat düzleminde denetleyici tipleri gösterimi	16
Şekil 5. FOPID Denetleyicisi blok diyagramı gösterimi	16
Şekil 6. Parametrelerin Etkileri	19
Şekil 7. Yukarı yöne bakan (a) ve aşağı yöne bakan (b) Gauss fonksiyonları	20
Şekil 8. Denetleyici yapısının gösterimi	21
Şekil 9. Denizanası algoritması akış diyagramı	26
Şekil 10. JS algoritması ile optimize edilen GPID ve GFOPID denetleyicilerinin farklı amaç fonksiyonlarından elde edilen geçici yanıt performansları	31
Şekil 11. GPID/ITAE için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri	35
Şekil 12. GPID/ZLG için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri	37
Şekil 13. GFOPID/ITAE için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri	39
Şekil 14. GFOPID/ZLG için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri	41
Şekil 15. Kullanılan referans sinyal değişimi	43
Şekil 16. GFOPID ve GPID denetleyicilerin oluşturulan referans sinyalini takip etme performansları	44
Şekil 17. Bozucu yük girişli AVR sistemi	46
Şekil 18. Bozucu yük girişi durumunda GFOPID ve GPID denetleyicilerinin tepkileri	46
Şekil 19. Doğrusal olmayan analizi için kullanılan AVR sistemi blok diyagramı gösterimi	48
Şekil 20. (a) GPID/ITAE, (b) GPID/ZLG için doğrusal ve doğrusal olmayan etki analizi sonucu	49
Şekil 21. (a) GFOPID/ITAE, (b) GFOPID/ZLG için doğrusal ve doğrusal olmayan etki analizi sonucu	49
Şekil 22. GPID/ITAE $t=10$ s için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri	63

Şekil 23. GPID/ZLG $t=10$ s için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri	64
--	----



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Son zamanlarda yapılmış olan AVR çalışmaları.....	8
Tablo 2. AVR sisteminin kazanç ve zaman sabitleri.....	12
Tablo 3. Kapalı çevrim sisteminde kontrolörlerin etkileri	14
Tablo 4. Kesir dereceli parametre değerlerine göre oluşan denetleyici tipleri.....	15
Tablo 5. Denetleyici parametreleri için alt ve üst sınır değerleri	29
Tablo 6. Optimizasyon sonucunda elde edilen amaç fonksiyonlarının parametre değerleri.....	30
Tablo 7. Tasarlanan GPID ve GFOPID denetleyicilerinin zaman bölgesi analizi sonuçları.....	31
Tablo 8. GPID denetleyicisi ile literatürde yer alan çalışmaların zaman bölgesi analizi sonuçlarının karşılaştırması.....	32
Tablo 9. GFOPID denetleyicisi ile literatürde yer alan çalışmaların zaman bölgesi analizi sonuçlarının karşılaştırması	33
Tablo 10. GPID/ITAE için gürbüzlük analizi sonucu	36
Tablo 11. GPID/ZLG için gürbüzlük analizi sonucu	38
Tablo 12. GFOPID/ITAE için gürbüzlük analizi sonucu	40
Tablo 13. GFOPID/ZLG için gürbüzlük analizi sonucu	42
Tablo 14. Referans sinyal değişikliği altındaki farklı denetleyicilerin hata tabanlı performans metrikleri.....	45
Tablo 15. Bozucu yük girişi altındaki farklı denetleyicilerin hata tabanlı performans metrikleri	47
Tablo 16. Doğrusal ve doğrusal olmayan çalışma koşulları altında AVR sisteminde GPID ve GFOPID denetleyicilerinin geçici yanıt sonuçları	50

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

K_A	: Yükselteç kazanç sabiti
K_E	: Uyarıcı kazanç sabiti
K_G	: Generatör kazanç sabiti
K_S	: Sensör kazanç sabiti
τ_A	: Yükselteç zaman sabiti
τ_E	: Uyarıcı zaman sabiti
τ_G	: Generatör zaman sabiti
τ_S	: Sensör zaman sabiti
K_P	: Oransal kazanç
K_i	: İntegral kazancı
K_d	: Türev kazancı
λ	: Üstel pozitif sayı
μ	: Üstel pozitif sayı
k_0	: sıfır giriş için sınırlayıcı değer
k_1	: sonsuz giriş için sınırlayıcı değer
q	: içbükey açıklığı
t_s	: Yerleşme zamanı (s)
t_r	: Yükselme zamanı (s)
t_p	: Tepe zamanı (s)
M_p	: Maksimum aşım (%)
Hz	: Hertz
s	: Saniye
IAE	: Mutlak hatanın integrali
ISE	: Hatanın karesinin integrali
ITAE	: Zamanla çarpılan mutlak hatanın integrali
ITSE	: Zamanla çarpılan hatanın karesinin integrali
ZLG	: Zwe-Lee Gaing
AVR	: Automatic Voltage Regulator
PID	: Proportional Integral Derivative
FOPID	: Fractional Order- Proportional Integral Derivative

GPID	: Adaptif Gauss fonksiyonu tabanlı PID
GFOPID	: Adaptif Gauss fonksiyonu tabanlı FOPID
JS	: Denizanası Optimizasyon Algoritması
DO	: Karahindiba Optimizasyon Algoritması
SCA	: Sinüs Kosinüs Algoritması
MVO	: Çoklu Evren Optimizasyon Algoritması
EO	: Denge Optimizasyonu
PSO	: Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
ABC	: Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu
ZB	: Zaman Bölgesi Analizi
FB	: Frekans Bölgesi Analizi
G	: Gürbüzlük Analizi
BYG	: Bozucu Yük Girişi Analizi
RST	: Referans Sinyal Değişimi Analizi
DO	: Doğrusal Olmayan Analizi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Güç sistemlerinin (elektrik şebekelerinin) temel amacı, tüketicilere güvenilir ve kesintisiz bir şekilde elektrik enerjisi sağlamaktır. Bu bağlamda güç sisteminin kararlılığı, sistemin etkin ve sorunsuz çalışmasında kritik bir öneme sahiptir. Kararlılığın sağlanamaması, ani gerilim dalgalanmalarına, frekans sapmalarına ve reaktif güç dengesizliklerine yol açarak hem tüketici cihazlarında hasara yol açabilir hem de geniş çaplı elektrik kesintilerine neden olabilir (Çavdar vd., 2023). Bu tür olumsuz durumları önleyebilmek için güç sistemlerinde kararlılık, gerilim ve frekans kontrol mekanizmaları aracılığıyla sağlanmalıdır. Gerilim ve frekansın belirlenen sınırlar içinde tutulması, sistem güvenilirliğini artırmanın yanı sıra, enerji kalitesinin korunması açısından da büyük bir gerekliliktir. Gerilim kararlılığının sağlanmasında şönt ve seri kapasitörler, şönt reaktörler, senkron kondansatörler, statik var kompanzatörler ve kademe değiştirici transformatörleri gibi ekipmanların kullanılmasının yanı sıra, Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR) sistemleri de gerilim kararlılığına katkı sağlar. Diğer yandan frekans kararlılığı ise senkron generatörlerin birincil, ikincil ve üçüncül frekans kontrol mekanizmalarıyla sağlanır. Bu çalışmada, güç sisteminin gerilim kararlılığı üzerinde önemli rol oynayan senkron generatörlerin otomatik gerilim regülatörü (AVR) sistemi ele alınmıştır.

Elektrik talebinin sürekli artması, güç sistemlerini gerilim dengesizliği sınırına yakın bir noktada çalışmaya zorlamaktadır (Çavdar vd., 2023). Bu durum güç sistemlerinde en önemli sorunlardan biri olan gerilim güvenliğini ön plana çıkarmaktadır. Gerilim kararlılığı, sistemde bir arıza veya bozulma meydana geldiğinde, tüm baralarda gerilimin kabul edilebilir sınırlar içinde tutulabilme kapasitesini ifade eder (Kundur vd., 2004). Bu sebeple, kararlılığı sağlamak ve senkron generatörlerin terminal gerilimlerini belirli sınırlar içinde tutulabilmesi diğer bir ifadeyle referans değerine getirilebilmesi için AVR sistemi kullanılmaktadır. Senkron generatörün terminal gerilimi ölçüldüğünde istenilen değerde olmaması durumunda AVR sistemi devreye girerek uyarım akımını ayarlar ve terminal geriliminin referans değere ulaşmasını sağlar. Bu sayede, şebeke geriliminin istenilen aralıkta kalmasına katkıda bulunarak elektrikli cihazların düzgün ve güvenli bir şekilde

çalışmasını sağlar. Bunun yanı sıra, AVR sistemi enerji kayıplarını minimize ederek güç sisteminin genel verimliliğini artırmada önemli bir rol oynar (Sahin vd., 2024).

Güç sistemlerinde yük değişiklikleri ve generatör alan sargılarının yüksek endüktans özellikleri, AVR' nin hızlı ve kararlı bir şekilde tepki vermesini zorlaştırmaktadır (Bingul & Karahan, 2018). Bu nedenle, AVR sisteminin bozucu etkilere karşı istikrarlı bir şekilde çalışabilmesi ve dinamik performansını artırabilmesi için uygun bir denetleyiciye ihtiyaç duyulmaktadır. AVR sistemlerinde geçici yanıtı, gürbüzlüğü ve kararlılığı iyileştirmek için literatürde kullanılan farklı yapılardaki denetleyici türlerinden bazıları; Oransal-integral-türevsel (PID) denetleyici (Ekinci vd., 2022; Kose, 2020), ikinci dereceden türev operatörlü PID (PIDD²) denetleyici (Izci, Ekinci, & Mirjalili, 2023; Izci, Ekinci, Mirjalili, vd., 2023), kesir dereceli PID (FOPID) denetleyici (Ayas & Sahin, 2021; Bakir vd., 2022), bulanık mantık tabanlı PID (FPID) denetleyici (Al Gizi, 2019), 2 serbestlik dereceli PI (2DOF-PI) denetleyici (Rajinikanth & Satapathy, 2015), sigmoid tabanlı PID (SPID) denetleyici (Suid & Ahmad, 2022), PID hızlandırılmalı (PIDA) denetleyici (Mosaad vd., 2019), çift türevli kesirli sıralı PID (FOPIDD) denetleyici (Tabak, 2021b) vb. örnek olarak verilebilir.

AVR sisteminde kullanılan denetleyici yapıları, elektrik şebekesinde ortaya çıkan bozucu etkileri etkin bir biçimde bastıracak şekilde tasarlanmalıdır. Bununla birlikte denetleyiciler, sistemin geçici ve kararlı durum tepkilerini geniş kararlılık marjıyla ve yüksek bir dayanıklılıkla sağlayabilmelidir (Çavdar vd., 2023). Denetleyici seçimi kadar, denetleyici parametrelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi de büyük bir öneme sahiptir. Parametre değerleri manuel yöntemlerle veya meta sezgisel arama algoritmaları kullanılarak elde edilebilir. Manuel ayarlama yöntemleri arasında Zeigler-Nichols ve Cohen-Coon yaklaşımları yer alır (Ekinci & Hekimoğlu, 2019). Ancak bu yöntemlerin uygulanmasında; parametrelerin zor tespit edilmesi, sistem yanıtında salınımlar ve aşma gibi istenmeyen durumların ortaya çıkması dezavantajlarıyla karşılaşılmaktadır (Bingul & Karahan, 2018; Çavdar vd., 2023; Ghosh vd., 2021). Bu nedenlerden dolayı, manuel ayarlama yöntemleri artık literatürde pek tercih edilmemektedir bunun yerine tercih edilen yöntem meta sezgisel arama algoritmalarıdır (Hashim vd., 2021). Bu algoritmalar, uygulama kolaylığı ve optimum çözüme hızlı bir şekilde ulaşabilme avantajları sunar. Denetleyici parametrelerinin optimum değerlerini bularak AVR sisteminin performansını artıran meta sezgisel optimizasyon algoritmalarından bazıları; parçacık sürüsü optimizasyonu (particle swarm optimization, PSO) (Sahib, 2015), genetik algoritma (genetic algorithm, GA) (Ramezani vd., 2013), diferansiyel evrim (differential evolution, DE) (Gozde & Taplamacioglu, 2011), gri kurt

optimizasyonu (grey wolf optimizer, GWO) (Zhou vd., 2020), yapay arı kolonisi (artificial bees colony algorithm, ABC) (Gozde & Taplamacioglu, 2011), jaya optimizasyon algoritması (jaya optimization algorithm, JOA) (Bhookya & Jatoth, 2020), sinüs kosinüs algoritması (sine cosine algorithm, SCA) (Ayas & Sahin, 2021), denge optimizasyonu (equilibrium optimizer, EO) (Tabak, 2021a), öğretme öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması (teaching–learning based optimization, TLBO) (Eltag & Zhang, 2021), gradyan tabanlı optimizasyon algoritması (gradient-based optimization algorithm, GBO) (Altbawi vd., 2024), geliştirilmiş böbrek esinli algoritma (improved kidney-inspired algorithm, IKA) (Ekinci & Hekimoglu, 2019), hibrit benzetimli tavlama-manta vatozu optimizasyon algoritması (hybrid simulated annealing-manta ray optimization algorithm, SA-MRFO) (Micev vd., 2021), salp sürüsü optimizasyon algoritması (salp swarm optimization algorithm, SSA) (Khan vd., 2019), kaotik kara dul optimizasyon algoritması (chaotic black widow optimization algorithm, ChBWO) (Munagala & Jatoth, 2022) vb. örnek olarak verilebilir.

Optimum denetleyici parametrelerinin meta sezgisel arama algoritmalarıyla bulunması için amaç fonksiyonuna ihtiyaç duyulur. Amaç fonksiyonları sistemin performansını önemli ölçüde etkilediğinden kullanılacak sistemin avantaj ve dezavantajlarına göre seçilir. Ayrıca amaç fonksiyonları optimizasyon probleminin minimize ya da maksimize edilmesine göre seçilir (Hussain vd., 2019). AVR sisteminde ise genellikle kullanılan amaç fonksiyonlarının minimize edilmesi hedeflenir. AVR için literatürde sıklıkla kullanılan amaç fonksiyonları; zamanla çarpılan mutlak hatanın integrali (integral time-weighted absolute error, ITAE), mutlak hatanın integrali (integral absolute error, IAE), zamanla çarpılan hatanın karesinin integrali (integral time-weighted squared error, ITSE) ve hatanın karesinin integrali (integral squared error, ISE) fonksiyonlarıdır (Bhookya & Jatoth, 2020; Bhullar vd., 2020; Ekinci & Hekimoglu, 2019; Gozde & Taplamacioglu, 2011; Kose, 2020; Paliwal vd., 2021; Panda vd., 2012; Ramezani vd., 2013).

Meta sezgisel algoritmalar yardımıyla denetleyici tasarımı sürecinde elde edilen AVR sisteminin performansının iyileştirilmesinde hâlâ bazı sorunlar mevcuttur. İlk olarak algoritmalarda keşif ve sömürü aşamaları arasındaki dengenin sağlanamaması, yerel optimumda sıkışma ve erken yakınsama gibi sorunlar performansı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum çeşitli test ve mühendislik problemlerinde gösterdiği performansa göre uygun bir optimizasyon algoritmasının seçilmesi ile etkili bir şekilde çözülebilir. Bir diğer sorun optimizasyon sonucunda elde edilen sabit katsayı değerlerine sahip geleneksel

denetleyicilerin parametrelerinin dinamik koşullara uyum sağlayamamasıdır. Bu sorun ise adaptif denetleyici tasarımlarıyla giderilebilir. Kontrol sistemlerinde adaptif denetleyici tasarımlarına örnek olarak; tamsayı dereceli model referans adaptif denetleyici (integer order model reference adaptive controllers, IOMRAC) (Aguila-Camacho & Duarte-Mermoud, 2013), kesir dereceli model referanslı adaptif denetleyici (fractional order model reference adaptive control, FOMRAC) (Ortiz-Quisbert vd., 2018), uyarlanabilir doğrusal olmayan PID denetleyici (Dos Santos vd., 2012), Gauss kazanç fonksiyonlu uyarlamalı doğrusal olmayan PID (ANLPID-GGF) (Pedroso vd., 2013), bulanık adaptif filtreli PID (fuzzy adaptive PIDF, FAPIDF) (Eltag & Zhang, 2021), Sigmoid PID (Suid & Ahmad, 2022), Sigmoid FOPID (Sahin vd., 2024) vb. verilebilir.

1.2. Literatür Taraması

AVR sistemlerinin performansını iyileştirme çabaları, ilk çalışmalardan günümüze kadar sürekli olarak devam etmiştir. Literatürde farklı tasarımlarda denetleyiciler, farklı optimizasyon yöntemleri ve farklı amaç fonksiyonları ile yapılan birçok AVR çalışması bulunmaktadır. Çalışmalardaki bu farklılıklar AVR sisteminin yanıt süresini, kararlılığını, gürbüzlüğü yani kısaca performansını etkilemektedir. Dolayısıyla AVR sisteminin performansını artırmaya yönelik sunulan farklı yaklaşımlar, literatürde çeşitlilik ve rekabetçi bir ortam oluşturmuştur. AVR sistemi için yapılan çalışmaları bu farklılıklar temelinde sınıflandıracak olursak, denetleyici tasarımlarıyla AVR sistemlerinin yanıtını iyileştirmeye odaklanarak literatüre katkı sağlayan bazı çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

Can ve arkadaşları tarafından 2023 yılında yapılan çalışmada AVR sisteminin performansını artırmak için FOPIDD adlı yeni bir denetleyici tasarımı önerilmiştir. Denetleyici parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmek için sürüngen arama algoritması (reptile search algorithm, RSA) kullanılmıştır (Can vd., 2023). Dogruer ve Can tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada, AVR sisteminin yanıtını iyileştirmek ve sağlamlığını arttırmak için FPID denetleyicisi tasarımı önerilmiştir. Denetleyici parametrelerini belirlemek için yeni bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Önerilen denetleyicinin performansı farklı parametre değerlerine sahip iki ayrı AVR sistemi üzerinde test edilmiştir (Dogruer & Can, 2022). 2021 yılında Tabak, AVR sistemi için çoklu evren optimizasyon algoritmasını (multi-verse optimizer, MVO) kullanarak tasarladığı FOPIDD denetleyicisinin ilk uygulamasını gerçekleştirmiştir (Tabak, 2021b) .

Ayas ve Sahin, 2021 yılında gerçekleştirdikleri bir çalışmada AVR sistemi için yeni bir tasarım olan kesirli filtreli kesirli mertebeden PID (FOPIDFN) denetleyicisini önermiştir. Denetleyicilerin parametre değerleri SCA yöntemiyle tasarlanmıştır (Ayas & Sahin, 2021). Tabak 2021 yılında yaptığı çalışmada AVR sistemi için EO algoritması metodunu kullanarak FOPIDD denetleyicisi tasarımını önermiştir (Tabak, 2021a). Eltag ve Zhang tarafından yapılan bir çalışmada AVR sisteminin daha hızlı tepki vermesini sağlamak için bulanık mantık tabanlı düşük geçiş filtreli PID (FPIDN) denetleyici tasarımı önerilmiştir. Önerilen FPIDN denetleyicisinin performansı PIDN, FPID ve PID denetleyicileri ile karşılaştırılmıştır (Eltag & Zhang, 2021). Paliwall ve arkadaşlarının 2021 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada AVR sistemi için yeni bir kesirli dereceli PID artı türevli ve filtre katsayılı (FOPIDDN) denetleyici tasarlanmıştır. Önerilen denetleyici ilk kez EO algoritması ile optimize edilmiştir. Denetleyicinin üstün performansı literatürdeki PID, PIDA, FOPID denetleyicileri ile karşılaştırılarak kanıtlanmıştır (Paliwal vd., 2021). X. Li ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada AVR sistemi için Bode'nin ideal referans modeline dayalı yeni bir FOPID denetleyici tasarımı önerilmiştir. Önerilen FOPID denetleyicisinin parametreleri, Bode'nin ideal referans modelinin çıktısıyla AVR sisteminin çıktısı arasında bulunan IAE amaç fonksiyonunun en aza indirilmesiyle elde edilmiştir. Optimizasyon sürecinde PSO algoritması kullanılmıştır. Hem denetleyicinin hem de algoritmanın üstünlüğü literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak gösterilmiştir (X. Li vd., 2017).

AVR sisteminin yanıtını iyileştirmek için kullanılan bir diğer yaklaşım ise, denetleyici parametrelerini optimize eden algoritmaların performansını artırmaya yönelik yeni optimizasyon yöntemleri geliştirmektir. Bu alanda yapılan çalışmalar, optimizasyon algoritmalarını geliştirerek literatüre önemli katkılar sağlamaktadır. Bu doğrultuda literatüre katkı sağlayan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir:

Bakır ve arkadaşları 2022 yılında AVR sisteminin performansını artırmak için L'evy Uçuş Dağılımı (LFD) algoritmasının uygunluk-mesafe dengesi (fitness distance balance, FDB) seçim yöntemiyle geliştirilmiş versiyonunu önermiştir (Bakır vd., 2022). Mok ve Ahmad tarafından yapılan bir çalışmada yumuşatılmış fonksiyon algoritmasının (smoothed function algorithm, SFA) yakınsama sorununu çözmek için ezberlenebilir yumuşatılmış fonksiyon algoritması (memorizable smoothed function algorithm, MSFA) yöntemiyle AVR sistemi için FOPID denetleyicisi tasarımı önerilmiştir (Mok & Ahmad, 2022). Bhullar ve arkadaşları, AVR sistemi için FOPI, FOPD ve FOPID denetleyicilerinin tasarımında karga arama algoritmasının (crow search algorithm, CSA) geliştirilmiş versiyonunun kullanımını

önermiştir. Algoritmanın yakınsama oranını iyileştirmek için mesafe tabanlı uçuş uzunluğu (Distance-based Flight Length, DFL) yaklaşımı ile algoritmanın verimliliğini iyileştirmek için Levy uçuş tabanlı bir yaklaşımı içeren mesafe ve Levy uçuş tabanlı bir karga arama algoritmasını (distance and levy flight based CSA, DLCSA) geliştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak bulanık mantık tabanlı uyarlanabilir bir amaç fonksiyonu önerilmiştir (Bhullar vd., 2022). Munagala ve Jatoth tarafından gerçekleştirilen çalışmada FOPID denetleyicisi tasarımı için ChBWO optimizasyon algoritması önerilmiştir. Ayrıca yeni bir amaç fonksiyonu tanımlamışlardır (Munagala & Jatoth, 2022). 2021 yılında yapılan çalışmada Micev ve arkadaşları AVR sisteminde PID, PIDD ve FOPID denetleyicilerinin tasarımı için yeni bir hibrit optimizasyon algoritması olan SA-MRFO algoritmasını önermiştir. Ek olarak yeni amaç fonksiyonu önerilmiştir (Micev vd., 2021). Micev ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada AVR sistemi için kaotik lojistik haritalarla iyileştirilen sarı eyer keçi balığı algoritması (C-YSGA) yöntemiyle tasarlanan FOPID denetleyicisi önerilmiştir. Ek olarak yeni bir amaç fonksiyonu önerilmiştir (Micev vd., 2020). Sumpunsri ve Puangdownreong tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada çok amaçlı Levy uçuşlu ateşböceği algoritması (multiobjective Levy flight firefly algorithm, mLFFA) geliştirilmiştir. Önerilen algoritma ile PIDD denetleyicisi tasarımı sunulmuştur (Sumpunsri & Puangdownreong, 2020).

AVR sisteminin yanıtını iyileştirmek için kullanılan bir diğer yöntem, geleneksel PID ve FOPID denetleyicilerinin performansını artırmaya yönelik tasarım girişimleridir. Bu girişimler denetleyici tasarımı sırasında farklı optimizasyon algoritmalarının kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Literatürde FOPID denetleyicisi optimizasyonu için çeşitli algoritmalar kullanılarak yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda açıklanmıştır:

Öztürk ve Çavdar tarafından 2024 yılında yapılan çalışmada AVR sistemi için PID, FOPID ve FOPIDD denetleyici tasarımlarını farklı algoritmalar ve farklı amaç fonksiyonları ile gerçekleştirmiştir. AVR sisteminde denetleyici tasarımında ilk defa zebra optimizasyon algoritması (zebra optimization algorithm, ZOA) kullanılmıştır. Karahindiba optimizasyon algoritması (dandelion algorithm, DO) ve çiçek tozlaşma optimizasyon algoritması (flower pollination optimization algorithm, FPA) ile tasarlanan denetleyicilerin performansları, önerilen ZOA algoritmasıyla tasarlanan denetleyicilerin performansı ile karşılaştırılmıştır (Öztürk & Çavdar, 2024). Jegatheesh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada AVR sistemi için martı optimizasyon (seagull optimization algorithm, SOA) algoritması ile optimize edilen FOPID denetleyicisinin tasarımı gerçekleştirilmiştir (Jegatheesh vd., 2024).

Altbawi ve arkadaşları AVR sisteminin optimum tasarımı için kendi kendini düzenleyen çevrimdışı bir ayar yöntemi olan GBO algoritmasını kullanarak FOPID denetleyicisinin optimizasyonunu gerçekleştirmiştir (Altbawi vd., 2024). Moschos ve Parisses gerçekleştirdikleri çalışmada AVR sistemi için yeni bir denetleyici tasarımı olan FOPIDD denetleyicisini önermiştir. Denetleyici tasarımı için AVR'de ilk defa çakal optimizasyon algoritması (coyote optimization algorithm, COA) kullanılmıştır (Moschos & Parisses, 2022). Jumanı ve arkadaşları 2020 yılında AVR sistemi için FOPID denetleyicisinin tasarımını JOA yöntemiyle gerçekleştirmiştir (Jumanı vd., 2020). Bhookya ve Jatoth 2020 yılında yaptıkları çalışmada yeni bir yöntem olan geliştirilmiş Jaya algoritmasını (improved jaya optimization algorithm, IJOA) AVR sistemi için önermiştir. PID ve FOPID denetleyicilerinin tasarımları bu algoritmayla gerçekleştirilmiştir (Bhookya & Jatoth, 2020). Khan ve arkadaşları 2019 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada AVR sisteminde FOPID denetleyicisinin optimizasyonu için SSA algoritmasını kullanmıştır (Khan vd., 2019). Bhookya ve Jatoth AVR sistemi için SCA algoritmasını kullanarak PID ve FOPID denetleyici tasarımlarını gerçekleştirmiştir (Bhookya & Jatoth, 2019). Zeng ve arkadaşları 2015 yılında AVR sistemi için geliştirilmiş olan çok amaçlı ekstrem optimizasyon (multiobjective extremal optimization, MOEO) algoritmasına dayanan FOPID denetleyici tasarımını gerçekleştirmiştir (Zeng vd., 2015).

Literatürde AVR çalışmalarında sınırlı sayıda adaptif denetleyici tasarımı ele alınmıştır. Adaptif denetleyici kullanarak AVR sistemi yanıtını iyileştirmeye çalışanlar;

Şahin ve arkadaşları AVR sistemi için sigmoid tabanlı adaptif kesir dereceli PID denetleyici (SFOPID) tasarımını önermiştir. Denetleyici tasarımı karahindiba optimizasyon (dandelion optimizer, DO) algoritması ile gerçekleştirilmiştir (Şahin vd., 2024). 2022 yılında Suid ve Ahmad tarafından yapılan çalışmada SPID denetleyici tasarımı önerilmiştir. Denetleyici tasarımı doğrusal olmayan sinüs kosinüs algoritması (NSCA) ile gerçekleştirilmiştir (Suid & Ahmad, 2022).

Tablo 1. Son zamanlarda yapılmış olan AVR çalışmaları

Ref.no	Denetleyici Tipi	Algoritma	Amaç Fonksiyonu	Yapılan Analizler
(Sahin vd., 2024)	SFOPID	DO	IAE, ISE, ITAE, ITSE, ZLG	ZB, FB, G, BYG, DO, DD
(Öztürk & Çavdar, 2024)	PID, FOPID, FOPIDD	ZOA, DO, FPA	ITAE, ZLG	ZB
(Jegatheesh vd., 2024)	FOPID	SOA	F1*	ZB, FB, G, BYG
(Altbawi vd., 2024)	FOPID	GBO	ITAE	ZB, FB, G, BYG
(Can vd., 2023)	PID, FOPID, FOPIDD	RSA	ZLG	ZB, G
(Suid & Ahmad, 2022)	SPID	NSCA	F2*	ZB, FB, G, BYG
(Bakir vd., 2022)	PID, PIDN, FOPID, PIDD	LFD	F3*, F4*	ZB, G
(Mok & Ahmad, 2022)	FOPID	SFA, MSFA	IAE, ISE, ITAE, ITSE	ZB, FB, G, BYG
(Moschos & Parisses, 2022)	FOPID, FOPIDD	COA	F5*	ZB, FB, G, BYG
(Munagala & Jatoth, 2022)	FOPID	ChBWO	ZLG+ITAE	ZB, FB, G, BYG
(Dogruer & Can, 2022)	FPID	GA	F6*	ZB, G
(Bhullar vd., 2022)	FOPID	DLCSA, CSA	F7*	ZB, G, BYG
(Eltag & Zhang, 2021)	PID, PIDN, FPID, FPIDN	TLBO	ZLG	ZB, G
(Paliwal vd., 2021)	FOPIDN	EO	ITAE	ZB, FB, G, BYG, DO
(Micev vd., 2021)	PID, PIDD, FOPID	SA-MRFO	F8*	ZB, FB, G, BYG
(Tabak, 2021b)	PID, PIDD, FOPID, FOPIDD	MVO	ZLG	ZB, FB, G
(Tabak, 2021a)	PID, FOPID, PIDD, FOPIDD	EO	ZLG	ZB, FB, G
(Ayas & Sahin, 2021)	PID, FOPID, PIDN, FOPIDN, FOPIDFN	SCA	ZLG	ZB, FB, G, BYG
(Sumpunsri & Puangdownreong, 2020)	PIDD	mLFFA	t_r, M_p	ZB
(Micev vd., 2020)	FOPID	C-YSGA	F9*	ZB, FB, G, BYG
(Jumani vd., 2020)	FOPID	JOA	ITAE	ZB, FB, G
(Bhookya & Jatoth, 2020)	PID, FOPID	JOA, IJOA	IAE, ISE, ITSE, ZLG	ZB, G
(Khan vd., 2019)	FOPID	SSA, PSO, ABC, GOA	ITAE	ZB, FB, G
(Bhookya & Jatoth, 2019)	PID, FOPID	SCA	ZLG	ZB, FB, G
(X. Li vd., 2017)	FOPID	PSO, RGA, CRPSO, DE	IAE	ZB
(Zeng vd., 2015)	PID, FOPID	MOEO	IAE, $1000 E_{ss} , t_r$	ZB, G
Önerilen	GPID, GFOPID	JS	ZLG, ITAE	ZB, G, BYG, RSD, DO

ZB: Zaman Bölgesi Analizi, FB: Frekans Bölgesi Analizi, G: Gürbüzlük Analizi, BYG: Bozucu Yük Girişi Analizi, RSD: Referans Sinyal Değişimi Analizi, DO: Doğrusal Olmayan Etki Analizi, DD: Deneysel Düzenek Analizi

Tablo 1’de yukarıda verilen literatür ve son yıllarda yapılmış AVR çalışmaları özet halinde gösterilmiştir. Tablo 1’de F1’den F11’e kadar numaralandırılmış olan amaç fonksiyonlarının denklemleri Ek 1’de verilmiştir.

1.3. Tezin Motivasyonu, Amacı, Konusu ve Özgünlüğü

Literatür incelendiğinde, AVR sisteminin performansını artırmak amacıyla çeşitli çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda, genellikle kesir dereceli denetleyici türevlerinin oluşturulduğu veya farklı algoritmalar kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilmeye çalışıldığı gözlemlenmektedir. AVR sisteminde adaptif denetleyiciler üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olması, pek fazla ele alınmaması bu tip denetleyicilerin başarılı sonuçlar sağlayabileceği fikrini desteklemekte ve bu tez çalışmasının temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu motivasyon doğrultusunda, çalışmada hem kesir dereceli denetleyici avantajından hem de adaptif denetleyici avantajından yararlanılarak literatürde daha önce ele alınmamış bir denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu denetleyici, AVR sisteminde uygulanarak sistem performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Geleneksel PID denetleyicisine kıyasla FOPID denetleyicisinin, AVR sistemlerinde daha üstün performans gösterdiği birçok çalışmada kanıtlanmıştır (Ayas & Sahin, 2021; Bhookya & Jatoth, 2019; Izci vd., 2021). Bu tez çalışması da bu görüşü desteklemektedir. Çalışmada kesir dereceli gauss fonksiyonu tabanlı PID (GFOPID) denetleyici tasarlanmış ve GPID denetleyicisinden daha iyi sonuç verdiği ortaya koyulmuştur. Ayrıca GPID ve GFOPID denetleyicileri literatürdeki PID ve FOPID çalışmalarıyla da kıyaslanmıştır. Son olarak adaptif denetleyicilerden SPID ve SFOPID ile bu çalışmada tasarlanan denetleyiciler kıyaslanmıştır.

Bu tez çalışmasının amacı, tasarlanan adaptif GPID ve adaptif GFOPID denetleyicilerinin parametreleri için en iyi değerleri bulmak üzere denizanası optimizasyon algoritmasını (JS) kullanarak AVR sistemini daha kararlı ve güvenilir hale getirmektir. Bu çalışmada AVR sistemi için GPID ve GFOPID denetleyicileri tasarlanmıştır. Bu tasarımlar JS algoritması kullanılarak ITAE ve ZLG amaç fonksiyonları için optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen denetleyici parametreleri kullanılarak zaman bölgesi analizi, gürbüzlük analizi, referans sinyal değişimi analizi, bozucu yük girişi analizi ve doğrusal olmayan etki analizi yapılmıştır. Ayrıca çalışmada elde edilen analizlerin sonuçları

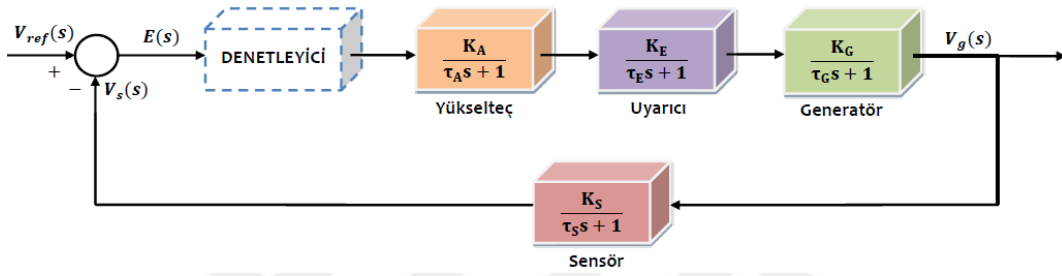
literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda literatüre yapılan katkılar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Literatürde ilk defa adaptif Gauss FOPID denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir.
- Literatürde ilk defa adaptif Gauss PID ve Gauss FOPID denetleyicileri AVR sisteminde ele alınmıştır.
- AVR sistemi için tasarlanan adaptif GPID ve GFOPID denetleyicilerin parametreleri ITAE ve ZLG amaç fonksiyonları ile belirlenmiştir.
- AVR sistemi için tasarlanan adaptif GPID ve GFOPID denetleyicileri JS algoritması ile optimize edilmiştir.
- Farklı amaç fonksiyonları ile parametreleri optimize edilen adaptif GPID ve GFOPID denetleyicilerin performansları; zaman bölgesi analizi, gürbüzlük analizi, referans sinyal değişimi analizi, bozucu yük girişi analizi, doğrusal olmayan etki analizi olmak üzere çeşitli yöntemler ile kapsamlı bir şekilde ele alınmış ve üstün performansı gösterilmiştir.
- Tasarlanan adaptif denetleyicilerin AVR sistemi performansı literatürde yapılmış çalışmalarla kıyaslanarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. AVR Sistem Modeli Tanıtımı

AVR sistemi, senkron generatörün terminal gerilimini nominal sınırlar içinde tutmaya yarayan bir kontrol sistemidir. Şekil 1'deki blok diyagramında denetleyici ve temel bileşenlerden oluşan bir AVR sistemi görülmektedir.



Şekil 1. AVR blok diyagramı gösterimi

Bu blok diyagramında sistemin yükselteç, uyarıcı, generatör, sensör ve denetleyici olmak üzere beş ana bileşeni bulunmaktadır. Blok diyagramında senkron generatör çıkışı terminal gerilimini temsil etmektedir. AVR sisteminin çalışma prensibi şu adımlarla gerçekleşir; Sensör, generatörün terminal gerilimini sürekli olarak ölçer ve bu ölçüm referans gerilim değeriyle karşılaştırılır. Bu iki değer arasındaki fark hata sinyali olarak adlandırılır. Bu sinyal denetleyici tarafından değerlendirilir. Ardından, yükselteç devreye girerek bu kontrol sinyalini güçlendirir. Güçlendirilmiş kontrol sinyali, uyarıcı aracılığıyla generatörün alan sargısının kontrol edilmesinde kullanılır (Çavdar vd., 2023; Sikander vd., 2018). Blok diyagramında kullanılan bileşenlerin transfer fonksiyonları aşağıda verilmektedir.

Yükselteç bileşeninin transfer fonksiyonu;

$$G_{Yükselteç} = \frac{K_A}{\tau_A s + 1} \quad (1)$$

Uyarıcı bileşeninin transfer fonksiyonu;

$$G_{uyarıcı} = \frac{K_E}{\tau_E s + 1} \quad (2)$$

Generatör bileşeninin transfer fonksiyonu;

$$G_{generatör} = \frac{K_G}{\tau_G s + 1} \quad (3)$$

Sensör bileşeninin transfer fonksiyonu;

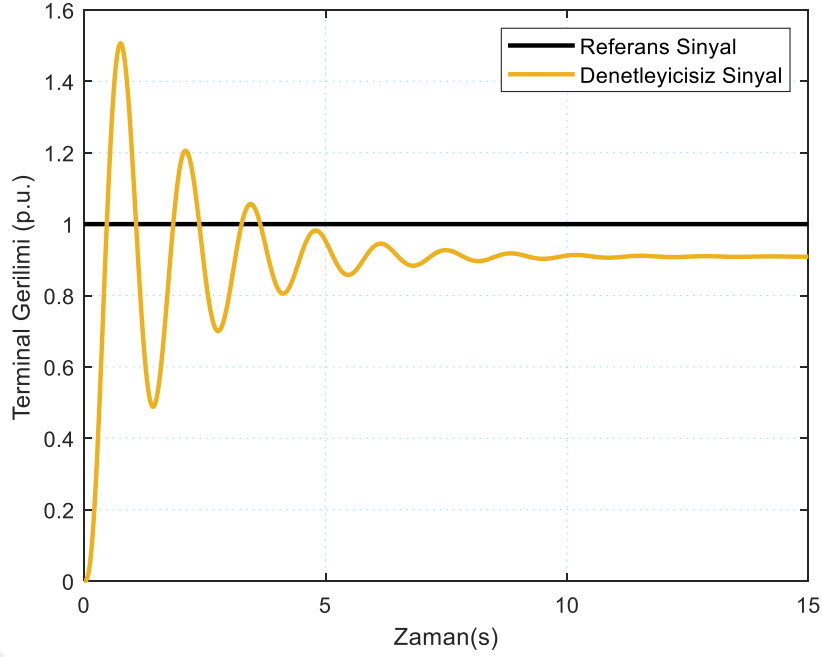
$$G_{sensör} = \frac{K_S}{\tau_S s + 1} \quad (4)$$

AVR sistem bileşenleri birinci dereceden transfer fonksiyonlarıdır (Micev vd., 2020). Transfer fonksiyonları kazanç ve zaman sabitlerinden oluşmaktadır. Şekil 1'deki bileşenlerin kazanç parametreleri sırasıyla; K_A, K_E, K_G, K_S 'dir. Zaman sabitleri; $\tau_A, \tau_E, \tau_G, \tau_S$ 'dir. Literatürde bu değerlerin alt ve üst sınırları Tablo 2'de verildiği gibi sunulmaktadır (Bhullar vd., 2020; Çavdar vd., 2023; Micev vd., 2020; Zeng vd., 2015).

Tablo 2. AVR sisteminin kazanç ve zaman sabitleri

AVR Bileşenleri	Kazanç Sınırları	Zaman Sabiti Sınırları	Kullanılan Değerler
Yükselteç	$10 \leq K_A \leq 40$	$0.02 \leq \tau_A \leq 0.1$	$K_A=10, \tau_A=0.1$
Uyarıcı	$1 \leq K_E \leq 10$	$0.4 \leq \tau_E \leq 1$	$K_E = 1, \tau_E=0.4$
Generatör	$0.7 \leq K_G \leq 1$	$1 \leq \tau_G \leq 2$	$K_G = 1, \tau_G = 1$
Sensör	$0.9 \leq K_S \leq 1.1$	$0.001 \leq \tau_S \leq 0.06$	$K_S = 1, \tau_S=0.01$

Şekil 2'de bir denetleyici olmadan AVR sisteminin geçici yanıtı gösterilmektedir.



Şekil 2. Denetleyici olmadan AVR sisteminin geçici yanıtı

Denetleyici kullanılmadan AVR sisteminin performansı test edildiğinde oturma zamanının (t_s %2) 6.9865s, yükselme zamanının (t_r) 0.2607s, tepe zamanının (t_p) 0.7526s, kalıcı hatanın (E_{ss}) 0.0909 p.u. ve maksimum aşmanın (M_p) %65.7226 olduğu tespit edilmektedir. Bu haliyle AVR sisteminin geçici yanıt parametrelerinin değerleri uzun oturma zamanı, yüksek aşım değeri ve kalıcı hataya sahiptir. Bu sebeple AVR sisteminin geçici yanıtını iyileştirmek için denetleyici kullanımı zorunludur.

2.2. Önerilen Gauss FOPID Denetleyicisi Tasarımı

AVR sistemi, bir denetleyici olmadan çalıştırıldığında verimsiz bir performans sergilemektedir. Bu durum sistemin geçici yanıt parametre değerlerinde istenmeyen sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Sistem performansını ve kararlılığını artırmak için bir denetleyici ile kapalı çevrim denetimli bir kontrol sistemi kullanılması gereklidir. Bu amaçla en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, klasik veya tamsayı dereceli bir kontrol stratejisi olan PID denetleyicisidir. Bu denetleyicinin yaygın kullanım sebebi basit yapılı ve kolay ayarlanabilir olmasıdır. PID denetleyici üç temel bileşenden oluşur. Bunlar; oransal(P), integral(I) ve türev(D) olmak üzere üç ayrı operatördür. PID denetleyicinin matematiksel modeli ise aşağıdaki transfer fonksiyonu ile ifade edilir:

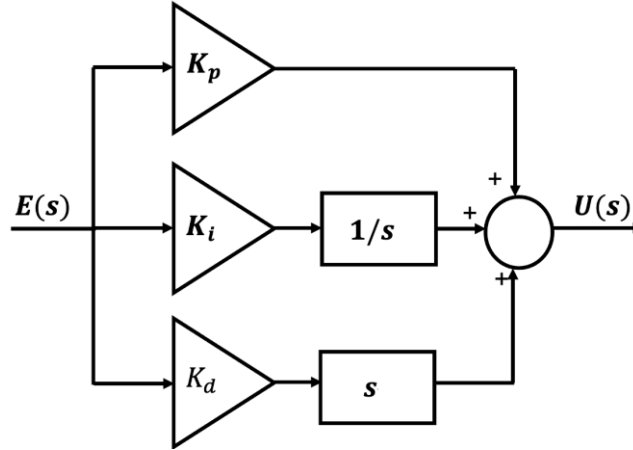
$$C_{PID} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5)$$

Bu denklemde K_p oransal kazanç sabitini, K_i integral kazanç sabitini, K_d ise türevsel kazanç sabitini temsil etmektedir. K_p , K_i , K_d operatörlerinin sistem zaman yanıtı ve kararlılığındaki etkisi Tablo 3'te görülmektedir (Zafer Bingöl, 2005).

Tablo 3. Kapalı çevrim sisteminde kontrolörlerin etkileri

	Yükseliş zamanı	Aşım	Yerleşim zamanı	Sürekli rejim hatası
K_p	Azalır	Artar	Az değişir	Azalır
K_i	Azalır	Artar	Artar	Elenir
K_d	Az değişir	Azalır	Azalır	Az değişir

Matematiksel ifadesi Denklem 5'te verilen denetleyicinin blok diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. PID blok diyagramı gösterimi

PID denetleyicisinin tasarımı her ne kadar basit olsa da parametre değerlerindeki değişimler ile başa çıkmada iyi değildir (Monje vd., 2008). Bu durum sistemin takip etmesi gereken referans sinyalini istenilen doğrulukta takip edememesine yol açar. Başka bir ifadeyle, sistemin nominal değerinden sapma eğilimi göstermesine ve kararsızlık sorunu yaşamasına neden olur.

PID denetleyicisinin ayarlanabilir üç parametresi bulunması sınırlayıcı bir etken olmasıyla beraber sistemin sağlamlığını korumakta yetersizdir (Kumar vd., 2017). PID denetleyicisindeki bu sınırlamayı aşmanın bir yolu, denetleyiciye ek ayarlanabilir parametreler dahil etmektir (Vinagre vd., 2000).

PID denetleyicisi parametrelerine (K_p , K_i , K_d) ek olarak ayarlanabilir kesir dereceli (λ , μ) iki parametre ile tasarım genişletilir (L. Li vd., 2006). Bu denetleyici tasarımı beş parametresi bulunan FOPID denetleyicisidir. FOPID denetleyicisi PID denetleyicisine kıyasla daha üstün performansa ve daha esnek yapıya sahiptir (Tepljakov vd., 2018). Ayarlanabilir parametre sayısı arttıkça serbestlik derecesi arttığından esneklik de artar. Bu da daha iyi sistem kararlılığının ve gürbüzlüğünün elde edilmesini sağlar (Tepljakov vd., 2018). Bu nedenle FOPID denetleyicisi ile kontrol edilen sistemin daha iyi performans göstermesi ve hızlı şekilde kararlı hale gelme durumu mevcuttur (Paliwal vd., 2021).

FOPID denetleyicisinin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir;

$$C_{FOPID} = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^{\mu} \quad (6)$$

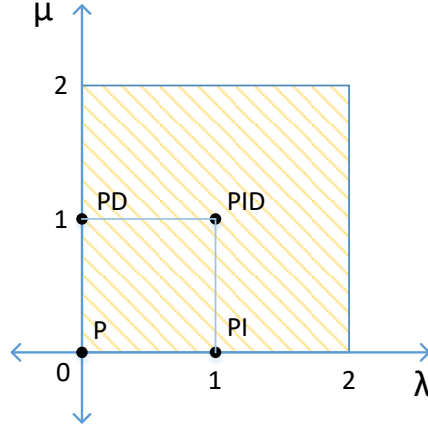
Bu denklemde λ integralin kesir derecesini, μ türevin kesir derecesini temsil etmektedir.

Tablo 4'te kesir dereceli parametrelerin aldıkları tamsayı değerlerine göre hangi denetleyici tipi gibi davrandıkları özetlenmiştir.

Tablo 4. Kesir dereceli parametre değerlerine göre oluşan denetleyici tipleri

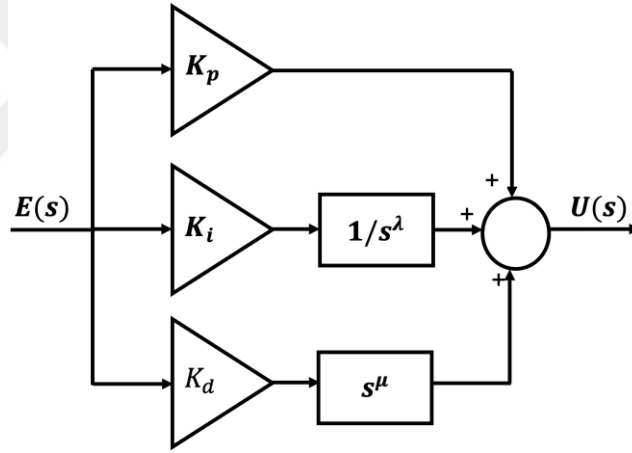
λ	μ	Denetleyici Tipi
1	1	PID
0	1	PD
1	0	PI
0	0	P

Kesir dereceli parametrelerin aldıkları tamsayı değerleri Tablo 4'te verilen dört farklı denetleyici tasarımını temsil eder. FOPID denetleyicisi ise kesir dereceli değerler alması sebebiyle koordinat düzlemini temsil eder (Kumar vd., 2017). Şekil 4'te yukarıda bahsedilen durumun özeti yer almaktadır. x eksen integralin kesir derecesini y eksen türevin kesir derecesini gösterir. PID ve FOPID arasındaki ilişkiyi açıklayan şekilde FOPID koordinat düzleminde taralı alanı temsil eder.



Şekil 4. Koordinat düzleminde denetleyici tipleri gösterimi

Matematiksel ifadesi Denklem 6'da verilen FOPID denetleyicinin blok diyagramı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. FOPID Denetleyicisi blok diyagramı gösterimi

FOPID denetleyicisinin kesirli hesabı için Grunwald-Letnikov, Riemann-Liouville ve M. Caputo literatürde sık kullanılan tanımlardır (Atherton vd., 2015; Shah & Agashe, 2016). FOPID denetleyicisi kesirli dereceli transfer fonksiyona sahip olması nedeniyle analitik çözümü yapılamadığından zaman alanı cevabı hesaplanamaz (Atherton vd., 2015). Bu sorunun üstesinden gelebilmek için yakınsama yöntemleri geliştirilmiştir.

Rasyonel yakınsama yöntemlerini değerlendirmek için kullanılan tekniklerden en popüler olanı Oustaloup yakınsama yöntemidir (Atherton vd., 2015; Ayas & Sahin, 2021). Aşağıda bant geçiren filtreye dayalı Oustaloup yakınsama yönteminin denklemi verilmiştir (Micev vd., 2020; Oustaloup vd., 2000; Tabak, 2021b).

$$s^\alpha \approx \omega_h^\alpha \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_z}{s + \omega_p}, \quad for\ 0 < \alpha < 1 \quad (7)$$

Burada N , sıfır kutup çiftlerinin sayısıdır ve değeri 5'tir. Analog filtre derecesini belirlemek için N kullanılır ($2N + 1$). ω_z sıfırları, ω_p kutupları temsil eder.

Bu çalışma için Oustaloup yakınsama yönteminin gelişmiş versiyonu kullanılmıştır. Bu yöntem geniş bir frekans aralığında yüksek doğruluğa sahip olmasından dolayı tercih edilmiştir (Xue vd., 2006). Gelişmiş Oustaloup yakınsama yöntemi aşağıda verilmiştir (Ghosh vd., 2021; Y. Li vd., 2006);

$$s^\alpha \approx \left(\frac{d}{b} \omega_h\right)^\alpha \frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1 - \alpha)s^2 + b\omega_h s + d\alpha} \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_z}{s + \omega_p}, \quad for\ 0 < \alpha < 1 \quad (8)$$

Burada; d sabiti 9, b sabiti 10 değerinde kabul edilir (Xue vd., 2009). Sıfırlar ve kutuplar aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\omega_p = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1+\alpha)}{2N+1}}, \quad \omega_z = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1-\alpha)}{2N+1}} \quad (9)$$

Burada; ω_h ve ω_b frekans bandı üst ve alt sınırlarıdır. Frekans bandı alt sınırı 10^{-4} rad/s , üst sınırı 10^4 rad/s olarak tanımlanmıştır.

PID ve FOPID denetleyicilerinin kazanç parametreleri sabit olduğundan, giriş hata değerindeki değişiklikler bu parametreleri etkilememektedir. Bu durum denetleyicinin kontrol doğruluğunu tam anlamıyla takip edememesine neden olmaktadır (Sahin vd., 2024). Bu eksikliği gidermek ve özellikle geleneksel PID denetleyicisinin performansını iyileştirmek için adaptif tekniklerin kullanılması önerilmektedir.

Kontrol sistemlerinde adaptif terimi, denetleyicinin davranışını dinamik olarak değiştirebilme kabiliyetini ifade eder. Bu yaklaşım sayesinde, sistemde daha düşük aşma değerleri ve daha kısa yerleşme süreleri elde edilebilir (Puchta vd., 2020). Literatürde bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmalarda farklı adaptif yaklaşımlar kullanılmıştır (Armstrong vd., 2001, 2002; Dos Santos & Dos Santos Kaster, 2015; Isayed & Hawwa, 2007; Jimenez-Urbe vd., 2015; Korkmaz vd., 2012; Lucas vd., 2015; Prasad vd., 2014; Xiao vd., 2010; Xu vd., 1995). Bu çalışmada ise PID ve FOPID denetleyicileri doğrusal olmayan uyarlanabilir bir davranış kazandırmak amacıyla Gauss fonksiyonuyla tasarlanmıştır. Bu durumda denetleyici kazanç parametreleri, hataya bağlı olarak Gauss fonksiyonlarıyla dinamik bir şekilde ayarlanır (Puchta vd., 2021). Gauss fonksiyonu, hata değişkenine bağlı olarak denetleyici parametrelerinin önceden belirlenmiş alt ve üst sınırlar arasında değişmesine olanak tanır. Bu yaklaşım hatadaki değişimlere göre denetleyici parametrelerinin dinamik olarak ayarlanmasını destekler ve daha etkin bir kontrol sinyali elde edilmesini sağlar. Gauss fonksiyonunun dinamik yapısı ile denetleyicilerin öğeleri birleştirilerek yeni bir denetleyici tasarımı sunulmuştur.

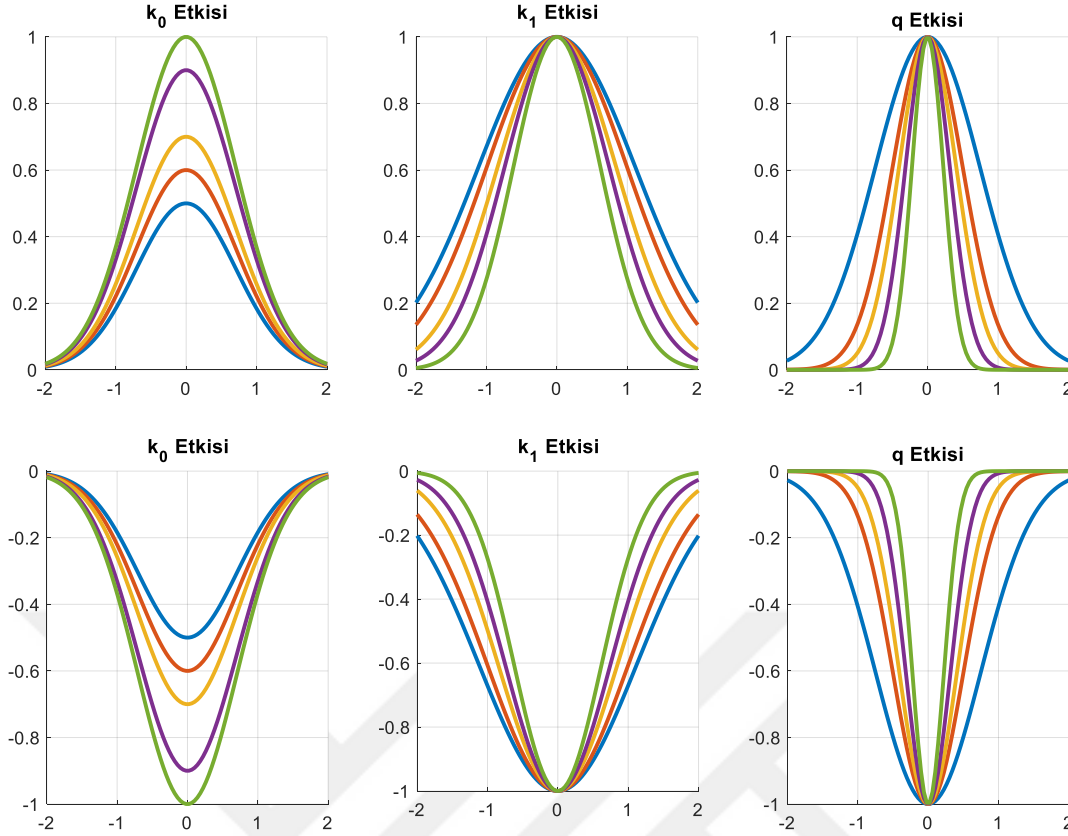
Gauss fonksiyonun denklemini;

$$k(t) = k_1 - (k_1 - k_0)e^{-q[\delta(t)]^2} \quad (10)$$

Burada δ denetleyiciye giren sinyali, k_0 sıfır giriş için sınırlayıcı değeri, k_1 sonsuz giriş için sınırlayıcı değeri ve q eğrinin içbükey açıklığını yani fonksiyonun ne kadar açık veya kapalı olması gerektiğini tanımlar. Parametre q , belirsiz bir anlama sahiptir bu nedenle uygun bir değer seçmek zor olabilir. Bu bağlamda q parametresi Denklem 11’de gösterildiği gibi bir referans giriş fonksiyonu kullanılarak ifade edilmektedir. Referans giriş δ_r , sistemin başlangıçtaki geçici rejiminin genliği olarak tanımlanır. Bu referans giriş, fonksiyonun k_0 ile k_1 değer aralığının λ yüzdesine ulaştığı bir noktayı temsil eder.

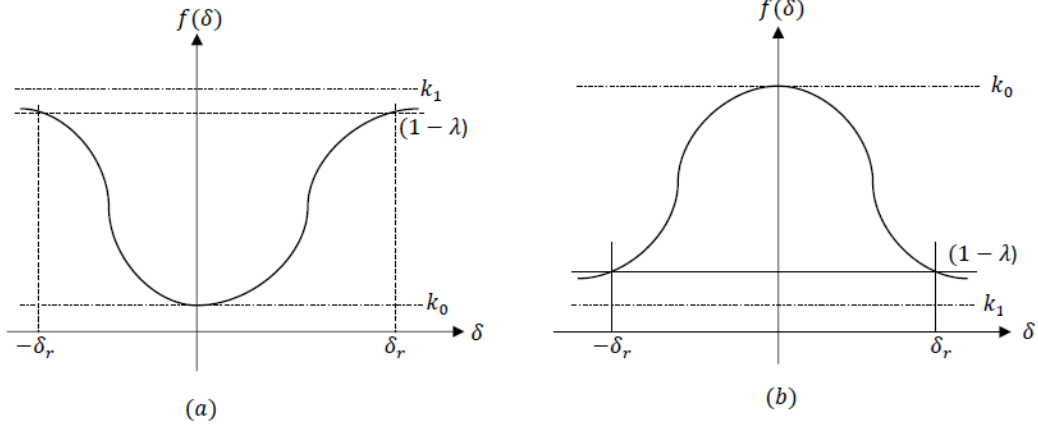
$$q = -\frac{\ln\left(\frac{k(t) - k_1}{k_0 - k_1}\right)}{\delta_r^2} = -\frac{\ln(1 - \lambda)}{\delta_r^2} \quad (11)$$

Gauss fonksiyonunun özellikleri şu şekilde açıklanabilir; sürekli bir yapıya sahiptir, alt ve üst limitlerle sınırlandırılır ve içbükeyliği ayarlanabilir. Gauss fonksiyonu parametrelerinin etkileri Şekil 6’da fonksiyon üzerinden gösterilmektedir (Puchta vd., 2020).



Şekil 6. Parametrelerin Etkileri

Şekil 6’da gösterilen k_0 parametresi Gauss fonksiyonunun tepe noktasını değiştirerek fonksiyonun uzamasına, k_1 parametresi Gauss fonksiyonunun bacak noktalarını değiştirerek fonksiyonun daha geniş bir form almasına neden olur. q parametresi ise Gauss fonksiyonunun genişliğini kontrol eder; arttıkça fonksiyon daralır ve daha sivri bir form alırken, azaldıkça fonksiyonun yayılımı artar. Gauss fonksiyonu kazanç parametreleri (k_0 , k_1) istenen davranışa bağlı olarak fonksiyonun içbükeyliğini yukarı ya da aşağı yönelmesini sağlayacak şekilde ayarlanabilir. $k_0 < k_1$ olması durumunda yukarı yöne bakan Gauss fonksiyonu, $k_0 > k_1$ olması durumunda ise aşağı yöne bakan Gauss fonksiyonu elde edilmektedir (Borges vd., 2022). Bu durum Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Yukarı yöne bakan (a) ve aşağı yöne bakan (b) Gauss fonksiyonları

GPID'nin temel yapısı, orantısal, integral ve türevsel kazanımlarının her biri Gauss fonksiyonları tarafından oluşmaktadır. GPID denetleyicisi 9 parametreye sahiptir. Üç kazanç parametresinin (P, I ve D) her biri için k_1 , k_0 ve q olmak üzere üçer parametre tanımlanır. GPID denetleyicisinin her bir kazanç parametresinin Gauss fonksiyonuyla birleşimi sonucu elde edilen denklemler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

$$k_p(t) = k_{p1} - (k_{p1} - k_{p0})e^{-kpq[\delta(t)]^2} \quad (12)$$

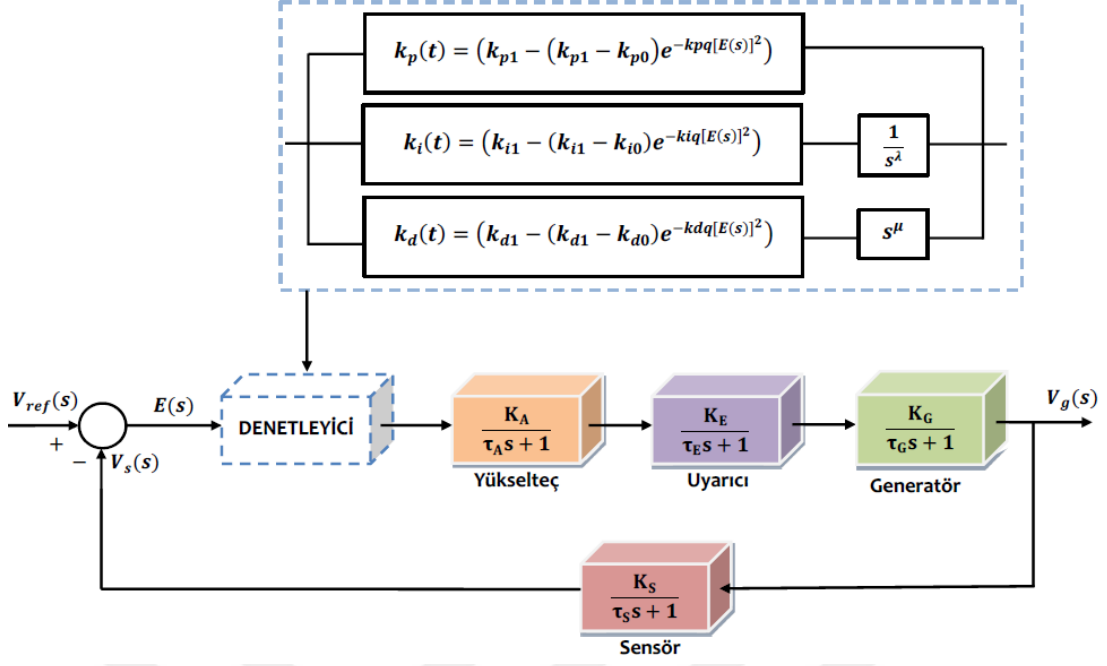
$$k_i(t) = k_{i1} - (k_{i1} - k_{i0})e^{-kiq[\delta(t)]^2} \quad (13)$$

$$k_d(t) = k_{d1} - (k_{d1} - k_{d0})e^{-kdq[\delta(t)]^2} \quad (14)$$

GFOPID denetleyicisi ise 11 parametreye sahiptir. GPID denetleyicisinde bulunan parametrelere ek olarak integral ve türevsel kazanç parametrelerinin kesir dereceli hesabı için λ ve μ parametreleri yer alır. GFOPID denetleyicisinin genel denklemi s ve t düzleminde aşağıdaki gibi yazılır;

$$C_{GFOPID}(s, t) = k_p(t) + \frac{k_i(t)}{s^\lambda} + k_d(t)s^\mu \quad (15)$$

Burada; s karmaşık frekans değişkenini, t fiziksel zaman değişkenini temsil eder.



Şekil 8. Denetleyici yapısının gösterimi

Yukarıda tanımlanan denklemler doğrultusunda, her bir kazanç parametresinin zamanla değişen Gauss fonksiyonlarıyla modellenmesi sayesinde denetleyici parametreleri dinamik bir yapıya kavuşturulmuştur. Bu kapsamda, GPID ve GFOPID denetleyicilerinin parametre yapılarında yer alan değişkenler, sistemin zamana bağlı tepkilerine uyum sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 8’de, MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen bu adaptif denetleyici yapısının blok diyagramı sunulmaktadır. Söz konusu yapıda, her bir kazanç parametresi kendi Gauss fonksiyonu üzerinden hesaplanmakta ve bu fonksiyonların bir araya gelmesiyle zamana bağlı olarak değişen bir kontrol mekanizması elde edilmektedir. Böylece, denetleyicinin farklı çalışma koşullarına uyum sağlayabilmesi ve sistem performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

2.3. Denizanası Optimizasyon Algoritması (JS)

JS algoritması, denizanasının okyanustaki yiyecek arama davranışından ilham alınarak geliştirilen bir meta-sezgisel algoritmadır (Chou & Truong, 2021). Denizanası türleri, okyanus ortamına uyum sağlamış çeşitli beslenme stratejilerine sahiptir. Bazıları yiyecekleri dokunaçlarıyla yakalayıp ağızlarına taşıırken, bazıları su akıntısının getirdiği besinleri filtreleyerek beslenir. Diğer türler ise avlarını aktif şekilde yakalar ve dokunaçlarındaki sokma hücreleriyle onları felç ederek etkisiz hale getirir (Chou & Truong, 2021).

Denizanaları, hareketlerini kontrol edebilmelerini sağlayan benzersiz özelliklere sahiptir. Gövdelerinin alt kısmı, bir şemsiye gibi kapanarak suyu dışarı iter ve bu sayede kendilerini ileriye doğru hareket ettirirler. Ancak, bu hareket yeteneğine rağmen çoğunlukla akıntılar ve gelgitlerle sürüklenirler. Uygun koşullar sağlandığında, büyük bir denizanası topluluğu oluşabilir; buna "denizanası patlaması" adı verilir. Bu toplulukların oluşumunu okyanus akıntıları, besin kaynakları, oksijen düzeyi, yırtıcılar ve sıcaklık gibi pek çok etken belirler. Özellikle okyanus akıntıları, denizanalarının sürüler halinde bir araya gelmesinde en önemli rolü oynar (Chou & Truong, 2021).

Okyanus akıntıları farklı ölçeklerde gerçekleşir. Bu geniş akıntı sistemleri, denizanalarına okyanusun farklı bölgelerine yayılma imkânı sağlar. Denizanaları, bu hareketleriyle yiyecek bulabilecekleri en iyi noktaları tespit edebilir.

Önerilen optimizasyon algoritması, üç temel ilkeye dayandırılarak modellenmiştir.

1. Denizanası, okyanus akıntısını izleyerek veya sürü içinde hareket ederek yol alır; bu iki hareket tarzı arasındaki geçiş ise bir "zaman kontrol mekanizması" ile düzenlenir.

2. Denizanası, yiyecek bulmak için okyanusta gezinir ve besin miktarının yüksek olduğu alanlara daha fazla yönelir.

3. Elde edilen yiyecek miktarı, denizanasının bulunduğu konuma ve bu konuma karşılık gelen amaç fonksiyonuna göre belirlenir.

2.3.1. Okyanus Akıntısı

Okyanus akıntısı büyük miktarda besin içerir, bu nedenle denizanası ona çekilir. Okyanus akıntısının yönü ($\overrightarrow{trend}$), okyanustaki her denizanasından şu anda en iyi konumda olan denizanasına kadar olan tüm vektörlerin ortalaması alınarak belirlenir. Okyanus akıntısı yönü Denklem 16 ile hesaplanır (Chou & Truong, 2021).

$$\overrightarrow{trend} = \frac{1}{n_{pop}} \sum \overrightarrow{trend}_i = \frac{1}{n_{pop}} \sum (X^* - e_c X_i) = X^* - e_c \frac{\sum X_i}{n_{pop}} = X^* - e_c \mu \quad (16)$$

$$\text{Set df} = e_c \mu \quad (17)$$

Böylece $\overrightarrow{trend}$ kısaca denklem 18 ile ifade edilir.

$$\overrightarrow{trend} = X^* - df \quad (18)$$

Burada; n_{pop} denizanası sayısını, X^* sürüdeki en iyi denizanası konumunu, e_c çekiciliği yöneten faktörünü, μ tüm denizanelerinin ortalama konumunu, df ise denizanasının mevcut en iyi konumu ile tüm denizanelerinin ortalama konumu arasındaki farkı temsil etmektedir.

Denizanasının mekandaki dağılımının tüm boyutlarda normal dağılıma uyduğu varsayımına dayanarak, ortalama konumun etrafındaki $\pm \beta\sigma$ mesafesindeki bölgede, tüm denizanelerinin büyük bir kısmı bulunur. Burada σ dağılımın standart sapmasıdır. Böylece,

$$df = \beta \times \sigma \times rand^f(0,1) \quad (19)$$

$$set \sigma = rand^\alpha(0,1) \times \mu \quad (20)$$

$$df = \beta \times rand^f(0,1) \times rand^\alpha(0,1) \times \mu \quad (21)$$

$$df = \beta \times rand(0,1) \times \mu \quad (22)$$

$$e_c = \beta \times rand(0,1) \quad (23)$$

Denklem (18) ile (22) düzenlenerek aşağıdaki denklem (24) elde edilir:

$$\overrightarrow{trend} = X^* - \beta \times rand(0,1) \times \mu \quad (24)$$

Okyanus akıntısının yönü ($\overrightarrow{trend}$) ve rastgelelik ($rand(0,1)$) kullanılarak her denizanasının yeni konumu Denklem 25 ve daha açık halde yazılan Denklem 26 ile elde edilir:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + rand(0,1) \times \overrightarrow{trend} \quad (25)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + rand(0,1) \times (X^* - \beta \times rand(0,1) \times \mu) \quad (26)$$

$\beta > 0$, μ 'nin uzunluğuyla ilişkili bir dağıtım katsayısıdır ve $\beta = 3$ değerinde alınmıştır (Chou & Truong, 2021).

2.3.2. Denizanası Sürüsü

Denizaneları sürü halinde, pasif (tip A) ve aktif (tip B) olmak üzere iki farklı harekete sahiptir. Başlangıçta denizaneları sürü halinde olmadıklarında tip A hareketi halindedir. Sürü haline geçtikleri zaman tip B hareketi sergilerler.

Tip A hareketi, denizanasının kendi eksenı etrafında hareket etmesidir. Her denizanası için konum güncellenmesi Denklem 27’de verilmiştir.

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + \gamma \times rand(0,1) \times (U_b - L_b) \quad (27)$$

Burada; U_b ve L_b sırasıyla arama alanlarının üst ve alt sınırını, $\gamma > 0$ ise denizanasının konumları etrafındaki hareketin uzunluğuyla ilişkili bir hareket katsayısını temsil etmektedir ve $\gamma = 0,1$ değeriinde alınmıştır (Chou & Truong, 2021).

Tip B hareketinde ise odaklanılan i . denizanasının dışında farklı bir j . denizanası rastgele seçilir. Hareket yönünü belirlemek için i . denizanasından rastgele seçilen j . denizanasına giden bir vektör kullanılır. Seçilen j . denizanası, i . odak denizanasına göre daha fazla yiyeceğin bulunduğu bir konumdaysa, odak denizanası bu seçilen denizanasına doğru yönelir. Ancak, eğer seçilen j . denizanasının bulunduğu yerdeki yiyecek miktarı odak denizanasının bulunduğu yerden daha az ise, i . denizanası ondan uzaklaşır.

Böylece her denizanası, sürü içinde yiyecek bulmak için en avantajlı yöne doğru ilerler. Denizanasının uzaklaşma veya yaklaşma yönü Denklem 30 ile belirlenir.

$$\overrightarrow{Direction} = \begin{cases} X_j(t) - X_i(t) & \text{if } f(X_i) \geq f(X_j) \\ X_i(t) - X_j(t) & \text{if } f(X_i) < f(X_j) \end{cases} \quad (28)$$

Denizanasının yaklaşması veya uzaklaşması için rastgelelik ($rand(0,1)$) kullanılarak farklı adım boyutları Denklem 29 ile elde edilir.

$$\overrightarrow{Step} = rand(0,1) \times \overrightarrow{Direction} \quad (29)$$

Denklem 29’da bulunan adım büyüklüğü kullanılarak denizanasının güncel konumu Denklem 30 ile elde edilir. Bu hareket, yerel arama alanının etkili bir şekilde kullanılması olarak kabul edilir (Kiran & Findik, 2015).

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + \overrightarrow{Step} \quad (30)$$

Hareket türünün zamanla nasıl değiştiğini belirlemek için bir zaman kontrol mekanizması kullanılır. Bu mekanizma, denizanasının sürü içindeki tip A ve tip B hareketlerinin yanı sıra, okyanus akıntısına karşı olan hareketini de düzenler.

2.3.3. Zaman Kontrol Mekanizması

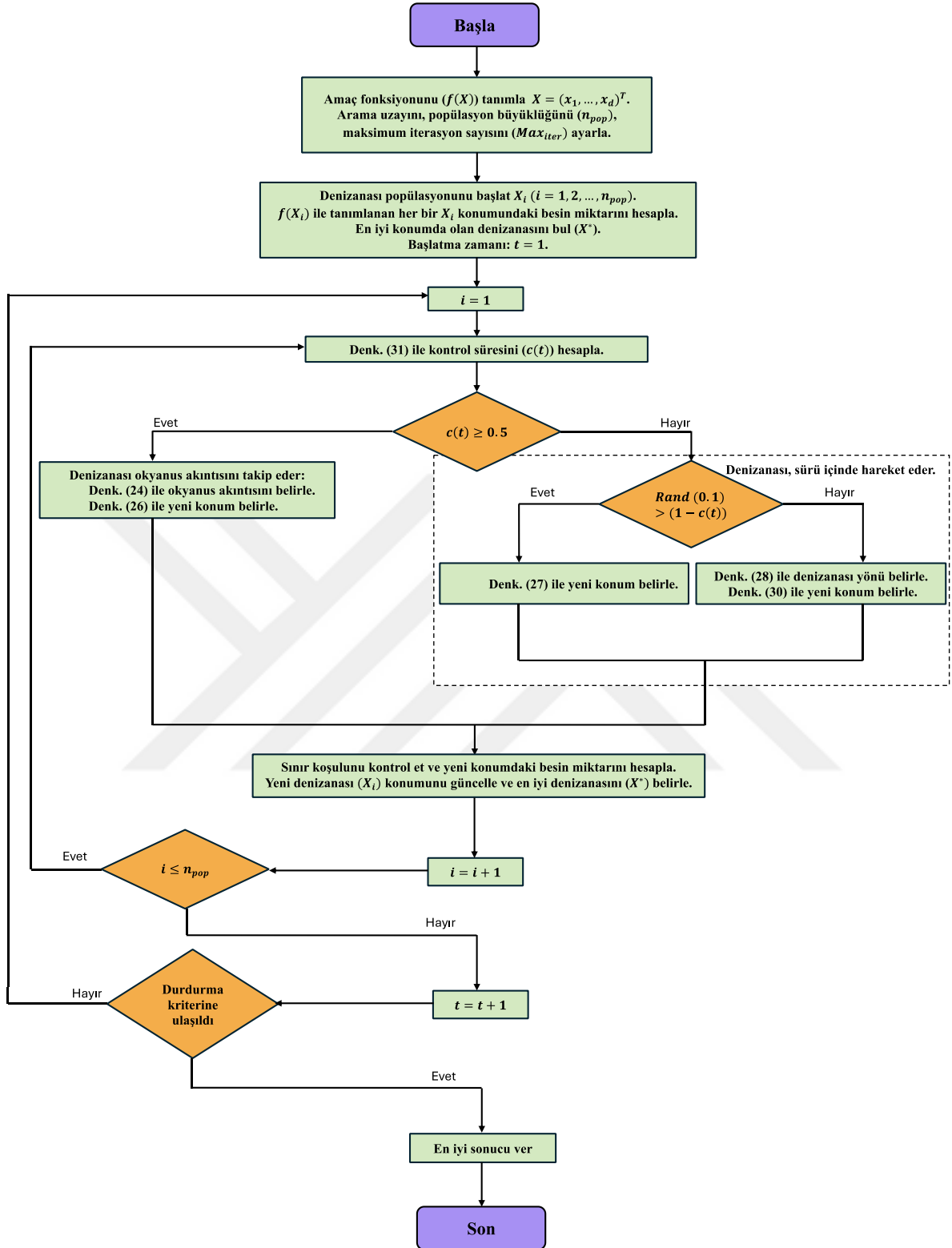
Okyanus akıntıları genellikle besin açısından zengin olduğundan, denizaneleri bu akıntılara doğru çekilir. Zaman geçtikçe daha çok denizanası bir araya gelerek bir sürü oluşturur. Sıcaklık ya da rüzgâr gibi etkenler okyanus akıntısının yönünü değiştirdiğinde, sürüdeki denizaneleri yeni bir akıntıya doğru hareket eder ve bu yeni akıntıda yeni bir sürü oluşur. Denizanasının sürü içinde yaptığı hareketler tip A (pasif hareket) ve tip B (aktif hareket) olarak ikiye ayrılır ve denizaneleri bu hareket tipleri arasında geçiş yapar. Başlangıçta A tipi hareketler tercih edilirken, zamanla B tipi hareketlere geçilir. Bu geçişleri modellemek için bir zaman kontrol mekanizması geliştirilmiştir. Bu mekanizma, denizanelerinin akıntıyı takip etmesiyle sürü içinde yer değiştirmesi arasındaki geçişleri düzenler ve bir zaman kontrol fonksiyonu $c(t)$ ile sabit bir değer olan C_0 içerir. Zaman kontrol fonksiyonu, zamanla 0 ile 1 arasında dalgalanan rastgele bir değerde bulunur.

Denklem 31’de zaman kontrol fonksiyonunun matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$c(t) = \left| \left(1 - \frac{t}{Max_{iter}} \right) \times (2 \times rand(0,1) - 1) \right| \quad (31)$$

Burada; t yineleme numarası olarak belirtilen zamanı, Max_{iter} , başlatılan bir parametre olan maksimum yineleme sayısını, $rand(0,1)$ ise C_0 ‘ı temsil etmektedir.

Şekil 9’da denizanası algoritmasının akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 9. Denizenasi algoritması akış diyagramı

2.4. Amaç Fonksiyonu Tanıtımı

Amaç fonksiyonları denetleyici parametrelerinin optimum değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu nedenle optimizasyon performansında önemli bir rol oynar. Kontrol problemlerinde genellikle amaç fonksiyonu değeri, zamanla meydana gelen hata değerini gösterir. Bu değer ne kadar az olursa denetleyici parametreleri minimum hata ile ayarlanır ve sistem performansı iyileştirilmiş olur (Kılıç & Özdemir, 2019). AVR sisteminin performansı geçici yanıt analizi yapılarak gözlemlenir. Geçici yanıt analizi parametreleri olan yerleşme süresi, yükselme süresi ve aşma değerleri en aza indirgenerek AVR sistem yanıtının geliştirilmesi amaçlanır.

Literatürde kontrol sistemlerinde sık kullanılan temelde dört amaç fonksiyonu vardır (Çavdar vd., 2023; Dahou vd., 2022; Eltag & Zhang, 2021). Bunlar; IAE, ISE, ITAE, ITSE amaç fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonların denklemleri sırasıyla Denklem 33-36'da verilmiştir. IAE ve ISE amaç fonksiyonları kullanılarak küçük aşım değeri elde edilir fakat yerleşme süresi için etkili bir sonuç alınamayabilir (Çavdar vd., 2023). IAE ve ISE fonksiyonlarına bir zaman çarpanı eklenerek ITAE ve ITSE amaç fonksiyonları elde edilir. ITAE ve ITSE fonksiyonları ile yerleşme süresi sorununun üstesinden gelinir. ITSE yerleşim süresi sorununun çözümü fakat kararlılık sorunu neden olur. Ayrıca ITSE karmaşıktır ve yanıt vermesi zaman alır (Paliwal vd., 2021). Temelde yer alan amaç fonksiyonları (IAE, ITAE, ISE, ITSE) arasından aşım ve yerleşim süresi değerlerini azaltarak ön plana çıkan ITAE amaç fonksiyonudur (Çavdar vd., 2023; Gheisarnejad, 2018).

Sistem performansında daha iyi sonuç elde edebilmek için uygun amaç fonksiyonu tasarlanabilir. Amaç fonksiyonları tek başlarına kullanılacağı gibi bir araya getirilerek yeni fonksiyonlar da oluşturulabilir (Altıntaş & Aydın, 2016). Zwe-Lee Gaing tarafından önerilen ZLG fonksiyonu buna örnektir. Denklem 37'de verilen ZLG amaç fonksiyonu diğer fonksiyonlara kıyasla hem geçici yanıt hem de kararlı durum özelliklerini içermektedir. Başka bir deyişle, diğerleri hata tabanlı amaç fonksiyonları ZLG ise doğrudan geçici yanıtları hedef alan bir amaç fonksiyonudur. Bu sayede ZLG, geçici yanıt parametre değerlerinin en aza indirilmesine yardımcı olur (Gaing, 2004).

Optimizasyon problemlerinde sonucu doğrudan etkilediği için amaç fonksiyonu seçimi önemlidir (Paliwal vd., 2021). AVR sistemlerindeki denetleyiciler için ZLG ve ITAE amaç fonksiyonları yaygın olarak kullanılmaktadır (Kose, 2020; Micev vd., 2020; Mohanty vd., 2014; Moschos & Parisses, 2022; Panda vd., 2012; Sahib, 2015).

Bu sebeple bu tez çalışması için de ITAE ve ZLG amaç fonksiyonları kullanılmıştır. IAE, ISE, ITAE ve ITSE ise bu çalışmada ele alınan analizlerde karşılaştırma yapmak için hata ölçüm metriği olarak kullanılmıştır.

$$IAE = \int_0^{t_{sim}} |e(t)|.dt \quad (33)$$

$$ISE = \int_0^{t_{sim}} e^2(t).dt \quad (34)$$

$$ITAE = \int_0^{t_{sim}} t. |e(t)|.dt \quad (35)$$

$$ITSE = \int_0^{t_{sim}} t. e^2(t).dt \quad (36)$$

$$ZLG = (1 - e^{-\beta}).(M_p + E_{ss}) + e^{-\beta}.(t_s - t_r) \quad (37)$$

Burada; e hata sinyalini, M_p maksimum aşımı, E_{ss} kararlı durum hatasını, t_s yerleşme süresini, t_r yükselme süresini, β ağırlık faktörünü temsil etmektedir. Ağırlık faktörü 0.7' den büyük ayarlanırsa aşma ve kararlı durum hatası azalır, 0.7'den küçük ayarlanırsa yükselme süresi ve yerleşme süresi azalır (Gaing, 2004). β değeri genelde 1 olarak kabul edilir (Hekimoglu, 2019).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında PID ve FOPID denetleyicileri gauss fonksiyonu ile adaptif olarak tasarlanmıştır. Denetleyici parametreleri meta-sezgisel bir algoritma olan JS algoritmasıyla optimize edilmiş ve gerekli analizler gerçekleştirilerek tasarlanan denetleyicilerin performansları gözlemlenmiştir.

Bu bölümde önerilen denetleyicinin performansını ölçebilmek için birçok analiz detaylı olarak ele alınmış ve literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

3.1. Zaman Bölgesi Analizi ve Sonuçları

Optimizasyon sırasında kullanılan denetleyici parametrelerinin belirlenen alt ve üst sınırları Tablo 5'te verilmiştir. Tasarlanan denetleyiciler ITAE ve ZLG amaç fonksiyonları kullanılarak JS algoritmasıyla optimize edilmiştir. Optimizasyon süreci boyunca sisteme girdi olarak birim basamak girişi uygulanır. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Tablo 5. Denetleyici parametreleri için alt ve üst sınır değerleri

Denetleyici	Sınır	k_{p1}	k_{p0}	k_{pq}	k_{i1}	k_{i0}	k_{iq}	k_{d1}	k_{d0}	k_{dq}	λ	μ
GPID	Alt	-3	5	0.000001	-30	0.001	0.000001	0.001	1	50	-	-
	Üst	2	30	30	-5	5	1	2	4	200	-	-
GFOPID	Alt	-3	5	0.000001	-30	0.001	0.000001	0.001	1	50	0.1	0.1
	Üst	2	30	30	-5	5	1	2	4	200	1.5	1.5

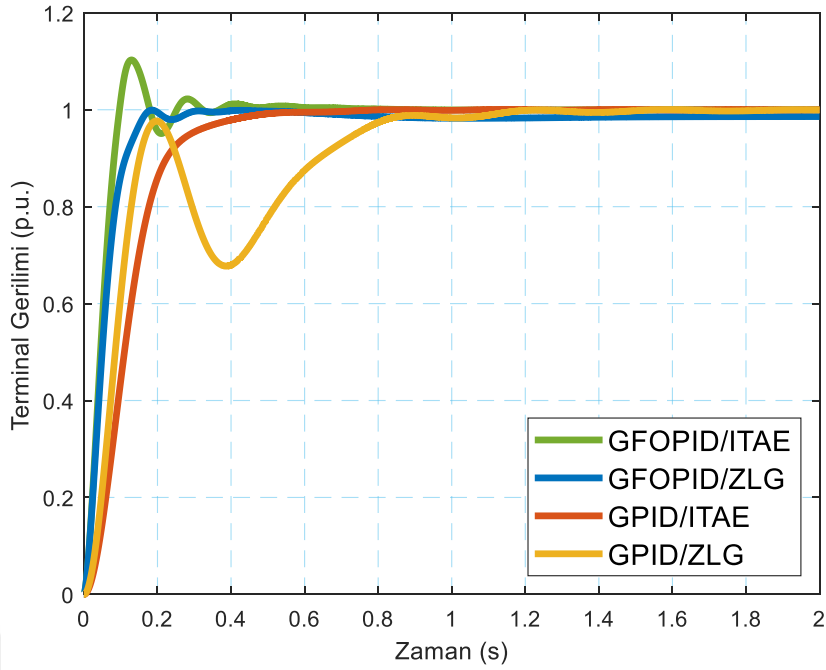
JS algoritmasıyla optimizasyonu sonucunda elde edilen optimum denetleyici parametre değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Optimizasyon sonucunda elde edilen amaç fonksiyonlarının parametre değerleri

Parametreler	GPID		GFOPID	
	ZLG (0,08648)	ITAE (0,01537)	ZLG (0,02334)	ITAE (0,00509)
k_{p1}	-1,7716	-0,5335	0,9344	1,6151
k_{p0}	7,1943	11,9837	25,0169	29,4290
k_{pq}	10,4051	15,2027	12,6625	5,7514
k_{i1}	-19,4886	-14,8506	-19,5313	-16,6321
k_{i0}	3,6099	4,4218	4,8442	3,6136
k_{iq}	0,4992	0,4117	0,9501	0,1268
k_{d1}	0,9357	0,6135	0,4287	0,6038
k_{d0}	1,3306	1,6962	1,9977	2,2841
k_{dq}	156,355	152,744	150,082	122,349
λ	-	-	1,2134	1,0049
μ	-	-	1,458	1,3908

Tablo 6'daki parametreler Denklem 12-14'teki gauss fonksiyonu denklemlerine yerleştirildiğinde elde edilen K_p , K_i ve K_d kazanç parametreleri, GPID ve GFOPID denetleyicilerinin hem ZLG hem de ITAE amaç fonksiyonları için aşağı yöne bakan Gauss fonksiyonu şeklinde bir davranış sergilemiştir.

JS algoritmasıyla optimize edilen GPID ve GFOPID denetleyicilerine ait optimum parametrelerle elde edilen geçici durum yanıtları Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. JS algoritması ile optimize edilen GPID ve GFOPID denetleyicilerinin farklı amaç fonksiyonlarından elde edilen geçici yanıt performansları

Şekil 10'dan adaptif GFOPID denetleyicisi performansının GPID denetleyicisine göre daha iyi olduğu görülmektedir. Şekil 10'daki tüm durumların zaman bölgesi analizi sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Tasarlanan GPID ve GFOPID denetleyicilerinin zaman bölgesi analizi sonuçları

	$t_s(\%2)(s)$	$t_r(s)$	$M_p(\%)$
GFOPID/ITAE	0,2915	0,0676	10,192
GFOPID/ZLG	0,1610	0,0993	0
GPID/ITAE	0,4060	0,1846	0,0737
GPID/ZLG	0,8223	0,6070	0,0115

Tablo 7'de yer alan GFOPID denetleyicisi için en iyi t_r değeri ITAE amaç fonksiyonu ile elde edilmiştir. Ancak M_p ve t_s değerleri ZLG amaç fonksiyonuna göre daha kötüdür. GPID denetleyicisi için hem t_s hem de t_r değerinin daha kısa olmasından dolayı ITAE amaç fonksiyonu ön plana çıkmaktadır.

GPID denetleyicisinin ITAE ve ZLG amaç fonksiyonlarıyla elde edilen sonuçları Tablo 8’de literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Tablo 8. GPID denetleyicisi ile literatürde yer alan çalışmaların zaman bölgesi analizi sonuçlarının karşılaştırması

Denetleyiciler	$t_s(\%2)(s)$	$t_r(s)$	$M_p(\%)$
GPID/ITAE	0,406	0,185	0,074
GPID/ZLG	0,822	0,607	0,012
ABC/ITAE (Çavdar vd., 2024)	0.738	0.130	20.45
PSO/ZLG (Çavdar vd., 2024)	0.498	0.321	0
IKA-PID (Ekinci & Hekimoglu, 2019)	0.753	0.128	15.00
RSA-PID (Can vd., 2023)	0.456	0.301	0.918
MVO-PID (Tabak, 2021b)	0.507	0.326	0.002
EO-PID (Tabak, 2021a)	0.448	0.295	1.000
SA-MRFO-PID (Micev vd., 2021)	0.382	0.245	1.799
SCA-PID (Bhookya & Jatoth, 2019)	0.665	0.393	0.019
ISHO-PID (Zhou vd., 2020)	0.848	0.302	1.202
TSA-PID (Kose, 2020)	0.758	0.131	15.57

Tablo 8’den yapılan karşılaştırma sonucunda en iyi t_s değeri SA-MRFO-PID (Micev vd., 2021) ile edildiği görülmektedir. Küçük bir farkla ikinci en iyi t_s değeri GPID/ITAE ile edildiği görülmektedir. En iyi t_r değeri ABC/ITAE (Çavdar vd., 2024), IKA-PID (Ekinci & Hekimoglu, 2019), TSA-PID (Kose, 2020) çalışmalarında elde edilmiş olsa da bu çalışmalardaki t_s ve M_p değerleri yüksektir. Bu nedenle GPID/ITAE’nin performansının gerisinde kalmıştır.

GFOPID denetleyicisinin ITAE ve ZLG amaç fonksiyonlarıyla elde edilen sonuçları Tablo 9’da literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

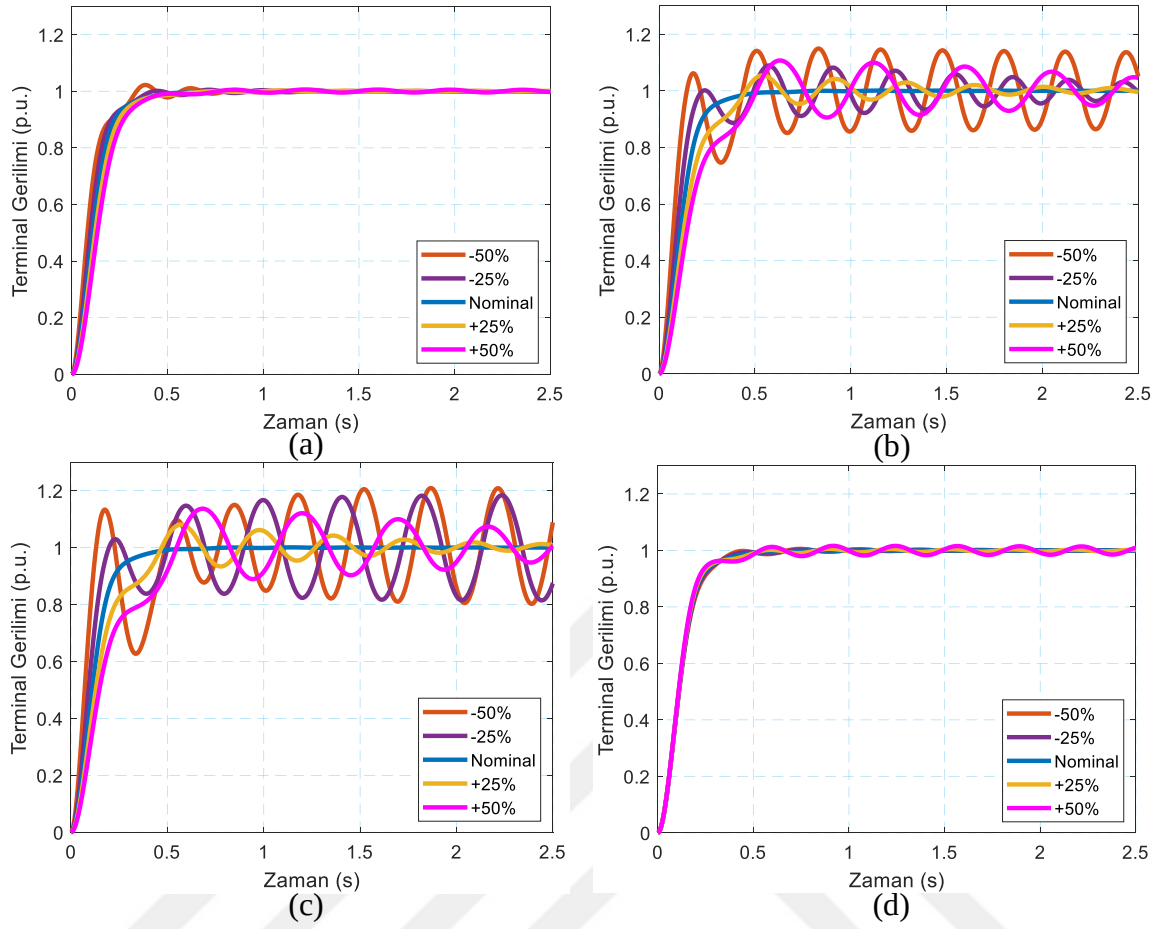
Tablo 9. GFOPID denetleyicisi ile literatürde yer alan çalışmaların zaman bölgesi analizi sonuçlarının karşılaştırması

Denetleyiciler	$t_s(\%5)(s)$	$t_s(\%2)(s)$	$t_r(s)$	$M_p(\%)$
GFOPID/ITAE	0.1619	0,2915	0,0676	10,191
GFOPID/ZLG	0.1414	0,1610	0,0993	0
BES/ITAE (Çavdar vd., 2024)	-	0.4200	0.0810	10.41
JS/ZLG (Çavdar vd., 2024)	-	0.2280	0.1510	0
DO-SFOPID (Sahin vd., 2024)	0.1369	0.4122	0.1038	0
SOA-FOPID (Jegatheesh vd., 2024)	-	0.3890	0.2570	0.545
MVO-FOPID (Tabak, 2021b)	-	0.3490	0.1070	1.029
NSCA-SPID (Suid & Ahmad, 2022)	0.5790	-	0.4980	1.022
EO-FOPID (Tabak, 2021a)		0.4596	0.1442	0.185
SCA-FOPID (Ayas & Sahin, 2021)	0.2260	-	0.1660	2.422
YSGA-FOPID (Micev vd., 2020)	0.2000	-	0.1347	1.890
FDB-LFD-FOPID (Bakir vd., 2022)	0.1870	-	0.1400	2.530
ChBWO-FOPID (Munagala & Jatoth, 2022)	0.1690		0.1103	1.184
JOA-FOPID (Jumani vd., 2020)	-	0.4530	0.0827	13.200
GBO-FOPID (Altbawi vd., 2024)	-	0.6530	0.0885	11.300
SSA-FOPID (Khan vd., 2019)	-	0.5510	0.0981	15.500
SA-MRFO-FOPID (Micev vd., 2021)	0.1909	-	0.1309	1.976
MSFA-FOPID (Mok & Ahmad, 2022)	0.1922	-	0.1415	0.363

Tablo 9’den yapılan karşılaştırma sonucunda en iyi $t_s(\%5)$ değeri DO-SFOPID (Sahin vd., 2024), en iyi $t_s(\%2)$ değeri GFOPID/ZLG ile edildiği görülmektedir. En iyi t_r değeri GFOPID/ITAE ile elde edildiği görülmektedir. Bir diğer en iyi t_r değeri GFOPID/ZLG olduğu gözlemlenebilir. Tablodaki JOA-FOPID (Jumani vd., 2020), GBO-FOPID (Altbawi vd., 2024), SSA-FOPID (Khan vd., 2019), BES/ITAE (Çavdar vd., 2024) çalışmalarında t_r değerinin GFOPID/ITAE’den daha düşük olmasına rağmen, yüksek aşım değerleri nedeniyle GFOPID/ITAE’nın performansının gerisinde kalmışlardır.

3.2. Gürbüzlük Analizi ve Sonuçları

AVR sisteminin parametreleri, çeşitli iç ve dış bozucu faktörlerden dolayı değişkenlik gösterebilir. Bu tür anormal koşullarda, denetleyicinin yüksek performansla çalışarak sistem kararlılığını sürdürmesi beklenir. Bu sebeple sistemin gürbüzlük analizinin yapılması gerekmektedir. Bu bölümde ITAE ve ZLG amaç fonksiyonlarına göre elde edilen sonuçlar doğrultusunda, AVR sistemi bileşenlerinin (yüksekteç, uyartıcı, jeneratör, sensör) zaman sabitleri %-50, %-25, %+25 ve %+50 oranlarında değiştirilerek gürbüzlük analizi gerçekleştirilmiştir. Bu parametre değişikliğinin sistem üzerindeki etkisi geçici yanıt parametreleri elde edilerek incelenmiştir. Şekil 11’de ITAE amaç fonksiyonuyla elde edilen sonuçlara göre tasarlanmış olan GPID denetleyicisinin gürbüzlük analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 11. GPID/ITAE için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri

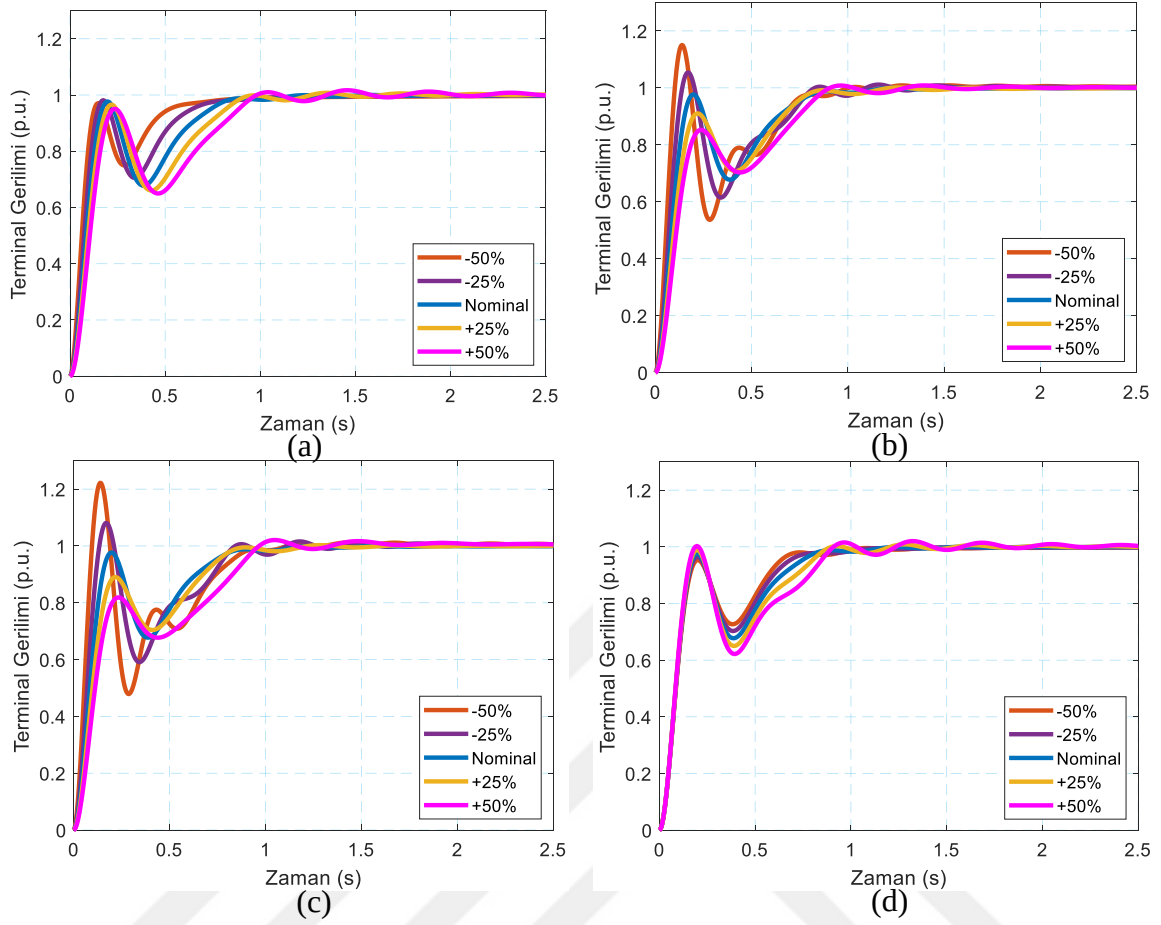
Şekil 11’de parametre değişikliğine karşı sistem yanıtını en az etkileyen τ_S parametresidir. En fazla etkileyen ise benzer sonuçlar vermeleri nedeniyle τ_E ve τ_G parametreleri olduğu görülmektedir. Şekilde τ_E ve τ_G zaman sabitleri değerleri hem arttığında hem de azaldığında sistemi kararsızlığa sürüklediği gözlemlenmiştir. Şekilde verilen parametrelerden bazılarının salınımlı yanıtlarından dolayı davranışlarının tam olarak gözlemlenebilmesi için, parametre değişimlerinin daha uzun süre incelendiği sonuçlar Ek 2’de sunulmuştur. Şekildeki geçici yanıtların parametreleri Tablo 10’da verilmektedir. Bu tablo sayesinde parametre değişimlerinin sistem geçici yanıtları üzerindeki etkisi daha net biçimde ortaya koyulabilir.

Tablo 10. GPID/ITAE için gürbüzlük analizi sonucu

Zaman Sabiti	Değişim Oranı (%)	GPID/ITAE			
		t_s (%2)(s)	t_r (s)	t_p (s)	Tepe Değeri (p.u.)
τ_A	-50%	0,2890	0,1792	0,3844	1,0222
	-25%	0,2920	0,1708	0,7167	1,0053
	+25%	0,3092	0,2024	1,0775	1,0021
	+50%	0,3377	0,2223	1,2206	1,0061
τ_E	-50%	8,4526	0,6863	0,8315	1,1493
	-25%	1,7168	0,3878	0,5723	1,0893
	+25%	0,5659	0,2891	0,5409	1,0543
	+50%	2,2864	0,3811	0,6307	1,1071
τ_G	-50%	-	-	-	-
	-25%	-	-	-	-
	+25%	1,0199	0,3380	0,5711	1,0808
	+50%	2,4057	0,4367	0,6827	1,1367
τ_S	-50%	0,3041	0,1981	0,7431	1,0054
	-25%	0,2985	0,1912	0,7552	1,0028
	+25%	0,2778	0,1784	0,8993	1,0058
	+50%	0,2636	0,1727	0,9181	1,0163

Tablodan verilen τ_G ve τ_E parametrelerinin yüzdelik değişimleri sonucu elde edilen geçici yanıt parametre değerlerinden, τ_G ve τ_E parametrelerinin sistemde dengesizliğe yol açtığı sonucuna varılabilir. τ_G değeri arttığında tüm parametre değerlerinde artış gözlemlenmiştir. τ_E değeri hem arttığında hem de azaldığında tüm değerlerde artış gözlemlenmiştir.

Şekil 12’de ZLG amaç fonksiyonuyla elde edilen sonuçlara göre tasarlanmış olan GPID denetleyicisinin gürbüzlük analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 12. GPID/ZLG için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri

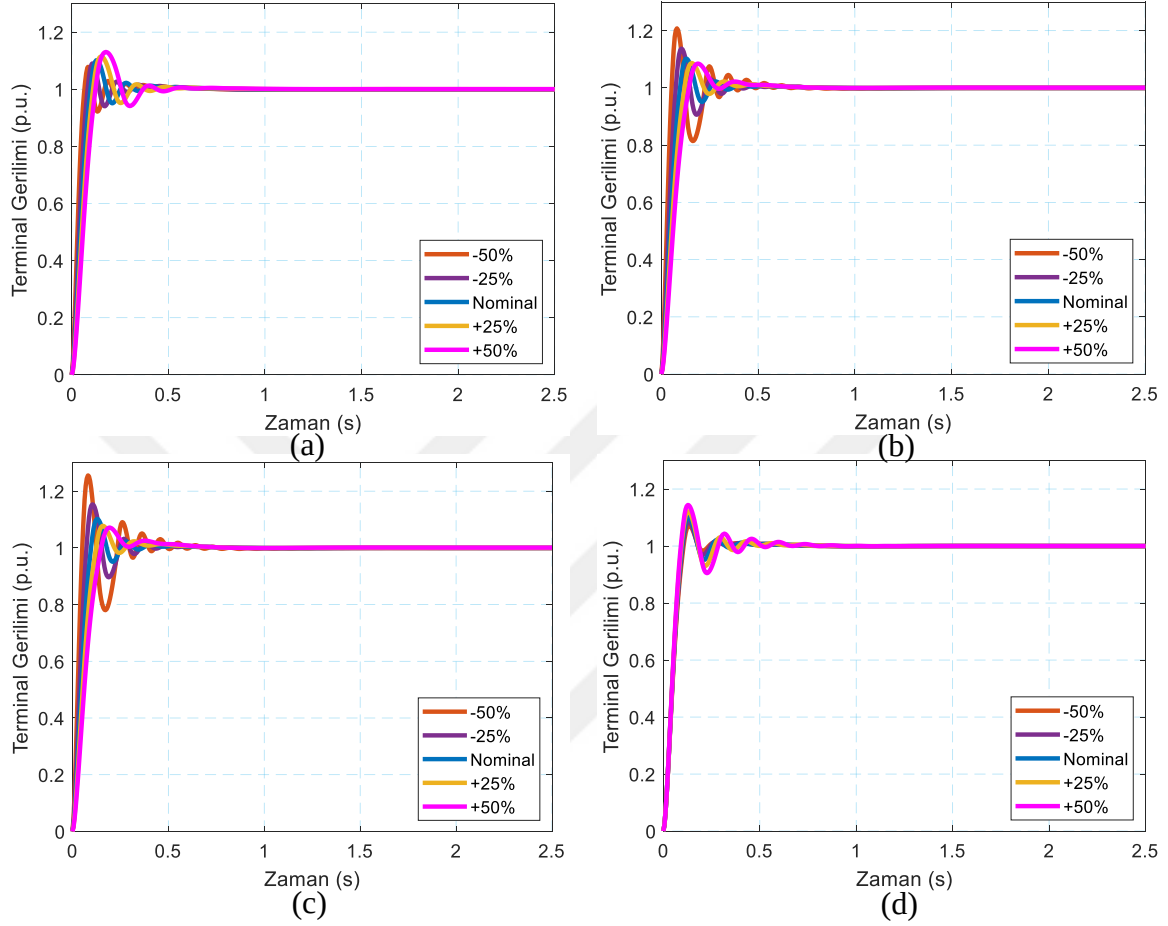
Şekil 12’de parametre değişikliğine karşı sistem yanıtını en az etkileyen τ_S parametresi, en fazla etkileyen benzer sonuçlar vermeleri nedeniyle τ_E ve τ_G parametreleri olduğu görülmektedir. Şekilde verilen parametrelerden bazılarının salınımlı yanıtlarından dolayı davranışlarının tam olarak gözlemlenebilmesi için, parametre değişimlerinin daha uzun süre incelendiği sonuçlar Ek 3’te sunulmuştur. Şekildeki geçici yanıtların parametreleri Tablo 11’de verilmektedir. Bu tablo, parametre değişimlerinin sistemin geçici yanıtları üzerindeki etkisini daha açık ve net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tablo 11. GPID/ZLG için gürbüzlük analizi sonucu

Zaman Sabiti	Değişim Oranı (%)	GPID/ZLG			
		t_s (%)2)(s)	t_r (s)	t_p (s)	Tepe Değeri (p.u.)
τ_A	-50%	0,5227	0,4107	10	0,9999
	-25%	0,6404	0,5099	10	0,9999
	+25%	0,8188	0,6943	1,3495	1,0079
	+50%	0,8866	0,7687	1,4568	1,0169
τ_E	-50%	0,7221	0,0677	0,1389	1,1504
	-25%	0,7535	0,0915	0,1700	1,0542
	+25%	0,7344	0,6240	1,2604	1,0012
	+50%	0,8110	0,7010	1,3964	1,0083
τ_G	-50%	0,8254	0,0641	0,1399	1,2223
	-25%	0,7764	0,0889	0,1701	1,0811
	+25%	0,7516	0,6384	1,2839	1,0029
	+50%	0,8925	0,7885	1,0484	1,0208
τ_S	-50%	0,6303	0,5349	10	0,9999
	-25%	0,6754	0,5623	10	0,9999
	+25%	0,7953	0,6805	1,2794	1,0087
	+50%	0,8431	0,7520	1,3226	1,0201

Tablodan verilen τ_G ve τ_E parametrelerinin yüzdelik değişimleri sonucu elde edilen geçici yanıt parametre değerlerinden, τ_G ve τ_E parametrelerinin sistemde salınımları arttırdığı sonucuna varılabilir. τ_G değeri arttığında yerleşme, yükselme ve tepe değerlerinde artış gözlemlenmiştir. τ_G değeri azaldığında tepe değeri ve yerleşme süresi değerinde artış, yükselme ve tepe süresi değerlerinde azalış gözlemlenmiştir. τ_E değeri arttığında yerleşme, yükselme ve tepe değerlerinde artış gözlemlenmiştir. τ_E değeri azaldığında tepe değerinde artış, yerleşme, yükselme ve tepe süresinde azalış gözlemlenmiştir.

ITAE amaç fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuçlara göre tasarlanmış olan GFOPID denetleyicisinin gürbüzlük analizi sonuçları Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. GFOPID/ITAE için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri

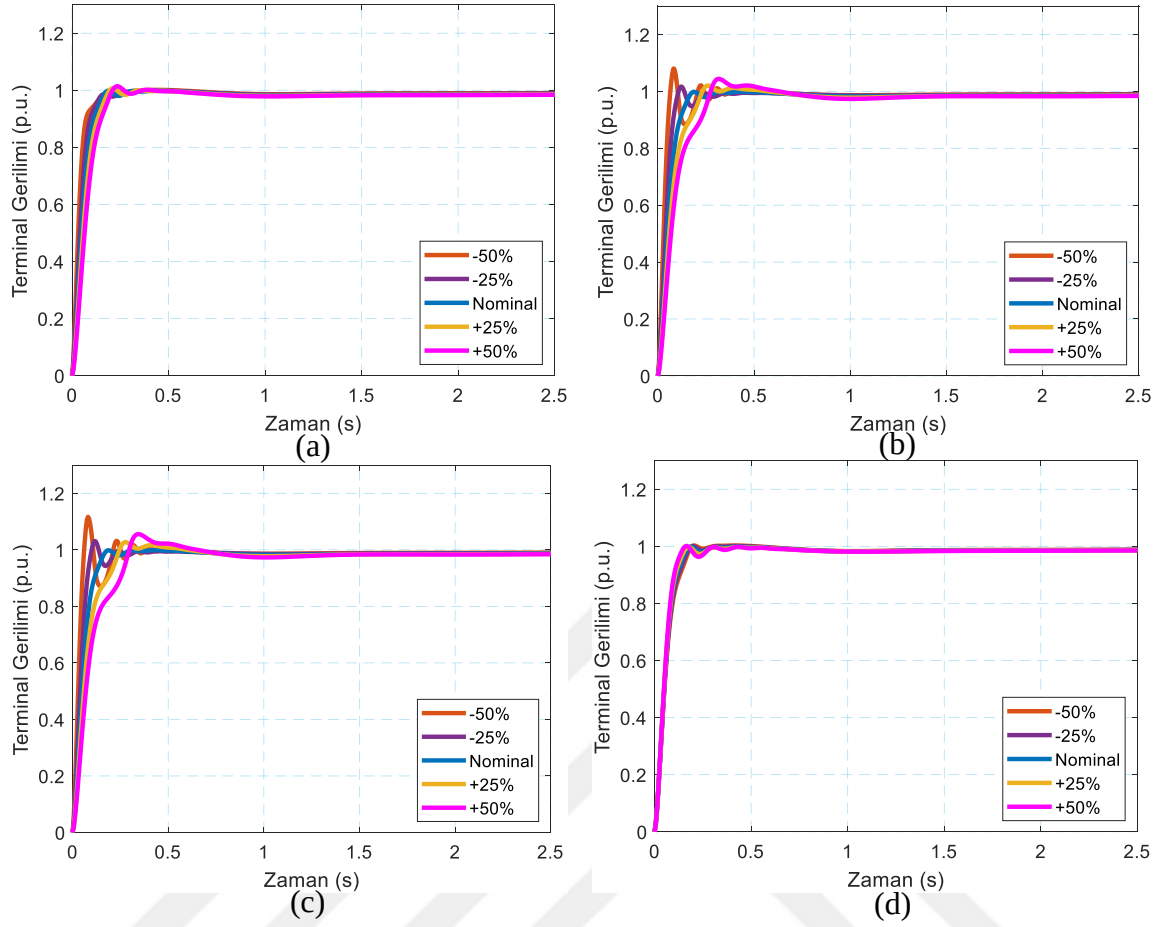
Şekil 13'te parametre değişikliğine karşı sistem yanıtını en az etkileyen τ_S parametresi, en fazla etkileyen τ_G parametresi olduğu görülmektedir. Şekilde τ_A ve τ_S zaman sabitleri arttıkça aşımın arttığı görülmektedir. τ_G ve τ_E zaman sabitleri azaldıkça aşımın arttığı gözlemlenmiştir. GFOPID denetleyicisi için yapılan analiz sonucunda elde edilen geçici yanıt parametre değerleri Tablo 12 'de verilmektedir.

Tablo 12. GFOPID/ITAE için gürbüzlük analizi sonucu

Zaman Sabiti	Değişim Oranı (%)	GFOPID/ITAE			
		t_s (%2)(s)	t_r (s)	t_p (s)	Tepe Değeri (p.u.)
τ_A	-50%	0,1518	0,0447	0,0845	1,0785
	-25%	0,1830	0,0568	0,1071	1,0904
	+25%	0,1986	0,0775	0,1524	1,1149
	+50%	0,3210	0,0868	0,1769	1,1304
τ_E	-50%	0,2643	0,0375	0,0806	1,2077
	-25%	0,2140	0,0524	0,1042	1,1369
	+25%	0,1924	0,0833	0,1573	1,0867
	+50%	0,2350	0,0997	0,1889	1,0847
τ_G	-50%	0,3662	0,0363	0,0820	1,2554
	-25%	0,2262	0,0515	0,1050	1,1534
	+25%	0,1885	0,0851	0,1588	1,0778
	+50%	0,2289	0,1042	0,1936	1,0715
τ_S	-50%	0,1556	0,0731	0,1338	1,0718
	-25%	0,1581	0,0702	0,1311	1,0852
	+25%	0,2393	0,0655	0,1285	1,1217
	+50%	0,2625	0,0637	0,1283	1,1440

Tablodan verilen τ_G ve τ_E parametrelerinin yüzdelik değişimleri sonucu elde edilen geçici yanıt parametre değerlerinden, τ_G ve τ_E parametrelerinin sistemde salınımları arttırdığı sonucuna varılabilir. τ_G değeri arttığında yerleşme, yükselme ve tepe değerlerinde artış gözlemlenmiştir. τ_G değeri azaldığında yerleşme süresi değerinde artış, yükselme ve tepe süresi değerlerinde azalış gözlemlenmiştir. τ_E değeri arttığında elde edilen tüm değerlerde artış gözlemlenmiştir. τ_E değeri azaldığında tepe değeri ve yerleşme süresi değerinde artış, yükselme ve tepe süresi değerlerinde azalış gözlemlenmiştir.

ZLG amaç fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuçlara göre tasarlanmış olan GFOPID denetleyicisinin gürbüzlük analizi sonuçları Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. GFOPID/ZLG için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri

Şekil 14’te parametre değişikliğine karşı sistem yanıtını en az etkileyen τ_S parametresi, τ_E ve τ_G birbirine çok yakın sonuçlar vermesine rağmen en fazla etkileyen τ_G parametresi olduğu görülmektedir. Artan ve azalan τ_E ve τ_G zaman sabitlerinin aşımın artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. GFOPID denetleyicisi için yapılan analiz sonucunda elde edilen geçici yanıt parametre değerleri Tablo 13’te verilmektedir.

Tablo 13. GFOPID/ZLG için gürbüzlük analizi sonucu

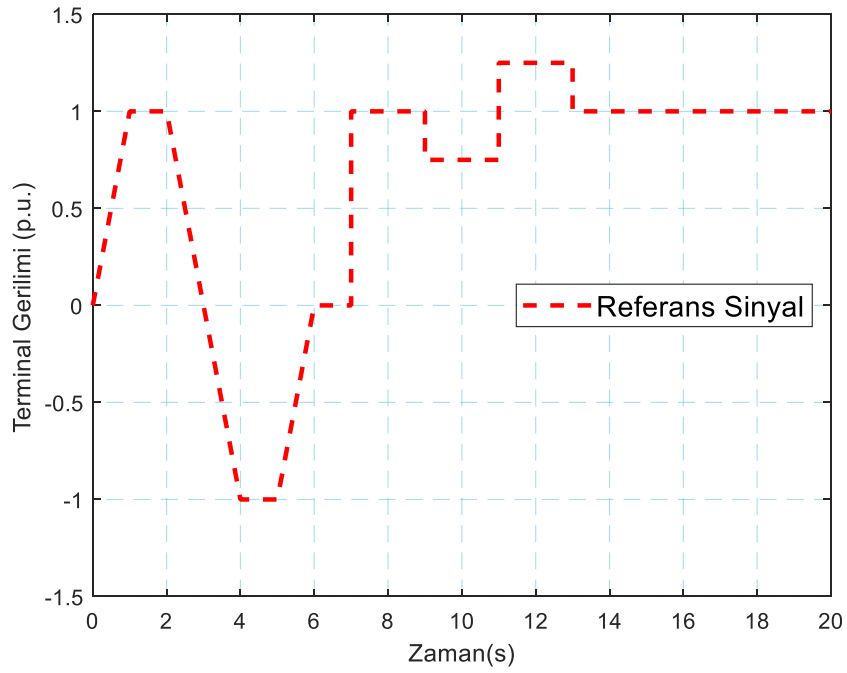
Zaman Sabiti	Değişim Oranı (%)	GFOPID/ZLG			
		t_s (%)2)(s)	t_r (s)	t_p (s)	Tepe Değeri (p.u.)
τ_A	-50%	0,1183	0,0628	0,4255	1,0014
	-25%	0,1234	0,0817	0,4646	0,9992
	+25%	0,1602	0,1158	0,2111	1,0072
	+50%	0,1787	0,1317	0,2345	1,0142
τ_E	-50%	0,1901	0,0445	0,0828	1,0806
	-25%	0,1845	0,0676	0,1216	1,0172
	+25%	0,2030	0,1503	0,2599	1,0205
	+50%	0,2514	0,2032	0,3164	1,0441
τ_G	-50%	0,1984	0,0425	0,0809	1,1168
	-25%	0,1870	0,0653	0,1171	1,0313
	+25%	0,2196	0,1685	0,2765	1,0273
	+50%	0,3676	0,2315	0,3440	1,0555
τ_S	-50%	0,1585	0,1162	0,2041	1,0031
	-25%	0,1508	0,1077	0,1971	1,0010
	+25%	0,1310	0,0921	0,1766	0,9978
	+50%	0,1208	0,0865	0,1656	1,0015

Tablodan verilen τ_G ve τ_E parametrelerinin yüzdelik değişimleri sonucu elde edilen geçici yanıt parametre değerlerinden, τ_G ve τ_E parametrelerinin sistemde salınımları arttırdığı sonucuna varılabilir. τ_G değeri arttığında elde edilen tüm değerlerde artış gözlemlenmiştir. τ_G değeri azaldığında tepe değeri ve yerleşme süresi değerinde artış, yükselme ve tepe süresi değerlerinde azalış gözlemlenmiştir. τ_E değeri arttığında elde edilen tüm değerlerde artış gözlemlenmiştir. τ_E değeri azaldığında tepe değeri ve yerleşme süresi değerinde artış, yükselme ve tepe süresi değerlerinde azalış gözlemlenmiştir.

Önerilen GFOPID denetleyicisinin gürbüzlük analizinde oldukça başarılı olduğu görülmüştür.

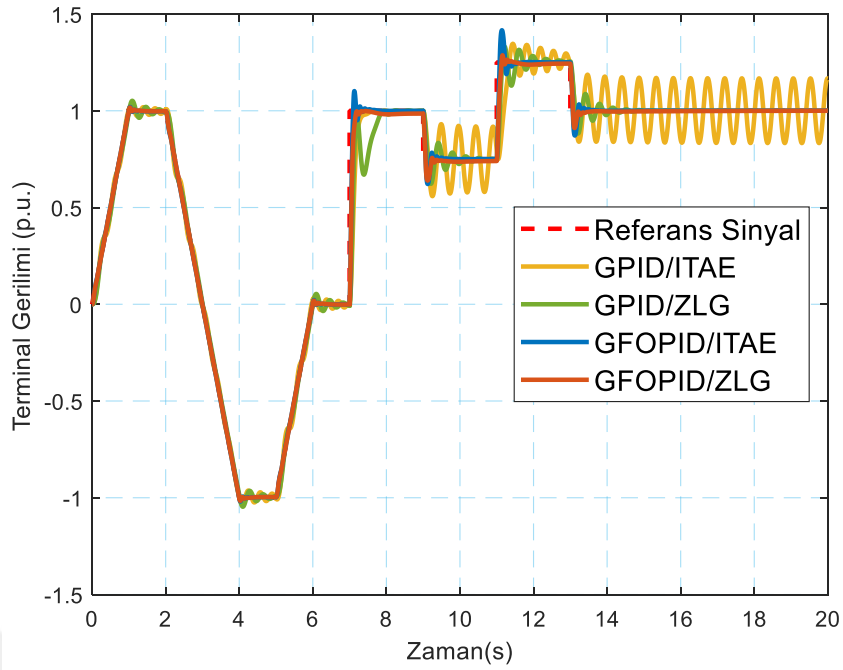
3.3. Referans Sinyal Değişimi Analizi ve Sonuçları

Bu bölümde, ITAE ve ZLG amaç fonksiyonlarıyla elde edilen sonuçlara göre tasarlanmış olan GFOPID ve GPID denetleyicilerinin referans sinyalini takip etme yeteneği incelenmiştir. Şahin ve arkadaşları tarafından referans sinyal analizi için üretilen ve farklı karakteristikler barındıran sinyal, referans sinyal olarak kullanılmış olup Şekil 15'te gösterilmiştir (Sahin vd., 2024).



Şekil 15. Kullanılan referans sinyal değişimi

GFOPID/ITAE, GFOPID/ZLG, GPID/ITAE, GPID/ZLG denetleyicilerinin bu sinyale verdiği yanıtlar ise Şekil 16'da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 16. GFOPID ve GPID denetleyicilerin oluşturulan referans sinyalini takip etme performansları

Şekilden referans sinyal girişini oldukça iyi bir performansla takip etmesiyle GFOPID/ZLG denetleyicisinin ön plana çıktığı görülmektedir. GPID/ITAE denetleyicisi belirli bir saniyeden sonra referans sinyali başarılı bir şekilde takip edemediğinden sistemin salınımlı tepki göstermesine sebep olmaktadır. Bu salınımların genliği, Şekil 16'daki gibi 13. saniyeden sonra artış veya azalış göstermeyerek, sistemin ne kararlı ne de kararsız olmasına dolayısıyla marjinal kararlı bir davranış sergilemesine neden olmuştur.

Şekil 16'da gösterilen sistem performansları, literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmış olup, bu karşılaştırmalar Tablo 14'te sunulmuştur. Kapsamlı bir performans değerlendirmesi yapmak amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan hata ölçütleri olan IAE, ISE, ITAE ve ITSE amaç fonksiyonları ele alınmıştır.

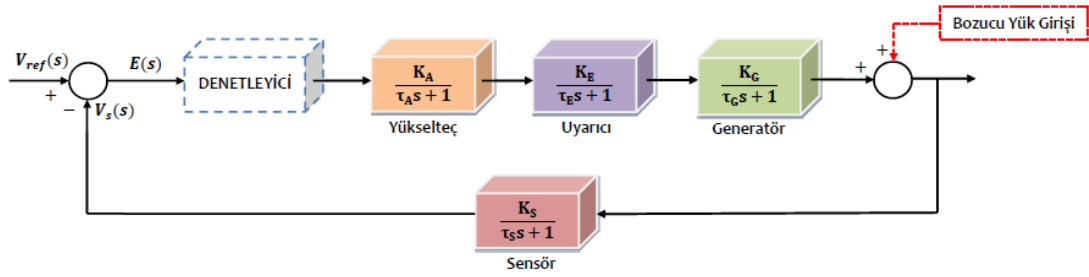
Tablo 14. Referans sinyal değışikliğı altındaki farklı denetleyicilerin hata tabanlı performans metrikleri

Denetleyiciler	IAE	ISE	ITAE	ITSE
GFOPID/ITAE	0.20691	0.06190	1.76908	0.51265
GFOPID/ZLG	0.25503	0.06520	2.20500	0.53211
GPID/ITAE	1.45794	0.27285	18.35824	3.13053
GPID/ZLG	0.58162	0.13731	4.57479	1.09953
DO-SFOPID (Sahin vd., 2024)	0.27693	0.06306	2.26075	0.48606
NSCA-SPID (Suid & Ahmad, 2022)	0.74881	0.14504	6.15054	1.15489
SCA-FOPID (Ayas & Sahin, 2021)	0.75880	0.16821	4.03107	1.04499
FDB-LFD-FOPID (Bakir vd., 2022)	0.71652	0.13757	4.15107	0.87996
MSFA-FOPID (Mok & Ahmad, 2022)	0.67796	0.14027	3.40953	0.87159

Tablo 14'teki sonuçlar, GFOPID denetleyicisinin IAE, ISE ve ITAE ölçütlerinde diğer denetleyicilere kıyasla üstün bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

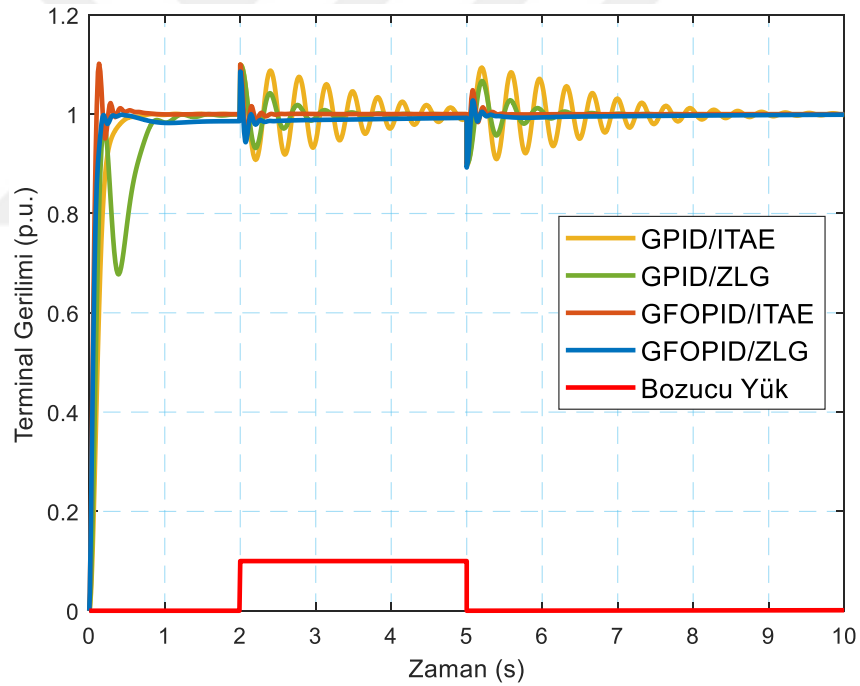
3.4. Bozucu Yük Giriş Analizi ve Sonuçları

Bu bölümde denetleyicinin AVR sistemindeki bozucu yüke karşı gösterdiği performans incelenmektedir. Şekil 17'de AVR sisteminin blok diyagramı üzerinde bozucu yük girişi kırmızı kutu içerisinde gösterilmiştir. AVR sistemi normal koşullar altında çalışırken sisteme bozucu etki dahil edilmiştir ve böylece denetleyicinin, AVR sisteminin çıkışındaki gerilim kararlılığını ne derece koruyabildiği değerlendirilmiştir. Sistemin bozucu yükü en kısa sürede giderip terminal gerilimini koruması beklenir.



Şekil 17. Bozucu yük girişli AVR sistemi

Şekil 17’de gösterilen kısımdan AVR sistemine bozucu yük uygulanır bu sırada ayrıca sistem girişine birim basamak sinyali uygulanmaktadır. Şekil 18’de 2 ile 5. saniyeler arasında 0.1 p.u. büyüklüğündeki bozucu yük sinyali girişiyle yapılan uygulama sonucunda elde edilen sistem yanıtları gösterilmiştir.



Şekil 18. Bozucu yük girişli durumunda GFOPID ve GPID denetleyicilerinin tepkileri

Şekil 18’de GFOPID/ZLG ve GFOPID/ITAE ile kontrol edilen AVR sisteminin geçici tepkisinde çok yüksek bir aşımın olmadığı ve sistemin hızlı şekilde kararlı hale geldiği gösterilmektedir. Ayrıca Gauss fonksiyonu ile tasarlanan denetleyicilerin bozucu yük girişi altındaki performansları literatürdeki diğer çalışmalarda denetleyicilerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Önerilen GFOPID denetleyicisinin performansı, literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmış olup, bu karşılaştırmalar Tablo 15'te IAE, ISE, ITAE, ITSE hata tabanlı performans metrikleriyle sunulmuştur.

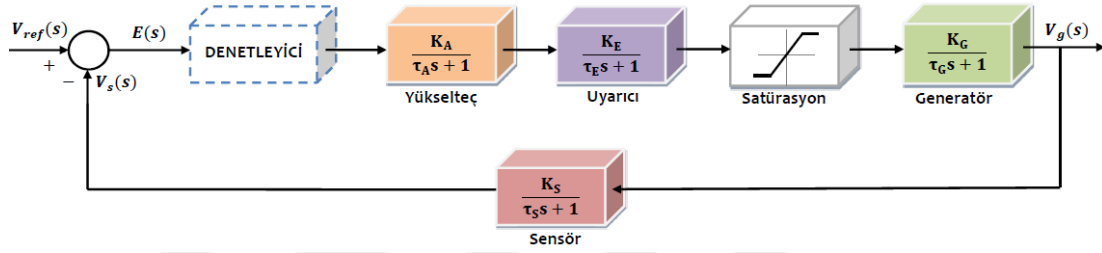
Tablo 15. Bozucu yük girişi altındaki farklı denetleyicilerin hata tabanlı performans metrikleri

Denetleyiciler	IAE	ISE	ITAE	ITSE
GFOPID/ITAE	0.08084	0.04255	0.05652	0.00298
GFOPID/ZLG	0.14677	0.04672	0.28477	0.00508
GPID/ITAE	0.33956	0.10254	0.95640	0.04927
GPID/ZLG	0.26394	0.09714	0.29648	0.02207
DO-SFOPID (Sahin vd., 2024)	0.11146	0.05058	0.17082	0.00346
NSCA-SPID (Suid & Ahmad, 2022)	0.31904	0.10822	0.51794	0.02745
SCA-FOPID (Ayas & Sahin, 2021)	0.17846	0.09093	0.23723	0.01089
FDB-LFD-FOPID (Bakir vd., 2022)	0.19874	0.07554	0.38914	0.01033
MSFA-FOPID (Mok & Ahmad, 2022)	0.15234	0.07736	0.13871	0.00889

Bozucu yük girişi altında AVR sistemi performanslarının karşılaştırıldığı çalışmalara ait Tablo 15'te sunulan sonuçlar, GFOPID denetleyicisinin IAE, ITAE, ISE ve ITSE ölçütleri açısından diğer denetleyicilere kıyasla üstün bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

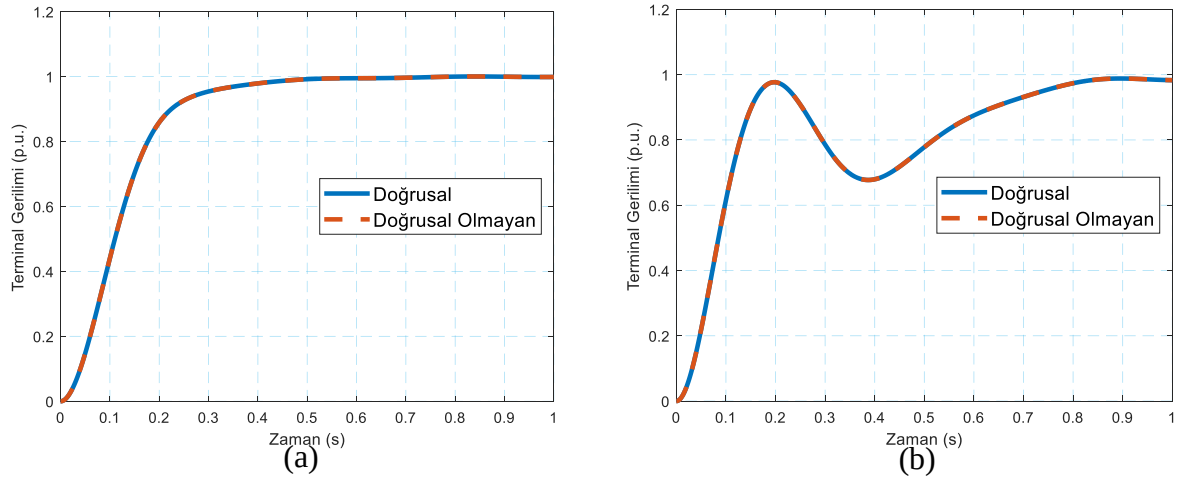
3.5. Doğrusal Olmayan Etki Analizi ve Sonuçları

Bu analiz ile GFOPID ve GPID denetleyicilerinin doğrusal olmayan AVR sisteminde performansları incelenmektedir. Sistemin doğrusal olmayan etkilerden ne kadar etkilendiğini anlamak için yapılır. Gerçekleştirilen analizde doğrusal olmayan etkiler, sistemde salınımları arttırabilir, sistemin kararlılığını bozabilir veya performansını sınırlayabilir.

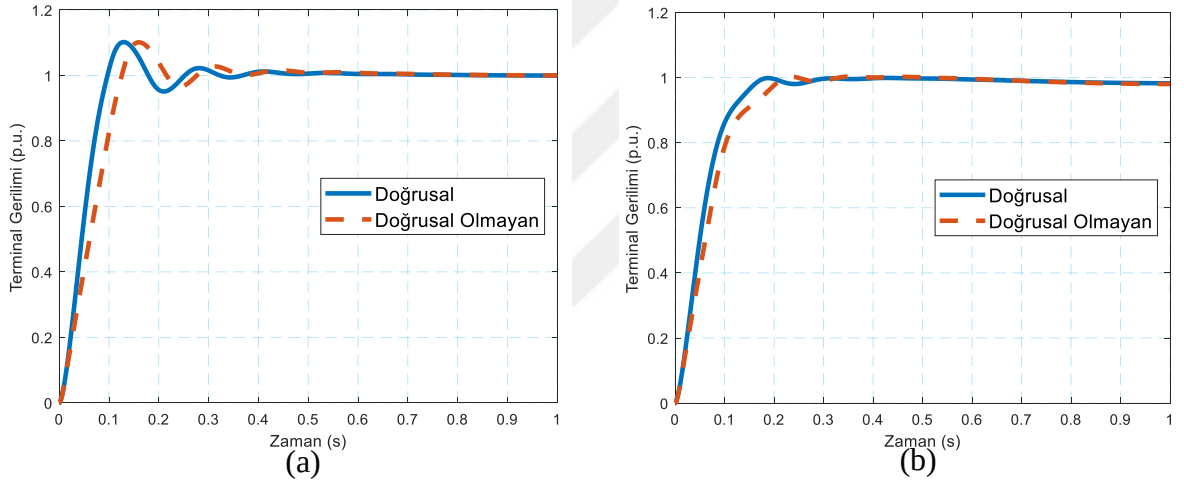


Şekil 19. Doğrusal olmayan analizi için kullanılan AVR sistemi blok diyagramı gösterimi

Doğrusal olmayan AVR sisteminin yapısı için Şekil 19’da gösterildiği gibi generatörün girişine bir satürasyon bloğu yerleştirilerek oluşturulur. Şekil 19’da gösterilen satürasyon bloğunun literatürde kullanıldığı gibi alt sınır değeri -6 üst sınır değeri ise +9 alınmıştır (Çavdar vd., 2023; Paliwal vd., 2021). Doğrusal ve doğrusal olmayan koşullar altında olan AVR sisteminin GFOPID ve GPID denetleyicileri kullanılarak nasıl tepki verdiği Şekil 20 ve 21’de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 20. (a) GPID/ITAE, (b) GPID/ZLG için doğrusal ve doğrusal olmayan etki analizi sonucu



Şekil 21. (a) GFOPID/ITAE, (b) GFOPID/ZLG için doğrusal ve doğrusal olmayan etki analizi sonucu

Tablo 16'da ise doğrusal ve doğrusal olmayan koşullar altında olan AVR sistemlerinden elde edilen geçici yanıt parametre değerleri verilmiştir.

Tablo 16. Doğrusal ve doğrusal olmayan çalışma koşulları altında AVR sisteminde GPID ve GFOPID denetleyicilerinin geçici yanıt sonuçları

		t_s (%2)(s)	t_r (s)	t_p (s)	M_p (%)
GFOPID/ITAE	Doğrusal	0,1619	0,0676	0,1294	10,1918
	Doğrusal Olmayan	0,1957	0,0947	0,1601	10,1249
GFOPID/ZLG	Doğrusal	0,1414	0,0993	0,4283	0
	Doğrusal Olmayan	0,1820	0,1273	0,3560	0,3207
GPID/ITAE	Doğrusal	0,2900	0,1846	0,8405	0,0195
	Doğrusal Olmayan	0,2900	0,1846	0,8405	0,0195
GPID/ZLG	Doğrusal	0,7391	0,6070	0,8951	0
	Doğrusal Olmayan	0,7391	0,6070	0,8951	0

Tablo 16'da yer alan sayısal sonuçlar incelendiğinde, GPID denetleyicisinin hem doğrusal hem de doğrusal olmayan durumlarda aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Uyarıcı bloğunda üretilen uyarma gerilimi düşükse ve generatörün çıkış gerilimi doğrusal bölgedeyse satürasyon bloğunun etkisi belirgin olmayabilir. Bu nedenle aynı sonuçlar elde edilebilir. Ancak uyarma gerilimi ve çıkış gerilimi arttıkça satürasyon etkisi devreye girer ve sistemin doğrusal davranışından sapmalar gözlenebilir. GFOPID denetleyicisinin, doğrusal ile doğrusal olmayan AVR sistemleri arasında yalnızca küçük farklılıklar bulunmasına rağmen iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, AVR sisteminin yanıtını iyileştirmek amacıyla Gauss tabanlı PID ve FOPID denetleyicilere dayalı adaptif denetleyici tasarımları gerçekleştirilmiştir. GPID denetleyici tasarımı ilk kez bu çalışmada AVR sistemine entegre edilmiştir. Literatürde bir ilk olarak GFOPID denetleyici tasarımı yapılmış ve bu denetleyici ilk kez AVR sisteminde uygulanmıştır. Tasarlanan adaptif GPID ve GFOPID denetleyicilerin performansları, zaman bölgesi analizi, gürbüzlük analizi, referans sinyal değişimi analizi, bozucu yük girişi analizi ve doğrusal olmayan sistem analizi gibi yöntemlerle kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde son dönemlerde gerçekleştirilen güncel çalışmalarla karşılaştırılarak ortaya konmuştur.

- Zaman Bölgesi Analizinde: ITAE amaç fonksiyonu ile optimizasyon sonucu tasarlanan adaptif GPID denetleyicisinin performansı, ZLG ile tasarlanan adaptif GPID denetleyicisinin performansından daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki PID denetleyicileri ile GPID denetleyicisinin karşılaştırması sonucunda en iyi t_s değeri 0.382 s ile SA-MRFO-PID (Micev vd., 2021) iken küçük bir farkla ikinci en iyi değer 0.406 s ile GPID/ITAE, en iyi t_r değeri 0.128 s ile IKA-PID (Ekinici & Hekimoglu, 2019) çalışmalarında elde edilmiştir. ZLG amaç fonksiyonu ile optimizasyon sonucu tasarlanan adaptif GFOPID denetleyicisinin performansı, ITAE ile tasarlanan adaptif GFOPID denetleyicisinin performansından daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki FOPID denetleyicileri ile GFOPID denetleyicisinin karşılaştırması sonucunda; en iyi t_s (%5) değeri 0.1369 s ile DO-SFOPID (Sahin vd., 2024) iken küçük bir farkla ikinci en iyi değer 0.1414 s ile GFOPID/ZLG, t_s (%2) için en iyi değer 0.1610 s ile GFOPID/ZLG, en iyi t_r değeri 0.0676 s ile GFOPID/ITAE iken ikinci en iyi değer 0.0993 s ile GFOPID/ZLG çalışmalarından elde edildiği gözlemlenmiştir.
- Gürbüzlük Analizinde: Tasarlanan adaptif GPID denetleyicisinin sonuçları incelendiğinde, bazı parametre değişiklikleri durumunda kararsızlık gösterdiği tespit edilmiştir. GFOPID denetleyicisinin ise parametre değişimlerine rağmen kararlılığını koruduğu ve bu nedenle gürbüzlük analizi açısından oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

- Referans Sinyal Değişimi Analizi: Sonuçlar incelendiğinde GPID denetleyicisinin tam oturmamasından kaynaklanan marjinal kararlı bir davranış sergilediği görülmüştür. Buna karşılık, GFOPID denetleyicisi, referans sinyalini yüksek doğrulukla takip ederek üstün bir performans sergilemiştir. Ayrıca, denetleyicilerin performansları, farklı amaç fonksiyonlarıyla elde edilen sonuçlar doğrultusunda detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu sonuçlar, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, GFOPID denetleyicisinin tüm çalışmalara kıyasla üstün bir performans sergilediğini ortaya koymuştur.
- Bozucu Yük Girişi Analizi: GFOPID denetleyicisinin GPID denetleyicisine kıyasla üstünlüğü görülmüştür. Denetleyicilerin performansları, farklı amaç fonksiyonlarıyla elde edilen sonuçlar doğrultusunda detaylı bir şekilde incelenmiş olup literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre, GFOPID denetleyicisi tüm çalışmalar arasında en üstün performansı sergilemiştir.
- Doğrusal Olmayan Etki Analizi: GPID denetleyicisi doğrusal ve doğrusal olmayan durumların ikisinde de aynı sonuçları vermiştir. GFOPID doğrusal ile doğrusal olmayan AVR sistemleri arasında yalnızca küçük farklılıklar elde edilmiştir.

5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, Gauss fonksiyonuna dayalı yeni bir adaptif denetleyici yöntemi olan GFOPID denetleyicisi geliştirilmiştir. GFOPID denetleyicisinin parametreleri, son yıllarda literatürde yer alan JS algoritması kullanılarak optimize edilmiş ve AVR sistemi üzerinde test edilmiştir. İlerleyen zamanlarda bu konu ile ilgili çalışma yapmak isteyen araştırmacılar aşağıda verilmiş önerileri göz önünde bulundurabilirler:

- Adaptif Gauss fonksiyonu tabanlı GFOPID denetleyicisinin performansı, yük frekans kontrolü (LFC) gibi farklı güç sistemlerinde test edilerek etkinliği değerlendirilebilir.
- Denetleyici parametrelerinin optimum değerlerini bulurken kullanılan meta-sezgisel arama algoritmalarının performansı önemlidir. Bu çalışmada GFOPID denetleyicisinin parametreleri JS algoritması ile optimize edilmiştir. Ancak farklı meta-sezgisel arama algoritmaları kullanılarak denetleyicinin performansı karşılaştırılabilir ve en uygun yöntem belirlenebilir.
- Adaptif Gauss fonksiyonu, yalnızca GFOPID denetleyicisi ile sınırlı kalmadan, farklı yapıya sahip diğer denetleyicilerde de uygulanarak performansı incelenebilir.
- Optimizasyon sürecinde kullanılan amaç fonksiyonunun doğru tanımlanması ve uygulanması optimizasyon başarısını etkiler. Bu nedenle, literatürde yaygın olarak kullanılan farklı amaç fonksiyonları test edilebilir veya AVR sistemi için özel olarak yeni bir amaç fonksiyonu geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Aguila-Camacho, N., & Duarte-Mermoud, M. A. (2013). Fractional adaptive control for an automatic voltage regulator. *ISA Transactions*, 52(6), 807-815.
- Al Gizi, A. J. H. (2019). A particle swarm optimization, fuzzy PID controller with generator automatic voltage regulator. *Soft Computing*, 23(18), 8839-8853.
- Altbawi, S. M. A., Mokhtar, A. S. Bin, Jumani, T. A., Khan, I., Hamadneh, N. N., & Khan, A. (2024). Optimal design of Fractional order PID controller based Automatic voltage regulator system using gradient-based optimization algorithm. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 36(1), 32-44.
- Altıntaş, G., & Aydin, Y. (2016). Comparison of fractional and integer order PID controllers on aircraft model using genetic algorithm. *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, s. 242-246. Bursa.
- Armstrong, B., Gutierrez, J. A., Joseph, R., & Wade, B. (2002). The stability of nonlinear PID control with arbitrary partial-state knowledge. *Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s.3429-3434. Washington.
- Armstrong, B., Neevel, D., & Kusik, T. (2001). New results in NPID control: Tracking, integral control, friction compensation and experimental results. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 9(2), 399-406.
- Atherton, D. P., Tan, N., & Yüce, A. (2015). Methods for computing the time response of fractional-order systems. *IET Control Theory and Applications*, 9(6), 817-830.
- Ayas, M. S., & Sahin, E. (2021). FOPID controller with fractional filter for an automatic voltage regulator. *Computers and Electrical Engineering*, 90, 106895.
- Bakir, H., Guvenc, U., Tolga Kahraman, H., & Duman, S. (2022). Improved Lévy flight distribution algorithm with FDB-based guiding mechanism for AVR system optimal design. *Computers and Industrial Engineering*, 168, 108032.
- 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.
- Bhookya, J., & Jatoth, R. K. (2020). Improved Jaya algorithm-based FOPID/PID for AVR system. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 39(4), 775-790.
- Bhullar, A. K., Kaur, R., & Sondhi, S. (2020). Enhanced crow search algorithm for AVR optimization. *Soft Computing*, 24(16), 11957-11987.

- Bhullar, A. K., Kaur, R., & Sondhi, S. (2022). Optimization of Fractional Order Controllers for AVR System Using Distance and Levy-Flight Based Crow Search Algorithm. *IETE Journal of Research*, 68(5), 3900-3917.
- 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.
- Borges, F. G., Guerreiro, M., Monteiro, P. E. S., Janzen, F. C., Corrêa, F. C., Stevan, S. L., Siqueira, H. V., & Kaster, M. dos S. (2022). Metaheuristics-Based Optimization of a Robust GAPID Adaptive Control Applied to a DC Motor-Driven Rotating Beam with Variable Load. *Sensors*, 22(16), 6094.
- Can, Ö., Andiç, C., Ekinci, S., & Izci, D. (2023). Enhancing transient response performance of automatic voltage regulator system by using a novel control design strategy. *Electrical Engineering*, 105(4), 1993-2005.
- Chou, J. S., & Truong, D. N. (2021). A novel metaheuristic optimizer inspired by behavior of jellyfish in ocean. *Applied Mathematics and Computation*, 389, 125535.
- Çavdar, B., Şahin, E., Akyazı, Ö., & Nuroğlu, F. M. (2023). A novel optimal $PI\lambda I\lambda 2D\mu 1D\mu 2$ controller using mayfly optimization algorithm for automatic voltage regulator system. *Neural Computing and Applications*, 35(27), 19899-19918.
- Çavdar, B., Şahin, E., & Sesli, E. (2024). On the assessment of meta-heuristic algorithms for automatic voltage regulator system controller design: a standardization process. *Electrical Engineering*. 106(5), 5801-5839.
- Dahou, A., Abd Elaziz, M., Chelloug, S. A., Awadallah, M. A., Al-Betar, M. A., Al-qaness, M. A. A., & Forestiero, A. (2022). Intrusion Detection System for IoT Based on Deep Learning and Modified Reptile Search Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022(1), 6473507.
- 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.
- Dos Santos, L. A., & Dos Santos Kaster, M. (2015). Adaptive proportional-integrator controller applied in a single-phase parallel active power filter. *IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics*, s. 355-360. Buzios.
- Dos Santos, L. A., Dos Santos Kaster, M., & Oliveira Da Silva, S. A. (2012). Applying a nonlinear PID in a singlephase PLL control. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, s. 1-4. Bengaluru.
- Ekinci, S., & Hekimoglu, B. (2019). Improved Kidney-Inspired Algorithm Approach for Tuning of PID Controller in AVR System. *IEEE Access*, 7, 39935-39947.

- 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.
- Eltag, K., & Zhang, B. (2021). Design Robust Self-tuning FPIDF Controller for AVR System. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19(2), 910-920.
- Gaing, Z. L. (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 384-391.
- Gheisarnejad, M. (2018). An effective hybrid harmony search and cuckoo optimization algorithm based fuzzy PID controller for load frequency control. *Applied Soft Computing Journal*, 65, 121-138.
- Ghosh, A., Ray, A. K., Nurujjaman, M., & Jamshidi, M. (2021). Voltage and frequency control in conventional and PV integrated power systems by a particle swarm optimized Ziegler–Nichols based PID controller. *SN Applied Sciences*, 3(3), 1-13.
- 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.
- Hashim, F. A., Hussain, K., Houssein, E. H., Mabrouk, M. S., & Al-Atabany, W. (2021). Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Applied Intelligence*, 51(3), 1531-1551.
- Hekimoglu, B. (2019). Optimal Tuning of Fractional Order PID Controller for DC Motor Speed Control via Chaotic Atom Search Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 7, 38100-38114.
- Hussain, K., Mohd Salleh, M. N., Cheng, S., & Shi, Y. (2019). Metaheuristic research: a comprehensive survey. *Artificial Intelligence Review*, 52(4), 2191-2233.
- Isayed, B. M., & Hawwa, M. A. (2007). A nonlinear PID control scheme for hard disk drive servosystems. *2007 Mediterranean Conference on Control and Automation*, s. 1-6. Atina.
- Izci, D., Ekinci, S., & Mirjalili, S. (2023). Optimal PID plus second-order derivative controller design for AVR system using a modified Runge Kutta optimizer and Bode's ideal reference model. *International Journal of Dynamics and Control*, 11(3), 1247-1264.
- Izci, D., Ekinci, 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.

- Izci, D., Ekinci, 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.
- Jegatheesh, A., Thiagarajan, V., Selvan, N. B. M., & Raj, M. D. (2024). Voltage Regulation and Stability Enhancement in AVR System Based on SOA-FOPID Controller. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 19(1), 31-44.
- Jimenez-Urbe, A., Serna-Hernandez, L. F., Hernandez-Paredes, J. M., & Munoz-Barron, B. (2015). Comparative Study of a PID and PD Control Bounded by Hyperbolic Tangent Function in Robot 3 DOF. *2015 International Conference on Mechatronics, Electronics, and Automotive Engineering (ICMEAE)*, s. 199-204. Cuernavaca.
- 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.
- 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 (Switzerland)*, 8(12), 1472.
- Kılıç, E., & Özdemir, M. T. (2019). Güç Sistemlerindeki Optimum Otomatik Gerilim Regülasyonu için Çoklu Amaç Fonksiyonunun Belirlenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(1), 1-12.
- Kiran, M. S., & Findik, O. (2015). A directed artificial bee colony algorithm. *Applied Soft Computing Journal*, 26, 454-462.
- Korkmaz, M., Aydoğdu, Ö., & Doğan, H. (2012). Design and performance comparison of variable parameter nonlinear PID controller and genetic algorithm based PID controller. *2012 - International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*, s. 1-5. Trabzon.
- Kose, E. (2020). Optimal Control of AVR System with Tree Seed Algorithm-Based PID Controller. *IEEE Access*, 8, 89457-89467.
- Kumar, P., Chatterjee, S., Shah, D., Saha, U. K., & Chatterjee, S. (2017). On comparison of tuning method of FOPID controller for controlling field controlled DC servo motor. *Cogent Engineering*, 4(1), 1357875.
- Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., & Vittal, V. (2004). Definition and classification of power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(3), 1387-1401.

- Li, L., Yang, Y., Peng, H., & Wang, X. (2006). An optimization method inspired by “chaotic” ant behavior. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 16(8), 2351-2364.
- 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.
- Li, Y., Ang, K. H., & Chong, G. C. Y. (2006). PID control system analysis and design. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1), 32-41.
- Lucas, R., Oliveira, R. M., Nascimento, C. B., & Kaster, M. S. (2015). Performance analysis of an adaptive Gaussian nonlinear PID control applied to a step-down CC-CC converter. *IEEE 24 th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, s. 1022-1026. Buzios.
- 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.
- 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.
- Mohanty, P. K., Sahu, B. K., & Panda, S. (2014). Tuning and assessment of proportional-integral-derivative controller for an automatic voltage regulator system employing local unimodal sampling algorithm. *Electric Power Components and Systems*, 42(9), 959-969.
- Mok, R. H., & Ahmad, M. A. (2022). Fast and optimal tuning of fractional order PID controller for AVR system based on memorizable-smoothed functional algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 35, 101264.
- Monje, C. A., Vinagre, B. M., Feliu, V., & Chen, Y. Q. (2008). Tuning and auto-tuning of fractional order controllers for industry applications. *Control Engineering Practice*, 16(7), 798-812.
- 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.
- Moschos, I., & Parisses, C. (2022). A novel optimal PI λ DND2N2 controller using coyote optimization algorithm for an AVR system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 26, 100991.

- Munagala, V. K., & Jatoth, R. K. (2022). Improved fractional PI λ D μ controller for AVR system using Chaotic Black Widow algorithm. *Computers and Electrical Engineering*, 97, 107600.
- Ortiz-Quisbert, M. E., Duarte-Mermoud, M. A., Milla, F., Castro-Linares, R., & Lefranc, G. (2018). Optimal fractional order adaptive controllers for AVR applications. *Electrical Engineering*, 100(1), 267-283.
- Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B., & Nanot, F. M. (2000). Frequency-band complex noninteger differentiator: Characterization and synthesis. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 47(1), 25-39.
- Öztürk, Ö., & Çavdar, B. (2024). Otomatik Gerilim Regülatörü Sistemi Denetleyici Tasarımı için Meta-Sezgisel Algoritmaların Performansı. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(4), 2258-2289.
- Paliwal, N., Srivastava, L., & Pandit, M. (2021). Equilibrium optimizer tuned novel FOPID-DN controller for automatic voltage regulator system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(8), e12930.
- Panda, S., Sahu, B. K., & Mohanty, P. K. (2012). Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 349(8), 2609-2625.
- Pedroso, M. D., Nascimento, C. B., Tusset, A. M., & Kaster, M. D. S. (2013). Performance comparison between nonlinear and linear controllers with weighted adaptive control applied to a buck converter using poles placement design. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, s. 1-6. Taipei.
- Prasad, L. B., Gupta, H. O., & Tyagi, B. (2014). Application of policy iteration technique based adaptive optimal control design for automatic voltage regulator of power system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 63, 940-949.
- Puchta, E. D. P., Bassetto, P., Biuk, L. H., Itaborahy Filho, M. A., Converti, A., Kaster, M. D. S., & Siqueira, H. V. (2021). Swarm-inspired algorithms to optimize a nonlinear gaussian adaptive pid controller. *Energies*, 14(12), 3385.
- Puchta, E. D. P., Siqueira, H. V., & Kaster, M. D. S. (2020). Optimization Tools Based on Metaheuristics for Performance Enhancement in a Gaussian Adaptive PID Controller. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 50(3), 1185-1194.
- Rajinikanth, V., & Satapathy, S. C. (2015). Design of Controller for Automatic Voltage Regulator Using Teaching Learning Based Optimization. *Procedia Technology*, 21, 295-302.
- Ramezani, H., Balochian, S., & Zare, A. (2013). Design of optimal fractional-order PID controllers using particle swarm optimization algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 24(5), 601-611.

- 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.
- Sahin, A. K., Cavdar, B., & Ayas, M. S. (2024). An adaptive fractional controller design for automatic voltage regulator system: sigmoid-based fractional-order PID controller. *Neural Computing and Applications*, 36(23), 14409-14431.
- Shah, P., & Agashe, S. (2016). Review of fractional PID controller. *Mechatronics*, 38, 29-41.
- 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.
- 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.
- Sumpunsri, S., & Puangdownreong, D. (2020). Multiobjective Lévy-flight firefly algorithm for optimal pida controller design. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 16(1), 173-187.
- Tabak, A. (2021a). A novel fractional order PID plus derivative ($PI\lambda D\mu D\mu_2$) controller for AVR system using equilibrium optimizer. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 40(3), 722-743.
- Tabak, A. (2021b). Maiden application of fractional order PID plus second order derivative controller in automatic voltage regulator. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(12), e13211.
- Tepljakov, A., Alagoz, B. B., Yeroglu, C., Gonzalez, E., HosseinNia, S. H., & Petlenkov, E. (2018). FOPID Controllers and Their Industrial Applications: A Survey of Recent Results 1. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 25-30.
- Vinagre, B. M., Podlubny, I., Dorcak, L., & Feliu, V. (2000). On fractional PID controllers: a frequency domain approach. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(4), 51-56.
- Xiao, J. Z., Li, X. Y., Wang, H. R., & Ma, L. (2010). Robot force position control without impact: Method and application. *2010 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 965-968. Qingdao.
- Xu, Y., Hollerbach, J. M., & Ma, D. (1995). A Nonlinear PD Controller for Force and Contact Transient Control. *IEEE Control Systems*, 15(1), 15-21.
- Xue, D., Chen, Y., Atherton, D. P., & Gu, G. (2009). Linear Feedback Control—Analysis and Design with Matlab. *IEEE Control Systems*, 29(1), 128-129.

- Xue, D., Zhao, C., & Chen, Y. (2006). A Modified Approximation Method of Fractional Order System. *2006 international conference on mechatronics and automation*, s. 1043-1048. Luoyang.
- Zafer Bingül. (2005). *Matlab ve Simulink''le Modelleme/Kontrol I*. Birsen Yayınevi.
- Zeng, G. Q., Chen, J., Dai, Y. X., Li, L. M., Zheng, C. W., & Chen, M. R. (2015). Design of fractional order PID controller for automatic regulator voltage system based on multi-objective extremal optimization. *Neurocomputing*, 160, 173-184.
- Zhou, G., Li, J., Tang, Z., Luo, Q., & Zhou, Y. (2020). An improved spotted hyena optimizer for PID parameters in an AVR system. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 17(4), 3767-3783.



7. EKLER

Ek 1: Tablo 1’de yer alan amaç fonksiyonları denklemleri

$$F1 = (1 - \Delta V^{-\beta})(P_m + E_{ss}) + \Delta V^{-\beta}(T_s - T_r)$$

$$F2 = (1 - e^{-\gamma})(M_p + E_{ss}) + e^{-\gamma}(T_{set} + T_r)$$

$$F3 = (1 - e^{-\beta})\left(\frac{OS}{\alpha} + E_{ss}\right) + e^{-\beta}(t_s - t_r)$$

$$F4 = w_1 \int t|e(t)|dt + w_2 OS + w_3 |E_{ss}| + w_4 t_s$$

$$F5 = w_1 \int_0^{t_f} t|e_v(t)|dt + w_2(t_s + t_r) + w_3 |E_{ss}| + \frac{w_4}{\sum_{i=1}^n \zeta_i}$$

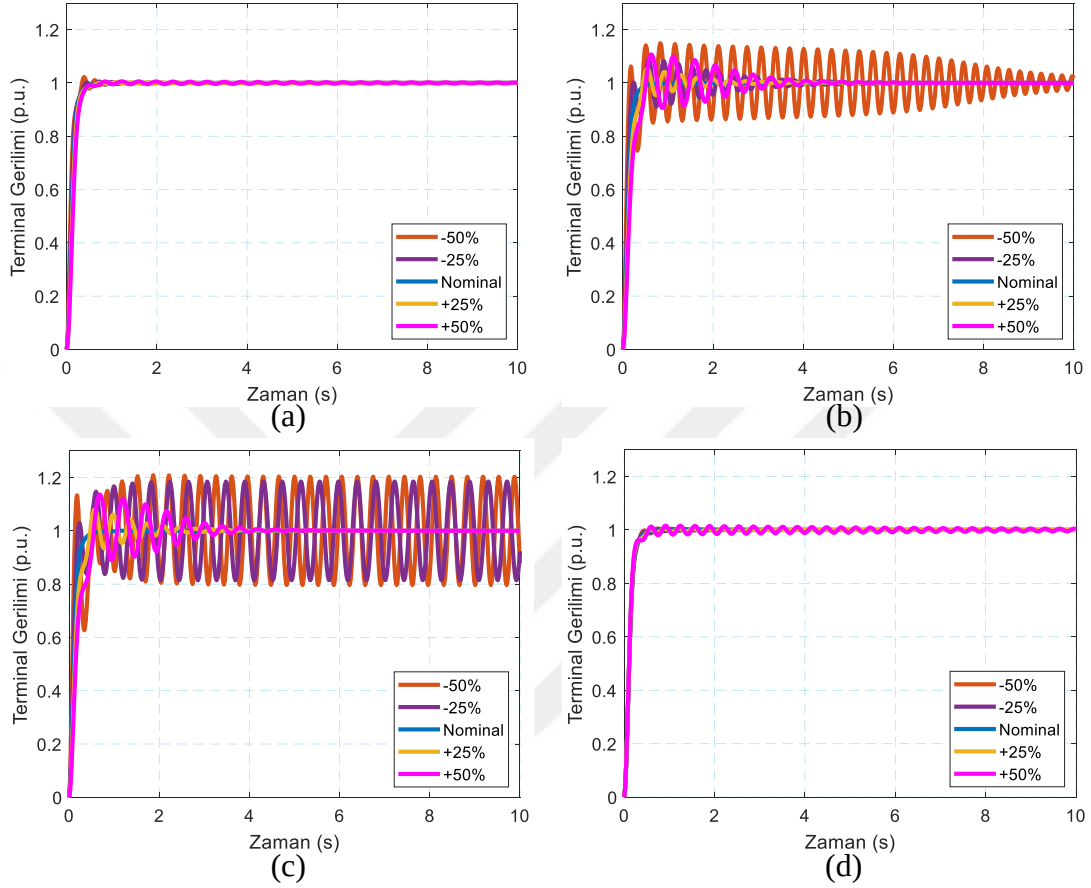
$$F6 = \alpha(ITAE) + \beta(peak - 1)$$

$$F7 = (w_1 M_p) + (w_2 t_s t_r)$$

$$F8 = (1 - e^{-\beta})\left(\frac{M_p}{\alpha} + E_{ss}\right) + e^{-\beta}(t_s + t_r)$$

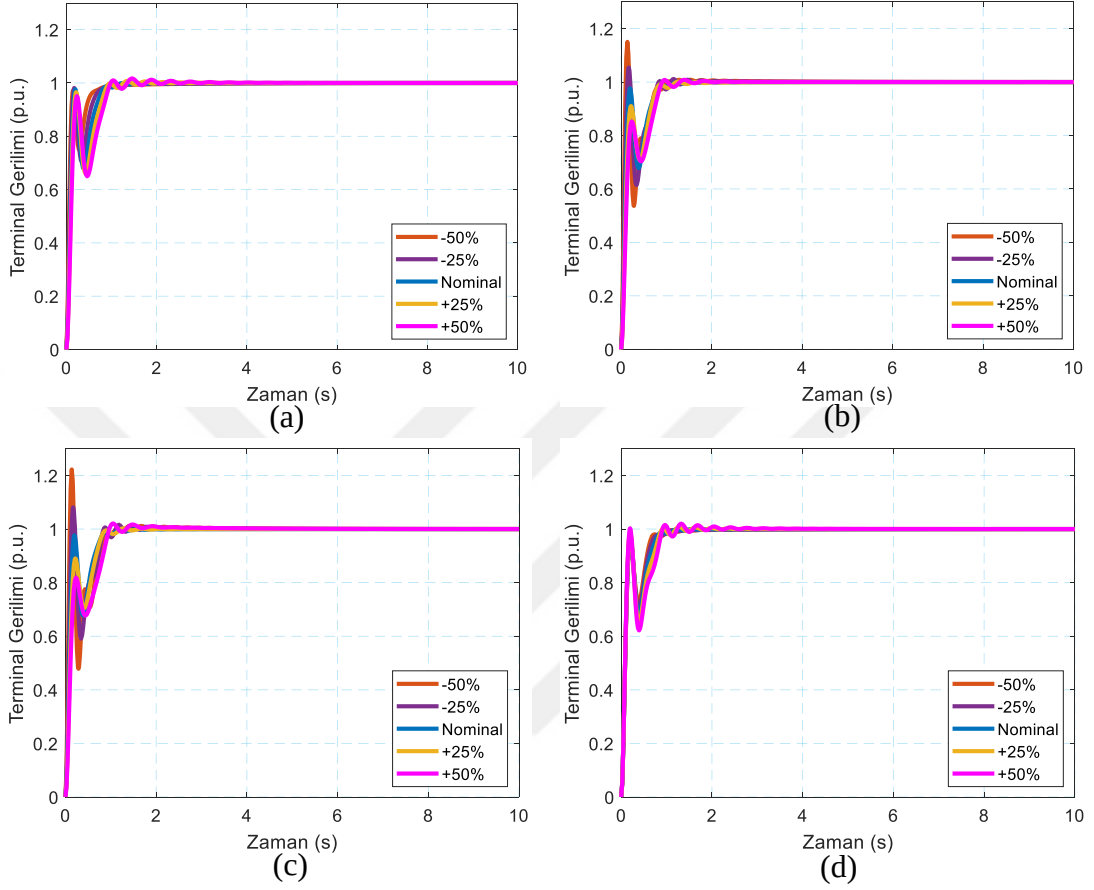
$$F9 = w_1(ITAE) + w_2(M_p) + w_3 |E_{ss}| + w_4 t_s$$

Ek 2: GPID/ITAE $t=10$ sn için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri.



şekil 22. GPID/ITAE $t=10$ s için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri

Ek 3: GPID/ZLG t=10 sn için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri.



Şekil 23. GPID/ZLG t=10 s için gürbüzlük analizi sonucu elde edilen parametre (a) τ_A , (b) τ_E , (c) τ_G ve (d) τ_S değişimlerinin eğrileri

ÖZGEÇMİŞ

Şeymanur BAŞLIK, Lise eğitimini 2016 yılında Urla Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2016-2017 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2021 yılında bu bölümden mezun olduktan sonra aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. Orta-iyi derece İngilizce bilmektedir.

Akyazı, Ö., Başlık, Ş., Khidirzade, K., & Çavdar, B. (2024). Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyelinin PVSyst ile Analizi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14(3), 1486-1502.

Başlık, Ş., Sesli, E., & Akyazı, Ö. (2024). Effect of Derivative Filter Usage on a PID Controller Optimized via Pathfinder Algorithm: An Example of a DC-MSCS. Politeknik Dergisi, 27(1), 185-196. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1074261>

Çavdar, B., Dinçer K., Başlık, Ş., Şahin, E., & Nuroğlu, F.M. (2023). A novel objective function design and detailed analysis for the AVR-LFC system. Sādhanā. 48(4), 229. <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02292-z>

Başlık, Ş., Çavdar, B., Öztürk, Ö., Aslanov, T., & Akyazı, Ö., (2023). AVR Sistemi için ARO Tabanlı PID ve FOPID Denetleyici Tasarımı. 24. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (pp.158-165). İstanbul, Turkey

Aslanov, T., Çavdar, B., Öztürk, Ö., Başlık, Ş., & Akyazı, Ö., (2023). İki Alanlı Termal Güç Sisteminde AHA Tabanlı PID, FOPID ve FOPI-FOPD Denetleyicilerin Siber Saldırı Analizi. 24. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (pp. 166-173). İstanbul, Turkey