

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OPTİMUM AVR-LFC SİSTEMİ TASARIMI İÇİN FDB TABANLI
YÖNLENDİRME MEKANİZMASI İLE GELİŞTİRİLMİŞ ZEBRA
OPTİMİZASYONU ALGORİTMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer ÖZTÜRK

HAZİRAN 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**OPTİMUM AVR-LFC SİSTEMİ TASARIMI İÇİN FDB TABANLI
YÖNLENDİRME MEKANİZMASI İLE GELİŞTİRİLMİŞ ZEBRA
OPTİMİZASYONU ALGORİTMASI**

Ömer ÖZTÜRK

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06/ 06 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 28/ 06 / 2024

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKYAZI

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Optimum AVR-LFC Sistemi Tasarımı için FDB Tabanlı Yönlendirme Mekanizması ile Geliştirilmiş Zebra Optimizasyonu Algoritması” 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’na teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, eğitim ve öğretim hayatımda katkıları olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması sürecinde de hiçbir yardımlarını esirgemeyen hocam Arş. Gör. Bora ÇAVDAR’a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri bana sürekli destek olan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarımda bilgi ve tecrübelerini sunan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde büyük katkı sağlayan annem Emine ÖZTÜRK, babam Ünal ÖZTÜRK’e, ablam Cansu KAYA ve değerli arkadaşım Selin CANKİ’ye teşekkür ederim. Minnettarlığımı sunuyorum.

Bu tez çalışmasının gelecekteki çalışmalara katkıda bulunmasını umuyorum.

Ömer ÖZTÜRK
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Optimum AVR-LFC Sistemi Tasarımı için FDB Tabanlı Yönlendirme Mekanizması ile Geliştirilmiş Zebra Optimizasyonu Algoritması” 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. 28/06/2024

Ömer ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Literatür Taraması	2
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	8
2.1. Zebra Optimizasyonu Algoritması	8
2.1.1. Aşama 1: Yiyecek Arama	9
2.1.2. Aşama 2: Avcılara Karşı Oluşturulan Savunma Mekanizması.....	9
2.2. Geliştirme Yöntemi (FDB).....	10
2.3. Algoritma Geliştirmesi (FDB-ZOA).....	12
2.4. Tezde Kullanılan Algoritmalar.....	16
2.4.1. Vahşi At Optimizasyonu (WHO).....	16
2.4.2. Stokastik Boya Optimize Edici (SPO)	16
2.4.3. Balina Optimizasyon Algoritması (WOA).....	16
2.4.4. Diferansiyel Evrim (DE).....	17
2.4.5. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)	17
2.4.6. Gri Kurt Optimizasyonu (GWO)	17
2.4.7. İstilacı Yabancı Ot Optimizasyonu (IWO)	17
2.4.8. Çiçek Poleni Algoritması (FPA)	18
2.4.9. Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon (AEO)	18
2.4.10. Ateş Böceği Algoritması (FPA).....	18
2.5. Matematiksel Yöntemler	19
2.5.1. CEC 2017	20
2.5.2. CEC 2020	21

2.6. Yük Frekans Kontrolü (LFC)	22
2.6.1. Yük Frekans Modeli.....	25
2.7. Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR).....	27
2.8. AVR-LFC Sistem Modeli	29
2.9. Denetleyici Tasarımı	32
2.9.1. PID Denetleyici.....	32
2.9.2. Kesir Dereceli PID Denetleyici.....	33
2.9.3. Kesir Dereceli PI-PD Denetleyici	34
2.10. Amaç Fonksiyonu Tanıtımı.....	35
2.11. Kontrol Sistemi Değerlendirme Yöntemleri	36
2.11.1. Zaman Bölge Analizi	36
2.11.2. Gürbüzlük Analizi.....	36
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
3.1. Algoritmaların Karşılaştırılması.....	37
3.2. Ortalama ve Standart Sapma	39
3.3. Kutu Grafiği	42
3.4. Yakınsama Eğrileri.....	45
3.5. Kontrol Sistemleri ve Probleminin Sonuçları	48
3.5.1. Zaman-Bölge Analizi	48
3.5.2. Gürbüzlük Analizi.....	64
4. SONUÇLAR.....	83
5. ÖNERİLER.....	84
6. KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

OPTİMUM AVR-LFC SİSTEMİ TASARIMI İÇİN FDB TABANLI YÖNLENDİRME
MEKANİZMASI İLE GELİŞTİRİLMİŞ ZEBRA OPTİMİZASYONU ALGORİTMASI

Ömer ÖZTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKYAZI
2024, 107 Sayfa

Bu tez çalışmasında, mühendislik problemlerinin çözümüne yönelik geliştirilmiş bir zebra optimizasyonu algoritması (ZOA) sunulmaktadır. Önerilen algoritma, Uygunluk-Mesafe Dengesi (FDB) adı verilen bir seçim yöntemi kullanılmaktadır. Bu geliştirilmiş FDB-ZOA algoritması, CEC17 ve CEC20 benchmark problemlerinde üç farklı boyutta arama uzayları için test edilmiş ve doğrulanmıştır. FDB-ZOA algoritması sonuçları, ZOA algoritması dahil olmak üzere 11 güncel ve güçlü algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Friedman test sonuçlarına göre, FDB-ZOA algoritması birinci sırada yer alırken, orijinal ZOA algoritması onuncu sırada yer almıştır. Bu, FDB seçim yöntemi ile geliştirilen algoritmanın performansını artırdığını göstermektedir.

Ayrıca, geliştirilmiş algoritma, entegre edilmiş otomatik gerilim regülatörü (AVR) ve yük frekans kontrolü (LFC) mühendislik problemini çözmek için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen algoritmanın bu tür mühendislik problemlerini çözmede etkili olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: AVR, LFC, FDB, Zebra Optimizasyonu Algoritması, IAE, P_{obj}

Master Thesis

SUMMARY

ZEBRA OPTIMIZATION ALGORITHM DEVELOPED WITH FDB-BASED GUIDANCE MECHANISM FOR OPTIMUM AVR-LFC SYSTEM DESIGN

Ömer ÖZTÜRK

Karadeniz Technical University
Institute of Science
The Graduate School of Energy Systems Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Ömür AKYAZI
2024, 107 Pages

In this thesis, a zebra optimization algorithm (ZOA) for solving engineering problems is presented. The proposed algorithm uses a selection method called Fitness-Distance Balance (FDB). This developed FDB-ZOA algorithm is tested and validated on the CEC17 and CEC20 benchmark problems for search spaces of three different dimensions. The results of the FDB-ZOA algorithm are compared with 11 current and powerful algorithms, including the ZOA algorithm. According to the Friedman test results, the FDB-ZOA algorithm ranked first, while the original ZOA algorithm ranked tenth. This shows that the FDB selection method improves the performance of the algorithm.

Furthermore, the developed algorithm is used to solve the engineering problem of combined automatic voltage regulator (AVR) and load frequency control (LFC). The obtained results show that the developed algorithm is effective in solving such engineering problems.

Key Words: AVR, LFC, FDB, Zebra Optimization Algorithm, IAE, P_{obj}

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. FDB-ZOA akış diyagramı	15
Şekil 2. Birincil kontrol çevrimi için frekans-güç grafiği	23
Şekil 3. Birincil ve ikincil kontrol çevrimi için frekans-güç grafiği	24
Şekil 4. Generatör güç sistemi modeli.....	25
Şekil 5. Türbin blok diyagramı.....	26
Şekil 6. Regülatör blok diyagramı.....	26
Şekil 7. Atalet ve yük blok diyagramı	27
Şekil 8. AVR sistemi blok diyagramı.....	28
Şekil 9. 1 bölge AVR-LFC sistemi blok diyagramı	30
Şekil 10. AVR-LFC sisteminin kontrolsüz birim basamak cevabı	31
Şekil 11. PID denetleyici blok diyagramı.....	32
Şekil 12. FOPID denetleyici blok diyagramı.....	34
Şekil 13. FOPI-FOPD denetleyici blok diyagramı.....	34
Şekil 14. CEC17 benchmark problemleri için kutu grafiği çizimleri.....	43
Şekil 15. CEC20 benchmark problemleri için kutu grafiği çizimleri.....	44
Şekil 16. CEC17 benchmark problemleri için yakınsama eğrileri çizimleri.....	46
Şekil 17. CEC20 benchmark problemleri için yakınsama eğrileri çizimleri.....	47
Şekil 18. PID denetleyicide IAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	53
Şekil 19. FOPID denetleyicide IAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	53
Şekil 20. FOPI-FOPD denetleyicide IAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	54
Şekil 21. PID denetleyicide ISE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	55
Şekil 22. FOPID denetleyicide ISE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	55
Şekil 23. FOPI-FOPD denetleyicide ISE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	56
Şekil 24. PID denetleyicide ITAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	56
Şekil 25. FOPID denetleyicide ITAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	57
Şekil 26. FOPI-FOPD denetleyicide ITAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	57

Şekil 27. PID denetleyicide ITSE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	58
Şekil 28. FOPID denetleyicide ITSE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	58
Şekil 29. FOPI-FOPD denetleyicide ITSE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	58
Şekil 30. PID denetleyicide $Pobj$ amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	59
Şekil 31. FOPID denetleyicide $Pobj$ amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	59
Şekil 32. FOPI-FOPD denetleyicide $Pobj$ amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	60
Şekil 33. FDB-ZOA algoritmasının PID denetleyicide 5 farklı amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	61
Şekil 34. FDB-ZOA algoritmasının FOPID denetleyicide 5 farklı amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	61
Şekil 35. FDB-ZOA algoritmasının FOPI-FOPD denetleyicide 5 farklı amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları	62
Şekil 36. LFC için (a) τg (b) τt ve (c)R parametrelerin değişimine göre frekans sapması (IAE-PID)	65
Şekil 37. LFC için (a) τg (b) τt ve (c)R parametrelerin değişimine göre frekans sapması (IAE-FOPID)	66
Şekil 38. LFC için (a) τg (b) τt ve (c)R parametrelerin değişimine göre frekans sapması (IAE-FOPI-FOPD).....	67
Şekil 39. AVR için (a) τA (b) τE (c) τG ve (d) τS parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi (IAE-PID)	68
Şekil 40. AVR için (a) τA (b) τE (c) τG ve (d) τS parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi (IAE-FOPID)	69
Şekil 41. AVR için (a) τA (b) τE (c) τG ve (d) τS parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi (IAE-FOPI-FOPD)	70
Şekil 42. LFC için (a) τg (b) τt ve (c)R parametrelerin değişimine göre frekans sapması ($Pobj$ -PID).....	71
Şekil 43. LFC için (a) τg (b) τt ve (c)R parametrelerin değişimine göre frekans sapması ($Pobj$ -FOPID).....	72
Şekil 44. LFC için (a) τg (b) τt ve (c)R parametrelerin değişimine göre frekans sapması ($Pobj$ -FOPI-FOPD).....	73
Şekil 45. AVR için (a) τA (b) τE (c) τG ve (d) τS parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi ($Pobj$ -PID).....	74
Şekil 46. AVR için (a) τA (b) τE (c) τG ve (d) τS parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi ($Pobj$ -FOPID)	75

Şekil 47. AVR için (a) τ_A (b) τ_E (c) τ_G ve (d) τ_S parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi (P_{obj} -FOPI-FOPD).....	76
---	----



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Son yıllarda tanıtılan AVR-LFC çalışmaları.....	6
Tablo 2. ZOA’ da FDB uygulanan bölgeler	14
Tablo 3. CEC17 benchmark problem paketi	20
Tablo 4. CEC20 benchmark problem paketi	22
Tablo 5. LFC sistem parametreleri	27
Tablo 6. AVR değeri aralıkları ve seçilen değeri	29
Tablo 7. Kontrolsüz AVR-LFC sisteminin geçici durum yanıt sonuçları.....	31
Tablo 8. FDB-ZOA ve rakip meta-sezgisel algoritmalar için Friedman skorları.....	37
Tablo 9. FDB-ZOA ve rakip meta-sezgisel algoritmalar için Wilcoxon sonuçları.....	38
Tablo 10. CEC20 benchmark problemleri için ortalama ve standart sapma	39
Tablo 11. CEC17 benchmark problemleri için ortalama ve standart sapma	40
Tablo 12. Denetleyiciler için alt ve üst sınır limitleri.....	48
Tablo 13. PID denetleyicisi için parametre değeri	49
Tablo 14. FOPID denetleyicisi için parametre değeri	49
Tablo 15. FOPI-FOPD denetleyicisi için parametre değeri	51
Tablo 16. FOPID denetleyicisi için zaman bölge analizi sonuçları	62
Tablo 17. FOPI-FOPD denetleyicisi için zaman bölge analizi sonuçları.....	63
Tablo 18. PID denetleyicisi için zaman bölge analizi sonuçları.....	64
Tablo 19. IAE-FOPID’li sistem için tüm gürbüzlük sonuçları	77
Tablo 20. <i>Pobj</i> -FOPID’li için tüm gürbüzlük sonuçları	78
Tablo 21. IAE-PID’li sistem için tüm gürbüzlük sonuçları.....	79
Tablo 22. <i>Pobj</i> -PID’li sistem için tüm gürbüzlük sonuçları	80
Tablo 23. IAE-FOPI-FOPD’li sistem için tüm gürbüzlük sonuçları.....	81
Tablo 24. <i>Pobj</i> -FOPI-FOPD’li sistem için tüm gürbüzlük sonuçları	82

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

e	: Hata
ω	: Birim basamak
out	: Maksimum sapma
τ_A	: Yükselteç zaman sabiti
τ_E	: Uyarıcı zaman sabiti
τ_G	: Generatör zaman sabiti
τ_S	: Sensör zaman sabiti
K_A	: Yükselteç kazancı
K_E	: Uyarıcı kazancı
K_G	: Generatör kazancı
K_S	: Sensör kazancı
T_m	: Mekanik moment
T_e	: Elektriksel moment
τ_t	: Zaman sabiti
τ_g	: Regülatör zaman sabiti
R	: Hız regülasyon sabiti
ΔP_L	: Frekanstan bağımsız yük değişimi
$\Delta\omega$	: Yük değişimi
D	: Yük sönüm sabiti
H	: Atalet
K_p	: Oransal kazanç sabiti
K_i	: İntegral kazanç sabiti
K_d	: Türevsel kazanç sabiti
λ	: Lambda
μ	: Mü
N	: Kutup çifti sayısı
ω_z	: Sıfır
ω_p	: Kutup
ω_h	: Üst frekans bandı

ω_b	: Alt frekans bandı
d	: Problem boyutu
n	: Popülasyon birey sayısı
p_i	: i. çözüm adayı
p_{best}	: En iyi çözüm adayı
S_p	: Skor değeri vektörü
IAE	: Mutlak hatanın toplamı
ISE	: Hata karelerin toplamı
$ITSE$	: Zaman ağırlıklı hata karelerin toplamı
$ITAE$	: Zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı
P_{obj}	: Önerilen amaç fonksiyonu
FDB	: Uyumlu-Mesafe Dengesi
ZOA	: Zebra optimizasyonu algoritması
WHO	: Vahşi at optimizasyonu
SPO	: Stokastik boya optimize edici
DE	: Diferansiyel evrim
PSO	: Parçacık sürüşü optimizasyonu
GWO	: Gri kurt optimizasyonu
IWO	: İstilacı yabancı ot optimizasyonu
FPA	: Çiçek poleni algoritması
AEO	: Yapay ekosistem tabanlı optimizasyon
IEE	: Evrimsel hesaplama kongresi
AVR	: Otomatik gerilim regülatörü
LFC	: Yük frekans kontrolü
FPA	: Ateş böceği algoritması

1. GENEL BİLGİLER

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, elektrik ihtiyacı hem günlük yaşamda ve hem de endüstriyel uygulamalarda ülkelerdeki talebin sürekli artan bir gereklilik haline gelmiştir (Naga Sai Kalyan & Sambasiva Rao, 2022). Bu durum, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki farkın sürekli olarak genişlemesine yol açar (Castillo et al., 2022). Elektrik güç sisteminin dayanıklı kalabilmesi için üretim ve tüketim arasındaki denge sağlanmalıdır (Sekhar & Dahiya, 2023).

Elektrik enerjisi, tüketicilerin taleplerine yanıt olarak güç sistemleri tarafından sağlanır. Bu sistemlerin ana görevi, kabul edilebilir gerilim ve frekans aralığında, sorunsuz bir enerji üretmek, iletmek ve dağıtmaktır (Oğuzkağan Alıç, 2014). Bu görev, enterkonnekte bir sistem içinde yerine getirilir. Enterkonnekte güç sistemleri, enerjiyi kesintisiz bir şekilde sağlamak için bir ülkedeki tüm üretim santralleri ve şebekeleri birleştirir (Oğuzkağan Alıç, 2014). Enterkonnekte sistemlerde faaliyet gösteren güç sistemleri, esas olarak birbirine bağlı güç üretim tesislerinden ve iletim ve dağıtım şebekelerinden oluşur.

Şebekelerin en önemli hedefi, kesintisiz ve kaliteli elektrik enerjisi sağlamaktır. Senkron generatörler, şebekenin sürekli ve yüksek kaliteli elektrik enerjisi dağıtımı için gereklidir (Cavdar, Dincer, et al., 2023). Senkron generatörlerin en büyük problemi, alan frekansı ile terminal geriliminin aynı anda kontrol edilememesi durumudur (Hossam-Eldin et al., 2023). Frekans veya gerilim bozulduğunda, güç sistemleri elemanlarının ömrü ve işlevselliği büyük ölçüde etkilenir. Karmaşık güç sistemlerinde, sistem gerilimini ve frekansını belirli sınırlar içinde tutmak için kontrol cihazları konulur. Bu cihazlar, yük kesintilerine karşı sistemi düzenlemeye yardımcı olur. Üretim santralleri, bu durumu yönetmek için sürekli olarak iki işletme döngüsü ile donatılır. Bunlardan biri, frekansta oluşan dalgalanmaları sönmülemeyi sağlayan yük frekans kontrolüdür (LFC). Diğeri ise sistemin terminal geriliminden sorumlu olan otomatik gerilim regülatörüdür (AVR) (Kalyan & Rao, 2021). Entegre AVR-LFC sistemleri, bölgelerin kendi içinde ve aralarında güç üretim sistemlerinin performansını, güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamak için gereklidir. AVR ve LFC döngüleri arasındaki belirli etkileşimler, dinamik bozulmalara tepki olarak ortaya çıkar (Saadat, 1999). Bunun nedeni, AVR sistemlerinin üretilen

gerilimin büyüklüğüne doğrudan etkisi olmasıdır (Bingul & Karahan, 2018). Bu etki, sistem frekansında kısa süreli bir değişikliğe neden olabilir. LFC döngüsünde ise bu değişimi düzeltmeye çalışırken frekans değerini sabit tutmaya çalışır. Ancak, bu tür etkileşimlerin sistem kararlılığını etkileyebileceği ve uygun bir kontrol stratejisi olmadan istenmeyen sonuçlara yol açabileceği dikkate alınmalıdır.

Şebekede aktif güç dengesizliği olduğunda, sistem frekansı etkilenir. Şebekeden aktif güç talebi artarsa, ilk olarak senkron generatörün rotorunda depolanan kinetik enerji, şebekeye elektrik enerjisi sağlar. Bu durum rotorun yavaşlamasına ve frekansın düşmesine neden olur. Aktif güç talebi azaldığında ise tam tersi bir durum meydana gelir. Rotorun durumuna bağlı olarak, regülatörler devreye girer. Eğer frekans, referans değer üzerine çıkarsa veya altına düşerse, ikincil kontrol çevrimi devreye girer (Cavdar, Dincer, et al., 2023).

Şebekede reaktif güç dengesizliği meydana geldiğinde, terminal gerilimi etkilenir. Bu durumda, AVR tarafından uyarma akımı, terminal geriliminin referans seviyelere çekilmesi için ayarlanır (Cavdar, Dincer, et al., 2023).

Yukarıdaki senaryoların sonucunda, aktif gücün frekansla ve reaktif gücün ise terminal gerilimle bağlantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, AVR ve LFC bölümleri literatürde ayrı ayrı değerlendirilir. Ancak, entegre AVR-LFC sistemleri son yıllarda popülerlik kazanmıştır. Tezin bir sonraki aşamasında, literatür taraması yapılmış ve ilgili çalışmalar incelenmiştir.

1.1. Literatür Taraması

Literatür taramasında, AVR-LFC sistemlerinde yapısal değişiklikler (tek, iki ve üç bölgeli vb.) ve özellikle denetleyici ve algoritmaların karşılaştırılması gibi çalışmaların öne çıktığı görülmüştür. Algoritma ve denetleyicinin performansını değerlendirmek için hata tabanlı ‘Mutlak Hatanın Toplamı’(IAE), ‘Hata Karelerin Toplamı’ (ISE), ‘Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı’ (ITAE) ve ‘Zaman Ağırlıklı Hata Karelerinin Toplamı’ (ITSE) gibi amaç fonksiyonları yaygın olarak kullanılmıştır (Lal & Barisal, 2019).

(Ali et al., 2023) tarafından yapılan çalışmada, dört bölgeli LFC-AVR sistemi gradyan tabanlı optimizasyon (GBO) kullanılarak sistemde test edilmiştir. Çalışmada, TID, I-PD ve I-P denetleyicileriyle elde edilen parametreleri test edebilmek için ITSE amaç fonksiyonunu

kullanılmıştır. Kontrol performansı, zaman bölgesi ve gürbüzlük analizleri ile değerlendirilmiştir.

Literatürdeki (Ali, Malik, Hameed, et al., 2022) çalışmada, 2022’de, LFC-AVR sistemi kullanarak, yenilenmiş parçacık sürücü optimizasyonu (MPSO), Archimedes optimizasyon algoritması (AOA) ve öğrenme performansına dayalı davranış optimizasyonunu (LPBO) karşılaştırılmıştır. Bu çalışma iki ve üç bölgeli olarak yapılmıştır. Denetleyici olarak PI-PD seçilmiştir. Parametreleri test edebilmek için ITSE, IAE ve ITAE amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Kontrol performansı, zaman bölgesi ve gürbüzlük analizleri ile değerlendirilmiştir.

Literatürdeki başka bir çalışmada, iki bölgeli LFC-AVR sistemi için önerilen doktor ve hasta optimizasyonunu (DPO) kullanılarak önerilen yeni hızlandırıcı PID (PIDA) denetleyici için parametreler belirlenmiştir (Fayek & Rusu, 2022). Bu çalışmada önerilen PIDA denetleyicisi; FOPID, doğrusal olmayan PID (NPID) ve PID denetleyicileri ile karşılaştırılmış ve çok daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. DPO ise parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), çekirge optimizasyonu algoritması (GOA) ve sosyo evrim ve öğrenme optimizasyonu (SELO) ile karşılaştırılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak ITAE ve IAE kullanılmıştır.

(Naga Sai Kalyan et al., 2022) çalışmada, yapay elektrik alan algoritması (HAEFA) tabanlı bir bulanık PID sistemi önerilmiştir. Bu bulanık PID denetleyicisi, PI ve PID denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, ITAE amaç fonksiyonunu minimize tutarak başarılı sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

2019 yılında yapılan çalışmada, tek ve iki bölgeli LFC-AVR sistemi için güve alevi optimizasyonu (MFO) tabanlı FOPID denetleyici tasarlandı (Lal & Barisal, 2019). Algoritmanın başarı seviyesini vurgulamak için gri kurt optimizasyonu (GWO), diferansiyel evrim (DE) ve PSO algoritmaları ile karşılaştırıldı. Denetleyicinin üstünlüğü ve verimliliği, diğer yöntemlerle optimize edilmiş PID denetleyiciyle karşılaştırma yoluyla test edildi.

Literatürde başka bir çalışmada, daha önce LFC-AVR sistemine uygulanmamış olan karahindiba optimizasyonu (DO) önerilmiştir (Ali, Malik, Daraz, et al., 2022). Bu algoritmanın performansını test edebilmek için literatürdeki HAEFA, AOA, LPBO ve MPSO rakip algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. İki ve üç bölgeli sistemler tercih edilmiş ve literatürdeki IAE, ITAE, ISE, ITSE gibi amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre her iki bölgede de algoritmanın rakiplerinden daha üstün olduğu gözlemlenmiştir.

2019 yılındaki yapılan çalışmada, ateş böceği algoritması tabanlı (FA) PID denetleyicisi önerilmiştir (Sahani et al., 2019). Bu algoritma, iki bölgeli LFC-AVR sistemi için kullanılmıştır. Karşılaştırma için, rakip olarak PSO algoritması seçilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen algoritma güç sistemini başarıyla stabilize etmiştir.

(Ramoji & Saikia, 2022) çalışmada, Harris kartalı optimizasyonu (HHO) kullanılarak eğimli- integral türev denetleyicisi (TID), kesir dereceli TID (FOTID) ve bulanık FOTID (FFOTID) denetleyicileri tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçları, zaman bölgesi, öz değer ve yük değişim analizleri ile test edilmiştir.

2021 yılındaki yapılan bir çalışmada, iki bölgeli LFC-AVR güç sistemi için doğrusal olmayan eşik kabulü algoritması (NLTA) ile çok amaçlı doğrusal olmayan eşik kabulü algoritması (MONTLA) önerilmiştir (Nahas et al., 2021). Denetleyici olarak PID seçilmiştir. Çalışmanın özgünlüğü olan bu algoritmaların kullanışlılığı, bağlantı hattı değişiklikleri ve referans çıkış gerilim seviyelerindeki dinamik değişikliklere karşı verdiği zorlayıcı dinamik durumlar kullanılarak test edilmiştir.

Literatürde, LFC-AVR sistemleri için önerilen hibrit algoritmalar da önerilmiştir. 2021 yılında yapılan bir çalışmada, çiçek tozlaşma algoritması (FPA) ve yol bulucu algoritması (PFA) birleşiminden oluşan hibrit bir algoritma (hFPAPFA) önerilmiştir (Oladipo et al., 2021). Hibrit algoritma için rakip olarak DE, PSO, MFO, öğretme ve öğrenme tabanlı algoritması (TLBO) ve FPA rakip algoritmaları seçilmiştir. Önerilen hFPAPFA tabanlı PIDA denetleyicisi, amaç fonksiyonunun en düşük değerini, yerleşme süresini ve tepe aşımını en iyi şekilde sağladığı için, bu çalışmada tercih edilmiştir ve rakip algoritmalara göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

(Kumar Sahoo et al., 2024) çalışmada, iki bölgeli enterkonnekte bir güç sisteminin LFC-AVR sistemlerinde kullanılan hızlı bulanık kısmi dereceli eğitim integral türev kontrolörü (HFF-FOTIDC) önerilmiştir. LFC-AVR sistemlerinde kullanılan bu denetleyici, kovaryans matrisi uyarlama evrim stratejisi tabanlı Aquila optimizasyonu (CMAESAO) ile belirlenmiştir. Bu algoritma Aquila optimizasyonu (AO) ile karşılaştırılmıştır.

Literatürdeki bir başka LFC-AVR çalışmasında, hibrit diferansiyel evrim ve yapay elektrik alanı (DE-AEFA) tabanlı PID denetleyici tasarımı önerilmiştir (Naga Sai Kalyan & Sambasiva Rao, 2022). Bu hibrit algoritma için rakip algoritma olarak DE ve AEFA algoritmaları seçilmiştir. Simülasyon sonuçları, hibrit algoritmanın rakip algoritmalara göre oldukça verimli ve geleneksel analizlere karşı başarılı olduğunu göstermiştir.

2022 yılındaki çalışmada, iki bölgeli LFC-AVR sistem için martı optimizasyon algoritması (SOA) önerilmiştir (Goud et al., 2022). Sistemin kararlılığını arttırmak amacıyla PID denetleyicisi kullanılmıştır. Parametrelerin performansı, zaman bölge analizi ile değerlendirilmiştir.

(Prakash & Parida, 2020) çalışmada, literatürde oldukça yaygın olarak kullanılan sinüs-kosinüs algoritması (SCA) ile filtreli PID denetleyicisi tasarlandı. Bu denetleyici, PI denetleyicisi ile karşılaştırıldı. Denetleyici performansı, gürbüzlük ve yük değişimi analizleri ile test edildi.

Literatürdeki başka bir çalışmada, üç bölgeli LFC-AVR sistemi için HHO algoritması tabanlı model tahminli kontrolör (MPC) kullanılmıştır (Kumar et al., 2023). Önerilen MPC-HHO algoritmasının performansını incelemek amacıyla geleneksel MPC, PID, FOPID ve bulanık PID denetleyicileri karşılaştırılmıştır. Performans analizleri, zaman bölge ve yük değişimi analizleri ile test edilmiştir.

Literatürdeki (Hossam-Eldin et al., 2023) numaralı çalışmada, GBO tabanlı hassas ayarlanmış bulanık çift türevli PID (FPIDD²) denetleyicisi içeren LFC-AVR sistemi tasarlanmıştır. Bu önerilen denetleyici, GBO tabanlı ayarlı integral türev eğimli (ID-T) denetleyici ve FPID denetleyicileri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon verilerine göre, önerilen denetleyicinin sistemin dinamik tepkisinde yükselme ve yerleşme süreleri, maksimum ve minimum aşım değerleri ve ITAE amaç fonksiyonu bakımından rakip denetleyicilerine göre daha üstün performansa sergilediği görülmüştür.

Literatürdeki bir başka çalışmada, aritmetik optimizasyon algoritması tabanlı MPC (AOA-MPC) kullanılarak sistem analiz edilmiştir. Bu çalışmanın performansı, balina algoritması (WOA) ve PSO gibi literatürde sıklıkla kullanılan algoritmalarla karşılaştırılmıştır (Singh et al., 2023).

(Cavdar, Dincer, et al., 2023) çalışmada, AVR-LFC sistemi için yeni bir amaç fonksiyonu önerilmiştir (P_{obj}). Bu önerilen amaç fonksiyonu, literatürdeki ITSE, IAE, ISE ve ITAE amaç fonksiyonları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, mayıs sineği optimizasyonu (MA) tabanlı FOPID denetleyicisi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar P_{obj} amaç fonksiyonunun zaman bölge analizi ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda diğer amaç fonksiyonlara göre daha başarılı olduğunu göstermiştir. Literatürdeki AVR-LFC çalışmalarının bir özeti Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Son yıllarda tanıtılan AVR-LFC çalışmaları

Referans	Yıl	Algoritma	Denetleyici	Amaç Fonksiyonu	Bölge Sayısı	Analizler
(Ali et al., 2023)	2023	GBO	PID I-PD I-P	ITSE	4	Zaman Bölge Gürlüklük
(Ali, Malik, Hameed, et al., 2022)	2022	AOA MPSO LPBO	PI-PD	ITSE IAE ITAE	2 ve 3	Zaman Bölge Gürlüklük
(Fayek & Rusu, 2022)	2022	DPO PSO GOA SELO	PIDA NPID FOPID PID	ITAE IAE	2	Zaman Bölge
(Naga Sai Kalyan et al., 2022)	2022	HAEFA	Bulanık PID PI	ITAE	2	Zaman Bölge
(Lal & Barisal, 2019)	2019	MFO GWO DE PSO	FOPID PID	ISE ITSE ITAE IAE	1 ve 2	Zaman Bölge
(Ali, Malik, Daraz, et al., 2022)	2022	DO HAEFA AOA LPBO MPSO	PI-PD	ISE ITSE ITAE IAE	2 ve 3	Zaman bölge
(Sahani et al., 2019)	2019	FA PSO	PID	ISE	2	Zaman Bölge Öz değeri
(Ramoji & Saikia, 2022)	2022	HHO	FFOTID TID FOTID	ISE	3	Zaman Bölge Öz değeri Yük Değişim
(Nahas et al., 2021)	2021	MONLTA NLTA	PID	ITSE IAE	2	Zaman Bölge Yük Değişim
(Oladipo et al., 2021)	2021	hFPAPFA DE PSO TLBO FPA	PIDA	ITAE	1	Zaman Bölge Yük Değişim
(Kumar Sahoo et al., 2024)	2024	CMAESAO AO	HFF- FOTIDC	ITAE	2	Zaman Bölge Gürlüklük Yük Değişim

Tablo 1'in devamı

(Naga Sai Kalyan & Sambasi va Rao, 2022)	2022	DE-AEFA AEFA DE	PID	ISE	2	Zaman Bölge Gürlüzlük
(Goud et al., 2022)	2022	SOA DE-AEFA GWO	PID	ISE	2	Zaman Bölge
(Prakash & Parida, 2020)	2020	SCA	PIDF PI	ISE	2	Gürlüzlük Yük Değişim
(Kumar et al., 2023)	2021	HHO PSO SCA	MPC PID FOPID Bulanık PID	ISE	3	Zaman Bölge Yük Değişim
(Hossam-Eldin et al., 2023)	2022	GBO	FPIDD ² ID-T FPID	ITAE	2	Zaman Bölge Yük Değişim Gerilim Değişimi Gürlüzlük
(Singh et al., 2023)	2022	AOA WOA PSO	MPC	ISE	2	Zaman Bölge Yük Değişimi Kutup-sıfır
(Cavdar, Dincer, et al., 2023)	2023	MA	FOPID	P_{obj}	1	Zaman Bölge Yük Değişimi Gerilim Değişimi Gürlüzlük Frekansa Bağlı Yük
Önerilen	2024	FDB-ZOA ZOA	FOPID PID FOPI- FOPD	IAE ISE ITSE ITAE P_{obj}	1	Zaman Bölge Gürlüzlük

Tablo 1'de belirtildiği gibi, sistem için kullanılan amaç fonksiyonları, literatürde sıkça kullanılan performans indeksleridir. Amaç fonksiyonları sistemler için oldukça önemlidir çünkü sistem dinamiklerini doğrudan etkilerler. Bu nedenle sıkça kullanılan IAE, ITAE, ISE ve ITSE amaç fonksiyonlarına ek olarak farklı bir amaç fonksiyonu olan (P_{obj}) (Cavdar, Dincer, et al., 2023) tez çalışmasında kullanılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Zebra Optimizasyonu Algoritması

Zebra optimizasyon algoritması (ZOA), Trojovska ve arkadaşları tarafından 2022 yılında geliştirilmiştir (Trojovska et al., 2022). Bu algoritma, zebraların doğada hayatta kalma stratejilerinden esinlenerek tasarlanmıştır. Zebraların doğadaki sosyal yaşamına dayanarak iki önemli davranışı vardır : yemek arama ve avcılara karşı korunma stratejileri(Trojovska et al., 2022) .

Yemek arama sürecinde zebralar, öncü zebra ve yiyecekleri taşıyacak zebralar olarak iki gruba ayrılırlar. Bu şekilde, öncü zebra diğer zebralara rehberlik eder ve yiyecek arayışına başlar (Danell et al., 2006).

Zebralar, avcılara karşı hayatta kalma sürecinde genellikle zikzak şeklinde hareket ederek avcılardan kaçarlar. Bazı durumlarda ise, avcıları şaşırtmak için onlara karşı durur (Caro et al., 2014).

Her zebra üyesi için bir vektör oluşturulur. Bu vektörler, problemin değişken değerlerini temsil eder (Trojovska et al., 2022). Zebra popülasyonunu matris şeklinde temsil etmek için bu vektörler bir araya birleştirilir. ZOA algoritmasının popülasyon matrisi, Denklem 1’de verilmiştir.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}_{N \times m} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{i,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \dots & x_{Nj} & \dots & x_{N,m} \end{bmatrix}_{N \times m} \quad (1)$$

Denklem 1’de, X zebra popülasyonunu, X_i i. zebrayı, x_{ij} i. zebranın oluşturduğu j. problemin değerini, N popülasyondaki toplam zebra sayısını ve m ise karar değişkenlerinin sayısını temsil eder.

Popülasyondaki her bir zebra, optimizasyon probleminin çözümüne adaydır. Bu nedenle, amaç fonksiyonu, her bir zebranın ürettiği değerlere göre belirlenir. Amaç fonksiyonunun ürettiği değerler, Denklem 2’de bir vektör olarak verilmiştir.

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}_{N \times 1} = \begin{bmatrix} F(X_1) \\ \vdots \\ F(X_i) \\ \vdots \\ F(X_N) \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (2)$$

Burada, F amaç fonksiyonu vektörünü ve F_i ise i. zebranın oluşturduğu amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. ZOA algoritmasının üyelerini güncellemek için zebraların günlük yaşamlarında iki önemli davranışı olduğu belirtilmiştir. Bunlar;

- Yiyecek arama
 - Avcılara karşı oluşturulan savunma mekanizması
- şeklindedir. Bu iki durum için algoritma, iki aşamadan oluşmaktadır.

2.1.1. Aşama 1: Yiyecek Arama

ZOA'nın birinci aşamasında, zebra popülasyonunun en iyi üyesi öncü zebra olarak belirlenir. Geriye kalan üyeler ise arama uzayında yerleştirilir. Oluşturulan konumlar, güncellemek için Denklem 3 ve 4' teki matematiksel ifadeler kullanılarak güncellenir.

$$x_{ij}^{new,P1} = x_{ij} + r \cdot (PZ_j - I \cdot x_{ij}) \quad (3)$$

$$X_i = \begin{cases} X_{ij}^{new,P1}, & F_i^{new,P1} < F_i; \\ X_i, & else, \end{cases} \quad (4)$$

Burada; $X_{ij}^{new,P1}$ birinci aşamaya bağlı j. zebranın yeni konumunu, $x_{ij}^{new,P1}$ j. boyuttaki değerini, $F_i^{new,P1}$ amaç fonksiyonun değerini, PZ seçilmiş öncü zebrayı, PZ_j j. boyutunu, r [0,1] arasında seçilmiş olan rastgele değerini, I ise $I = round(1 + rand)$ matematiksel ifadesiyle hesaplanan, $rand$ değeri [0,1] arası seçilen rastgele sayıyı temsil etmektedir. Böylece $I \in \{1,2\}$ arasında değer almış olur. Eğer $I=2$ olursa zebra popülasyonunda çok fazla değişikliğe sebep olur.

2.1.2. Aşama 2: Avcılara Karşı Oluşturulan Savunma Mekanizması

ZOA'nın ikinci aşamasında, avcılara karşı oluşturulan savunma mekanizmasından yararlanılarak popülasyondaki zebraların konumu güncellenir. Zebraların avcıları genellikle

aslanlardır. Aslanlara karşı kaçarken, zebralar zikzak ve rastgele yana dönüş hareketleri yaparlar (Wilson et al., 2018). Çita, leopar ve vahşi köpekler gibi diğer yırtıcılara karşı aynı stratejileri uygulamazlar. Aslan dışındaki diğer saldırgan ve ufak boyutlu yırtıcılara karşı, yırtıcının kafasını karıştırarak onları korkutacak şekilde bir strateji izlerler (Caro et al., 2014). Bu durum, ZOA tasarımı için iki farklı senaryonun oluşmasına neden olur. Bu iki senaryo aşağıda belirtilmiştir;

- Aslan saldırılarına karşı zebralar kaçma stratejisini uygular
- Zebralar, diğer yırtıcılara karşı saldırgan bir strateji uygular

İlk stratejiye göre, zebralar aslanlardan kaçmak için bulundukları ortamı terk ederler. Bu strateji Denklem 5' te birinci strateji için S_1 matematiksel ifadesiyle verilmiştir. İkinci stratejiye göre ise, bir yırtıcı bir zebra saldırıldığında, popülasyondaki diğer zebralar yaralı arkadaşlarına doğru ilerler ve yırtıcıyı korkutacak bir savunma mekanizması oluşturur. Bu strateji Denklem 5'te ikinci strateji için S_2 matematiksel ifadesiyle verilmiştir.

Her iki denklemden çıkan sonuçlara göre zebraların konumu güncellenir. Eğer yeni konum en iyi amaç fonksiyon değerine ulaşırsa, bu yeni konum zebra için kabul edilir. Bu güncelleme koşulları Denklem 6' da hesaplanmaktadır.

$$x_{ij}^{new,P2} = \begin{cases} S_1: x_{ij} + R \cdot (2r - 1) \cdot (1 - \frac{t}{T} \cdot x_{ij}), & P_s < 0; \\ S_2: x_{ij} + r \cdot (AZ_j - I \cdot x_{ij}), & else, \end{cases} \quad (5)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{new,P2}, & F_i^{new,P2} < F_i; \\ X_i, & else, \end{cases} \quad (6)$$

Denklem 5 ve 6' da $X_i^{new,P2}$ ikinci aşamadaki i. zebranın yeni konumunu, $x_{ij}^{new,P2}$ j. boyuttaki değerini, $F_i^{new,P2}$ amaç fonksiyonunun değerini, t iterasyon sayısını, T maksimum iterasyon sayısını, R 0.01 değerine eşit olan sabit bir katsayıyı, P_s [0,1] arasında rastgele seçilen iki senaryodan birini seçme olasılığını, AZ saldırıya uğramış zebraı, AZ_j ise j. boyuttaki değerini temsil etmektedir.

2.2. Geliştirme Yöntemi (FDB)

Uygunluk-Mesafe Dengesi (FDB) seçim yöntemi, 2020 yılında Kahraman ve arkadaşları tarafından literatüre tanıtılan bir optimizasyon geliştirme yöntemidir. FDB yönteminin oluşturulmasının amacı meta-sezgisel algoritma (MSA) sürecinde en çok fayda

sağlayacak arama ajanını veya ajanlarını popülasyonda belirlemek ve kullanmaktır (Kahraman et al., 2020). Böylece, arama uzayının farklı alanlarını keşfeden varyasyon süreci sağlanır .

FDB seçim yönteminden bahsetmeden önce meta-sezgisel arama algoritmalarında kullanılan seçim yöntemlerini ele almak önemlidir. Bu yöntemler, aç gözlü, rastgele ve olasılıksal olmak üzere üç kategoriye ayrılır.

Aç gözlü seçim yöntemi doğadaki elitizm sisteminden ilham alır; popülasyondaki en güçlü bireyin seçildiği bir sistemdir. Bu durum, meta-sezgisel algoritmalarda bireylerin sahip oldukları uygunluk değerleri ile ifade edilir ve hemen hemen tüm meta-sezgisel arama algoritmalarında bulunur.

Rastgele seçim yöntemi, doğada sürekli gerçekleşen rastgelelikten ilham alır. Bu yöntemde, popülasyondan seçilen bireyler tamamen rastgele belirlenmektedir. Bu yaklaşım popülasyondaki çeşitliliği artırır ve çoğu meta-sezgisel arama algoritmasında bulunur.

Olasılıksal seçim yöntemi, aç gözlü ve rastgele seçim tekniklerinin bir kombinasyonudur. Popülasyondaki bireylerin seçilme olasılıkları, uygunluk değerlerine göre hesaplanır. Bu, en yüksek uygunluk değerine sahip bireyin seçilme ihtimalinin çok yüksek olduğu anlamına gelir. Olasılıksal seçimde, rulet tekerleği ve turnuva yöntemleri sıklıkla kullanılır ve bu yöntem bazı meta-sezgisel arama algoritmalarında kullanılır.

FDB seçim yöntemi doğadaki davranışları daha faydalı şekilde taklit edebilmek amacıyla geliştirilen bir metottur. Meta-sezgisel arama algoritmalarında, keşif ve sömürü aşamasında birden çok çözüm adayı atanmaktadır (Kahraman et al., 2020). Bu çözüm adaylarından bazıları, rastgele ve aç gözlü yöntemlerle belirlenen popülasyon çözüm adaylarını temsil etmektedir.

Buna duruma göre, çözüm adayının güncel konumunu belirlemek adına popülasyondaki en iyi adayın seçilmesi, keşif ve sömürü görevlerini daha etkili bir şekilde gerçekleştirebilir. Ancak, popülasyondan rastgele seçilen bir adayın belirlenmesi, keşif ve sömürü görevlerini yerine getirmede zorluklara yol açabilir. Ayrıca, güncellenen yeni çözüm adayının, olması gereken değerden daha da uzaklaşmasına yol açabilir. FDB yöntemi, popülasyonda en iyi sonuç veren çözüm adayını belirlemede yardımcı olmaktadır (Kahraman et al., 2020). Bunun için FDB çözüm yönteminde çözüm adaylarının arama sürecinde fayda sağladıklarını gösteren skor sonuçları hesaplanmaktadır (Kahraman et al., 2020). Skor hesabında çözüm adaylarının iki önemli özelliği hesaba katılmaktadır. Bunlar

uygunluk değerleri ve popülasyonun en iyi çözüm adayına (P_{best}) olan uzaklığıdır. Çözüm adaylarının FDB skorlarının hesaplamaları aşağıdaki adımlarda verilmiştir;

- i) d, optimizasyon probleminin boyutunu, n ise popülasyondaki birey sayısını temsil etmek üzere, Euclidean bağıntısına göre i. çözüm adayı olan p_i 'nin p_{best} e olan mesafesi Denklem 7'deki gibi hesaplanır.

$$\forall P_i \neq P_{best}, P_i = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{1P_i} - x_{1P_{best}})^2 + (x_{2P_i} - x_{2P_{best}})^2 + \dots + (x_{dP_i} - x_{dP_{best}})^2} \quad (7)$$

- ii) Her arama ajanı için mesafe vektörü, Denklem 8' deki gibi matematiksel hesaplama ile yapılmaktadır.

$$D_p \equiv [d_1 \dots d_n]_{n \times 1} \quad (8)$$

- iii) Denklem 9'da arama ajanlarının skor değerleri, f ve D_p vektörlerinden faydalanılarak hesaplama yapılmaktadır.

$$\forall P_i, S_{P_i} = w * norm f_i + (1 - w) * norm D_{P_i} \quad (9)$$

- iv) Popülasyonun skor değerlerinin vektörü (S_p), Denklem 10' da verilen matematiksel ifadedeki gibi hesaplanır.

$$S_p \equiv [s_1 \dots s_n]_{n \times 1} \quad (10)$$

2.3. Algoritma Geliştirmesi (FDB-ZOA)

Bu bölümde FDB seçim yönteminin ZOA algoritmasına uyarlanmasını ve önerilen hibrit FDB-ZOA algoritmasının matematiksel modelleri sunulmaktadır. Bölüm 2.1 ve 2.2' de ZOA algoritmasının ve FDB seçim yöntemleri üzerinde durulmuştur. Aşağıda ise FDB yönteminin ZOA algoritmasına nasıl uyarlandığı adım adım açıklanmıştır.

ZOA algoritması, doğadan ilham alınan meta-sezgisel bir arama algoritmasıdır. Algoritmanın başarısı, doğayı ne kadar taklit edebildiğine bağlıdır. Optimizasyon süresi

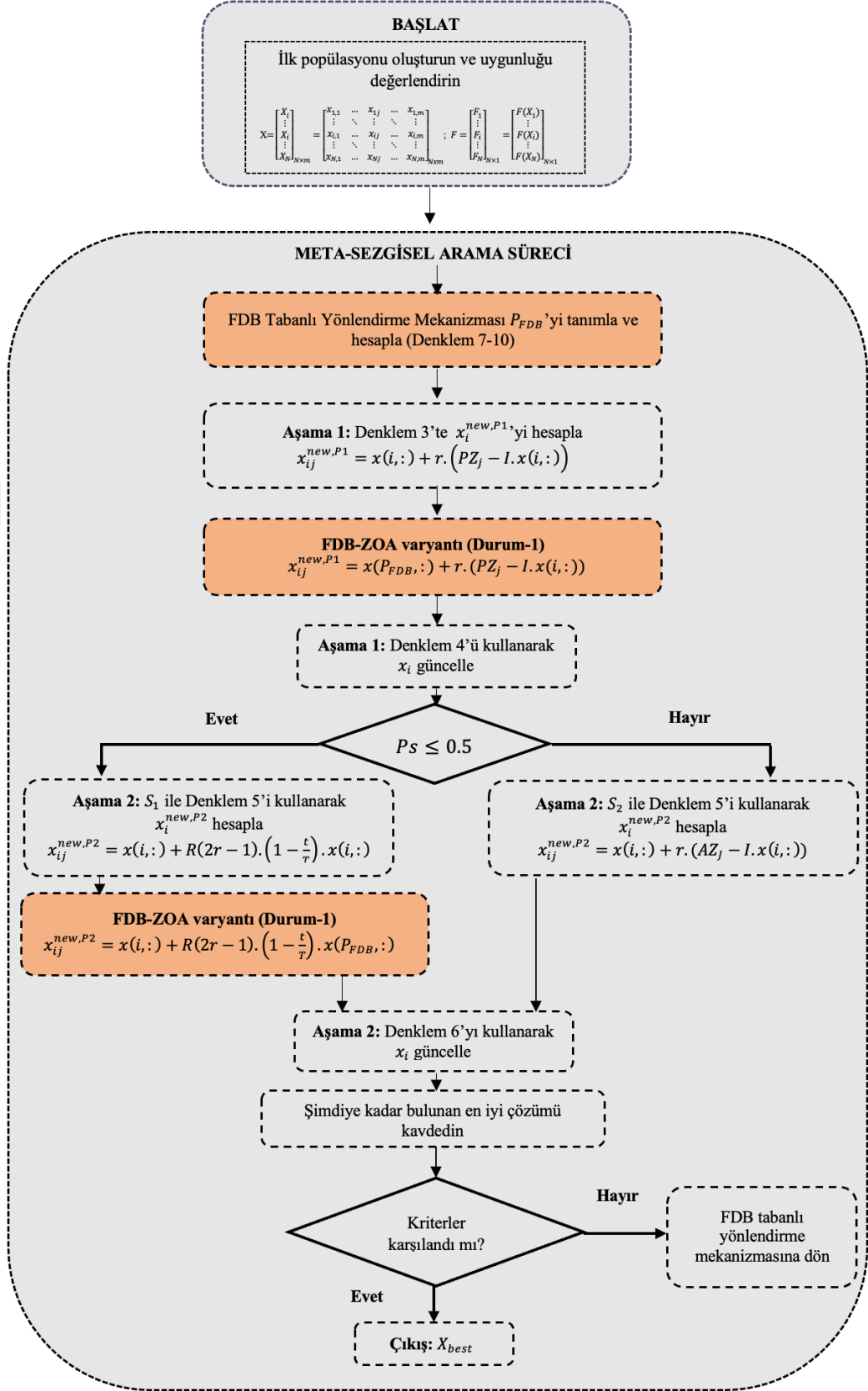
boyunca, ZOA sürünün yemek arama ve avcılara karşı savunma stratejilerini taklit eder. Sürü, öncü zebra ve taşıyıcı zebra olmak üzere iki gruba ayrılarak yiyecek arama için konumlandırılır. Sürünün hayatta kalması için öncü zebra seçilmesi gereklidir. Zebralar, avcılara karşı savunma durumunda, avcının durumuna bağlı olarak stratejik hamleler izler. Eğer avcı aslan ise zebralar, zikzak şekilde hareketlerle kaçır. Aslan dışındaki yırtıcılara karşı ise, zebralar kafa karıştırıcı ve korkutucu saldırılar yapar. Bu açıklamalar ışığında, ZOA algoritmasının doğayı taklit edebilmesi için üç ana yetenek gereklidir: sömürü, keşif ve dengeli arama. ZOA algoritmasını standart benchmark problemlerinde test edildiğinde, bazı problemlerde yerel çözüm tuzaklarına takıldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, keşif ve dengeli arama kabiliyetlerinin yetersiz olduğu tespit belirlenmiştir. Bu iki önemli kabiliyetin iyileştirmesi ve geliştirmesi için ZOA'nın tasarımının doğa ile uyumlu olması gerekmektedir.

Bu çalışmada, popülasyon içindeki en iyi arama ajanlara yönlendirebilmek için FDB seçim yöntemine kullanılmıştır. Önerilen FDB-ZOA algoritmasında iki önemli değişiklik yapılmıştır. Bunlardan biri Denklem 3' teki yiyecek arama stratejisi, diğeri ise Denklem 5'te avcının aslan olduğu durumdaki zikzak hareketlerle kaçma stratejisidir. Denklem 3 ve Denklem 5' te x_{ij} , j. boyuttaki i. zebranın konumunda en iyi zebranın belirlenmesinde FDB seçim yöntemine başvurulur. Bu amaçla Denklem 3 ve Denklem 5' te %70 oranında FDB yöntemi ile seçilen arama ajanı kullanılmıştır. Oluşturulan FDB teknikli bu iyileştirme Durum-1 olarak adlandırılmış ve test edilmiştir. Durum-1' deki keşif ve dengeli arama yeteneği, algoritmanın performansını arttırmak için geliştirilmiştir. Tablo 2'de, FDB seçim yönteminin uygulandığı matematiksel ifadeler detaylı şekilde verilmiştir.

Tablo 2. ZOA' da FDB uygulanan bölgeler

Algoritma	FDB tabanlı ZOA varyantı (önerilen)
Durum-1	Denklem (3) için önerilen gelişmede, j. boyuttaki i. zebranın konumu olan x_{ij} için FDB yöntemi uygulandı ve en iyi uygunluk değeri elde edildi. ZOA: $x_{ij}^{new,P1} = x(i, :) + r. (PZ_j - I. x(i, :))$ (2.3) FDB-ZOA varyantı: $x_{ij}^{new,P1} = x(P_{FDB}, :) + r. (PZ_j - I. x(i, :))$ Denklem (5) için önerilen gelişmede, j. boyuttaki i. zebranın konumu olan x_{ij} için FDB yöntemi uygulandı ve en iyi uygunluk değerleri elde edildi. ZOA: $x_{ij}^{new,P2} = x(i, :) + R(2r - 1). \left(1 - \frac{t}{T}\right). x(i, :)$ (2.5) FDB-ZOA varyantı: $x_{ij}^{new,P2} = x(i, :) + R(2r - 1). \left(1 - \frac{t}{T}\right). x(P_{FDB}, :)$

Tablo 2'de FDB seçim yönteminin hangi denklemlere uygulandığını açıkça göstermektedir. FDB seçim yönteminin nerede uygulandığını daha kolay anlayabilmek için Şekil 1' de bir akış diyagramı verilmiştir. Şekil 1' deki FDB yönteminin uygulandığı yerler fosforlu renkle işaretlenmiştir.



Şekil 1. FDB-ZOA akış diyagramı

2.4. Tezde Kullanılan Algoritmalar

2.4.1. Vahşi At Optimizasyonu (WHO)

WHO, Naruei ve arkadaşları tarafından oluşturulan ve vahşi atların sosyal davranışlarından esinlenen bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır (Naruei & Keynia, 2022). Bu sosyal davranışlar; otlama, takip, hakim olma, liderlik etme ve çiftleşme gibi eylemleri içerir. Atların diğer canlılardan ayrılan en belirgin tayların ergenliğe ulaşmadan önce sürülerden ayrılıp farklı gruplara katılmasıdır. Bu, babanın kızları veya kız kardeşleriyle çiftleşmesini önlemek amacıyla gerçekleşir. Bu davranış biçimi, geliştirilen optimizasyon algoritması için ilham kaynağı olmuştur. WHO algoritmasında, atların davranışları matematiksel ifadelerle modellenmiş ve benchmark problemleri üzerinde test edilmiştir.

2.4.2. Stokastik Boya Optimize Edici (SPO)

SPO, renklerin estetiği ve resim sanatından esinlenerek geliştirilen, popülasyon tabanlı optimizasyon algoritmasıdır (Kaveh et al., 2022). Kaveh ve arkadaşları tarafından geliştirilen SPO algoritmasında, arama uzayı bir tuval olarak kabul edilir ve en iyi renge ulaşabilmek için çeşitli renk kombinasyonları oluşturulur. Dört basit renk kombinasyonu kuralı, kullanım ve keşif süreçlerinde kullanılır ve herhangi bir dahili parametre gerekli değildir. SPO algoritması, yedi farklı algoritmayla karşılaştırılarak test edilmiştir. Sonuçlar, SPO'nun mühendislik problemlerine kolayca uyarlanabildiğini ve zorlu mühendislik problemlerinde başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermektedir.

2.4.3. Balina Optimizasyon Algoritması (WOA)

Mirjali ve Levis, kambur balinaların sosyal davranışlarından esinlenerek doğa tabanlı meta-sezgisel bir algoritma tasarladılar (Mirjalili & Lewis, 2016). Bu algoritmanın temel prensibi, kambur balinanın balon balığını avlama stratejisinin matematiksel bir ifade edilmesinden oluşmaktadır. Mirjali ve Levis WOA algoritmasını, yirmi dokuz matematiksel optimizasyon problemi ve altı yapısal tasarım problemi ile test edilmiştir. Sonuçta, WOA'nın başarılı bir algoritma olduğu belirlenmiştir.

2.4.4. Diferansiyel Evrim (DE)

DE algoritması, 1997 yılında Storn R. Ve Kenneth P. tarafından geliştirilen en eski meta-sezgisel algoritmalarından birisidir (Storn & Price, 1997). DE algoritması, doğrusal olmayan ve farklılaştırılmayan sürekli uzay fonksiyonlarını azaltmak için tasarlanmıştır. Bu algoritmanın günümüzde hala kullanılıyor olması, mühendislik problemlerinde oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

2.4.5. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)

PSO, 1995 yılında Eberhart R.C. ve Kennedy J. tarafından geliştirilmiştir. Bu kuşların ve balıkların yiyecek araması sürecinden esinlenen bir sürü zekası tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır (Eberhart & Kennedy, 1995). İlk tanıtıldığından bu yana, algoritma büyük bir popülerlik kazanmıştır. Basitliği ve minimum parçacık sayısını ayarlama kolaylığı nedeniyle, birçok çalışmada yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.4.6. Gri Kurt Optimizasyonu (GWO)

GWO algoritması, gri kurtların sosyal davranışları ve avlanma süreçlerinden esinlenerek tasarlanmış bir sürü tabanlı optimizasyon algoritmasıdır (Mirjalili et al., 2014). Gri kurtlar, 5-12 üye arasında değişen gruplar oluşturur ve kendi içlerinde bir hiyerarşi kurarlar. Grup liderlerine ‘alfa’ denir. Hiyerarşinin ikinci basamağında ‘beta’ gri kurtları yer alır ve alfa kurtların sürüyü yönetmesinde yardımcı olurlar. Hiyerarşinin üçüncü basamağında olan kurtlar ise ‘delta’ kurtlarıdır ve nöbetçilik, avcılık ve bakıcılık gibi görevleri üstlenirler. Hiyerarşinin en altında ise ‘omega’ kurtlar bulunur ve bazı durumlarda bebek bakıcılığı görevini üstlenirler. Kurtların avlanma ve liderlik stratejilerinden ilham olarak oluşturulan matematiksel model olan GWO, 29 adet test fonksiyonu ile test edilmiştir ve sonuçlar zorlu mühendislik problemlerine geçerli çözümler ürettiğini göstermiştir.

2.4.7. İstilacı Yabancı Ot Optimizasyonu (IWO)

IWO, yabancı ot kolonilerinin davranışlarından esinlenerek tasarlanmış bir popülasyon tabanlı bir evrimsel optimizasyon yöntemidir (Sedighy et al., 2010). Yabancı otlar, saldırgan büyüme alışkanlıkları nedeniyle mahsuller için bir tehdit oluşturan dayanıklı

bitkilerdir. Çevresel değişikliklere karşı yüksek direnç göstererek kolayca uyum sağlarlar. Bu özelliklerine dayanarak bir matematiksel model oluşturulmuş güçlü bir algoritma elde edilmiştir. Bu algoritma, yabancı ot kolonisinin rastlantısallığını, direncini ve çevreye olan uyumunu taklit etmeye çalışır (Misaghi & Yaghoobi, 2019).

2.4.8. Çiçek Poleni Algoritması (FPA)

Xin-She Yang tarafından geliştirilen bu algoritma, çiçek tozlaşması konseptinden esinlenmiştir (Yang, 2012). Çiçeklerin tozlaşması, kendi kendine tozlaşma ve çapraz tozlaşma olarak iki kategoriye ayrılır. Kendi kendine tozlaşma, aynı çiçeğin polenlerle döllenmesi sürecidir. Çapraz tozlaşma, polenlerin bir bitkiden başka bir çiçeğe taşınmasıdır. Xin-She Yang, bu süreçleri matematiksel modelleme ile algoritmaya dönüştürmüştür. Bu algoritma mühendislik gibi birçok alanda kullanılmış ve alan literatürüne katkı sağlamıştır.

2.4.9. Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon (AEO)

Doğadan ilham alınarak tasarlanan AEO, yeryüzündeki bir ekosistemin enerji akışını taklit etmek için oluşturulan bir optimizasyon yöntemidir (Zhao et al., 2020). AEO, canlı organizmaların üretim, tüketim ve ayrıştırma gibi üç önemli davranışını taklit ederek matematiksel olarak modellenmiştir. Bu yöntem, otuz bir adet matematiksel fonksiyonda ve sekiz gerçek dünya mühendislik problemi üzerinde test edilmiştir. Testler, AEO'nun testler zor ve geniş arama uzaylarına sahip olan karmaşık problemleri çözme konusunda başarılı olduğunu göstermektedir.

2.4.10. Ateş Böceği Algoritması (FPA)

FPA algoritması, ateş böceklerinin ışık yayma sürecinden esinlenerek oluşturulan bir sürü tabanlı algoritmadır (Yang, 2009). Ateş böceklerinin ışık yayması, karmaşık bir dizi kimyasal reaksiyonlar sonucu gerçekleşir. Bu ışık yayma eylemi, partner çekme ve yırtıcılardan korunma gibi iki ana amaç için kullanılır. Bu davranışları temel alarak, Yang FPA algoritmasının matematiksel olarak modellemiştir. Algoritmanın genel prensibi, ışık yoğunluğuyla ilgilidir.

2.5. Matematiksel Yöntemler

Deneysel araştırmalardan elde edilen veriler ve analiz sonuçları, yanlış uygulamalar nedeniyle meta-sezgisel algoritmaların gerçek performansını doğru bir şekilde temsil edememektedir. Bu yanlış uygulamalar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Duman et al., 2022);

- Kıyaslama problemlerinin seçiminde tutarsızlık
- Rakip algoritmaların seçiminde tutarsızlık
- Amaç fonksiyonlarının değerlendirilmesine boyutsal dengesizlik

Yukarıda belirtilen sorunlar, meta-sezgisel algoritma oluşturma ve araştırma söz konusu olduğunda standart uyumluluğun gerekli ve önemli olduğunu açıkça göstermektedir (Duman et al., 2022). 2000’li yılların başından bu yana IEEE, meta-sezgisel algoritmaların gerekli standartlara göre tanımlanması konusunda birçok konferans düzenlemiştir. Bu konferanslar ışığında, IEE Evrimsel Hesaplama Kongresi (IEE CEC) meta-sezgisel algoritmaların standartlarının tanımlanmasında büyük katkısı olduğu görülmüştür (Mallipeddi & Suganthan, 2010) (Liang et al., 2013) (N. H. , Awad et al., 2016). Konferanslar sonucunda yukarıda bahsedilen problemlerin çözümleri bulunmuştur. Bu çözümler aşağıdaki gibidir;

- Meta-sezgisel algoritmaların, arama uzayında performanslarını analiz ve kıyaslamak amacıyla birden fazla matematiksel problem içeren benchmark problem paketleri oluşturulmuştur. (CEC 2014 (Liang et al., 2013), CEC 2017 (Sallam et al., 2017) ve CEC 2020 (Liang et al., 2019))
- Her bir meta-sezgisel algoritmanın, arama süreci döngüsünü sonlandırmak için, maksimum amaç fonksiyonu değerleri (maxFE) ve problemin boyutu (d) $10000 \times d$ olarak hesaplanır.
- Meta-sezgisel algoritmaların ürettiği verileri istatistiksel olarak analiz etmek için, deneysel çalışma elli bir kez uygulanır. En iyi veri, parametrik olmayan test yöntemleri ile analiz edilir.

Yukarıda belirtilen, CEC14, CEC17 ve CEC20 benchmark problem paketleri, basitten karmaşığa çeşitli matematiksel problemler içerir. Bu kıyaslama paketleri, arama uzayının çeşitli özelliklerini temsil eden karmaşık matematiksel problemlerinden oluşur. Bu tez çalışmasında benchmark problemleri olarak, CEC17 ve CEC20 seçilmiştir.

2.5.1. CEC 2017

CEC17 benchmark problem paketi, Awad ve arkadaşları tarafından oluşturulmuştur (N. Awad et al., 2016). Bu pakette 29 adet fonksiyon bulunmaktadır. Bunlardan 2 tanesi tek modlu, 7 tanesi basit çok modlu, 10 tanesi hibrit, kalan 10'u ise birleşim fonksiyonlarından oluşmaktadır. Geliştirilen FDB-ZOA algoritması, prestijli ve güncel benchmark problem paketlerinden biri olan CEC17 ile tek modlu, çok modlu, hibrit ve birleşim tipi problemleri üzerinden incelenmiştir. Tablo 3' te CEC17 benchmark problem paketlerinde bulunan fonksiyonların özeti verilmiştir.

Tablo 3. CEC17 benchmark problem paketi

Fonksiyon Türü	No.	Fonksiyon Adı	Arama Mesafesi	Boyut
Tek modlu	$f1$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Bent Cigar Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Tek Modlu	$f2$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Zakharov Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Basit Çok Modlu	$f3$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Rosenbrock's Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Basit Çok Modlu	$f4$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Rastrigin's Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Basit Çok Modlu	$f5$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Genişletilmiş Scaffer's F6 Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Basit Çok Modlu	$f6$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Lunacek Bi-Rastrigin Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Basit Çok Modlu	$f7$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Sürekli Olmayan Rastrigin's Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Basit Çok Modlu	$f8$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Levy Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Basit Çok Modlu	$f9$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Schwefel's Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit	$f10$	Hibrit Fonksiyonu 1 (N=3)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit	$f11$	Hibrit Fonksiyonu 2 (N=3)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit	$f12$	Hibrit Fonksiyonu 3 (N=3)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit	$f13$	Hibrit Fonksiyonu 4 (N=4)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit	$f14$	Hibrit Fonksiyonu 5 (N=4)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit	$f15$	Hibrit Fonksiyonu 6 (N=4)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit	$f16$	Hibrit Fonksiyonu 6 (N=5)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit	$f17$	Hibrit Fonksiyonu 6 (N=5)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit	$f18$	Hibrit Fonksiyonu 6 (N=5)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit	$f19$	Hibrit Fonksiyonu 6 (N=6)	$[-100,100]$	30,50,100

Tablo 3'ün devamı

Birleşim	f_{20}	Birleşim Fonksiyonu 1 (N=3)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim	f_{21}	Birleşim Fonksiyonu 2 (N=3)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim	f_{22}	Birleşim Fonksiyonu 3 (N=4)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim	f_{23}	Birleşim Fonksiyonu 4 (N=4)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim	f_{24}	Birleşim Fonksiyonu 5 (N=5)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim	f_{25}	Birleşim Fonksiyonu 6 (N=5)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim	f_{26}	Birleşim Fonksiyonu 7 (N=6)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim	f_{27}	Birleşim Fonksiyonu 8 (N=6)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim	f_{28}	Birleşim Fonksiyonu 9 (N=3)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim	f_{29}	Birleşim Fonksiyonu 10 (N=3)	$[-100,100]$	30,50,100

2.5.2. CEC 2020

CEC20 benchmark problem paketi, Yue ve arkadaşları tarafından 2019 yılında literatüre eklenmiştir (Yue et al., 2019). Bu pakette, 1 adet tek modlu, 3 adet basit fonksiyon, 3 adet hibrit fonksiyonu ve 3 adet birleşim fonksiyonundan içermektedir. CEC20, en güncel ve prestij sahibi benchmark problem paketidir. Tablo 4' te CEC20 benchmark problem paketinde bulunan fonksiyonların özeti sunulmuştur.

Tablo 4. CEC20 benchmark problem paketi

Fonksiyon Türü	No.	Fonksiyon Adı	Arama Mesafesi	Boyut
Tek Modlu	$f1$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Bent Cigar Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Basit Fonksiyonlar	$f2$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Schwefel's Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Basit Fonksiyonlar	$f3$	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Lunacek bi-Rastrigin Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Basit Fonksiyonlar	$f4$	Genişletilmiş Rosenbrock's plus Griewangk's Fonksiyonu	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit Fonksiyonlar	$f5$	Hibrit Fonksiyonu 1 (N=3)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit Fonksiyonlar	$f6$	Hibrit Fonksiyonu 2 (N=4)	$[-100,100]$	30,50,100
Hibrit Fonksiyonlar	$f7$	Hibrit Fonksiyonu 3 (N=5)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim Fonksiyonlar	$f8$	Birleşim Fonksiyonu 1 (N=3)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim Fonksiyonlar	$f9$	Birleşim Fonksiyonu 2 (N=4)	$[-100,100]$	30,50,100
Birleşim Fonksiyonlar	$f10$	Birleşim Fonksiyonu 3 (N=5)	$[-100,100]$	30,50,100

2.6. Yük Frekans Kontrolü (LFC)

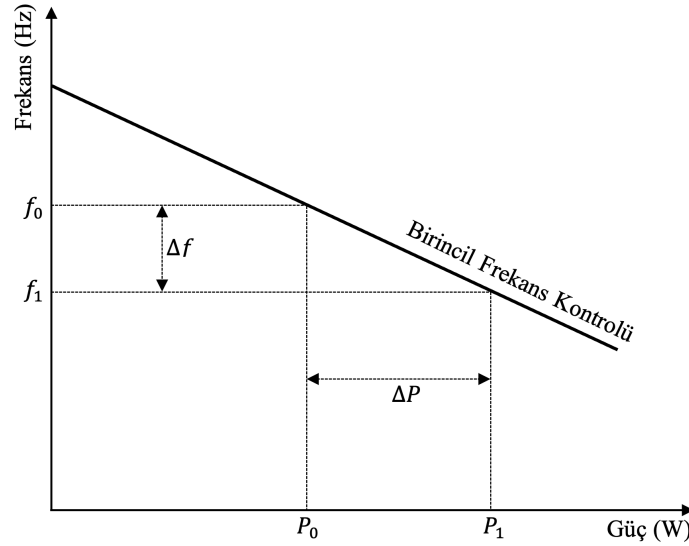
Güç sistemleri, birbiriyle enterkonnekte olan uyumlu bölgelerden oluşur. Bu bölgeler arasındaki bağlantılar, güç aktarımını sağlar. Enterkonnekte güç sistemlerinin kontrolü son derece önemlidir, çünkü her sistem kendi içinde ve birbirleriyle senkronize bir şekilde nominal düzeyde çalışmalıdır. Sistemler birbirlerine senkronize olduğu için her bir bölge aynı frekansa sahiptir (Yılmaz, 2020).

Bozucu etkenler ve üretim-tüketim arasındaki dengesizlik, sistemi kararsız hale getirebilir. Üretim ve tüketim güçleri arasında bir dengesizlik oluşursa, frekansta da dengesizlikler meydana gelir. Eğer üretilen güç, tüketilen güçten fazla ise frekansta artar, tüketilen güç, üretilen güçten fazla ise frekans değerinde azalır (Akalin, 2000).

Bu dengesizlikler, sistemin her bir bölgesinde frekans salınımlarına neden olacaktır. Sistem kararlılığını yeniden sağlamak ve frekansı nominal değerine döndürmek çok önemlidir. Aksi takdirde, sistemde çökmeler yaşanabilir. Bu sorunları önlemek için yük frekans kontrolü (LFC) kullanılır.

LFC işleminin temel prensibi, sistem frekansı ve enterkonnekte sistemler arasındaki bağlantı hattı güç değişiminden kaynaklanan salınımları en kısa sürede sönümlemektir. Ayrıca, üretim-tüketim dengelenmesi ile sistemi referans değerde tutmayı hedefler (Can, 2022). Bu sayede, sistem nominal değerde çalışır ve güç alışverişi kontrolü belirlenen aralıklarda sağlanır. LFC sistemi üç aşamadan oluşur: Birincil (primer), ikincil (sekonder) ve üçüncül (tersiyer) frekans kontrolü (Bevrani, 2009).

Artan taleplerle birlikte, generatör hızı düşer ve bu da sistem frekansında düşüşe neden olur. Regülatörler, frekanstaki bu düşüşü algılar ve türbin hızını arttırır. Bu sayede frekans değeri, nominal değere yaklaştırılır. Bu süreç, birincil frekans kontrolü olarak adlandırılır. Ancak birincil frekans kontrolünde, frekans değeri eski haline dönemez ve bu da sistemde kalıcı hal hatası oluşmasına neden olur (Gozde et al., 2009). Aşağıda birincil frekans kontrolü sonrası oluşan güç-frekans grafiği gösterilmiştir;



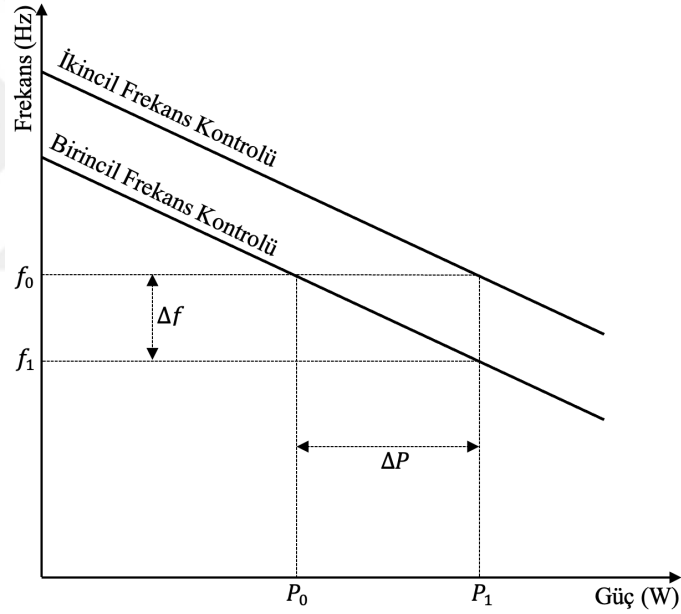
Şekil 2. Birincil kontrol çevrimi için frekans-güç grafiği

Şekil 2’de belirtildiği gibi tüketimdeki ΔP ’ lik güç değişimine karşılık gelen Δf ’ lik frekans değişimi gözlemlenmiştir. Her ne kadar birincil kontrol çevrimi değişen güç miktarını karşılasa da frekansta kalıcı bir hal hatası meydana oluşmuştur.

İkincil frekans kontrolü, birincil frekans kontrolündeki kalıcı hal hata durumunu düzeltmek ve frekansı nominal değere getirmek için gereklidir (İbrahim, 2020). Ayrıca, senkron generatörlerin aktif güç çıkışının değiştirilmesiyle kontrol bölgeleri arasındaki hedeflenen güç alışverişi sağlanır (Barzkar & Ghassemi, 2020).

İkincil frekans kontrolü, birincil frekans kontrolünden daha uzun sürer. Bu kontrol, 30 saniye içerisinde aktif olmalı, 15 dakika içinde frekansı nominal değere getirmelidir (Yılmaz, 2020).

İkincil frekans kontrolü, sistem için kalıcı bir çözümdür, yani sisteme tamamıyla müdahale edilir. Birincil frekans kontrolü ise sistemin acil durumlarda geçici bir çözüm sunarak anlık müdahale eder (Yılmaz, 2020). Daha iyi bir gözlem için aşağıda, iki frekans kontrolünü gösteren bir güç-frekans grafiği bulunmaktadır.



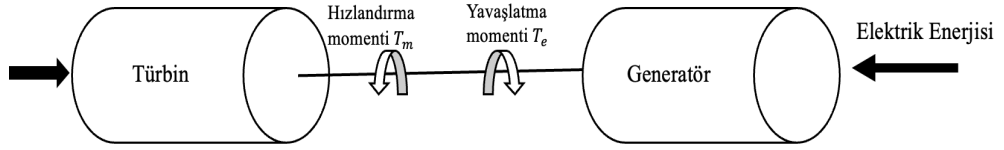
Şekil 3. Birincil ve ikincil kontrol çevrimi için frekans-güç grafiği

Şekil 3'te görüldüğü gibi ΔP ' lik güç değişimine karşılık gelen Δf 'lik frekans değişimi durumunda, birincil frekans kontrolünde kalıcı hal hatası görülürken ikincil frekans kontrolünde nominal değere dönüş görülmektedir.

Üçüncü frekans kontrolü, gerektiğinde ikincil frekans kontrolüne yedek sağlamak için generatörlerin güçlerinde değişiklik yapar ve generatörlere en uygun maliyetle dağıtım sağlar. Bu kontrol işlemi manuel veya otomatik yapılabilir. Üçüncül frekans kontrolü diğer iki kontrol işlemine kıyasla daha yavaş gerçekleşir.

2.6.1. Yük Frekans Modeli

Mekanik sistemlerden elektrik enerjisi üreten birimlere generatör denir. Sistemin aktif gücünü sağlamak için trbn tarafından üretilen mekanik güce karşılık, generatrnde eşdeğer bir g üretmesi gerekmektedir. Aktif gücün dengede olması, frekansın anma değerde olduğu anlamına gelir. şekil 4’ te basit bir generatör güç sistemi gösterilmiştir.



şekil 4. Generatör güç sistemi modeli

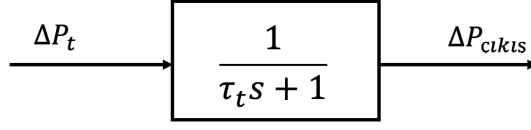
Burada, T_m mekanik momentini ve T_e ise elektriksel momentini temsil ediyor. Mekanik moment üretime, elektriksel moment ise tüketime karşılık gelir. Denklem 11’ deki matematiksel ifadeye göre üretim ve tüketim arasındaki olası dengesizlik, frekansta azalmaya veya artışa neden olur. Bunun nedeni, mekanik momentin dönüş hızn artırırken, elektriksel momentin ters yönde etki göstererek dönüş hızn azaltmasıdır (Yılmaz, 2020).

$$T_m - T_e = I \frac{dw}{dt} \quad (11)$$

Bir trbn sistemi, su veya su buharnn kinetik ve ısı enerjisini kullanarak mekanik enerjiye dönüştürür. Trbn, bir mil ve üzerindeki kanatçıklardan oluşur. Su veya buhar, trbnin kanatçıklarına çarparak milin hareket etmesini sağlar. Hareket eden mil, çıkışta mekanik enerjiyi üretir ve bu mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Denklem 12’ de trbn modeli için oluşturulan transfer fonksiyonu içerir.

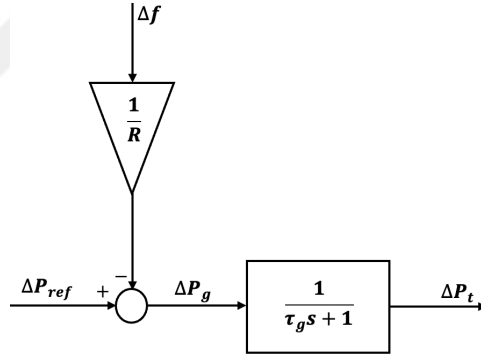
$$G_T(s) = \frac{\Delta P_{ıkış}}{\Delta P_t} = \frac{1}{\tau_t s + 1} \quad (12)$$

Burada τ_t zaman sabitidir. şekil 5’ te trbn modelinin blok diyagramı verilmiştir;



Şekil 5. Türbin blok diyagramı

Sistemin en önemli elemanlarından biri olan regülatörlerin görevi, aniden yükselen elektrik yükünün neden olduğu güç farkını gidermek için mekanik gücü düzenlemektir. Bu güç farkını kapatmak için kullanılan mekanik enerjinin kinetik enerjisi zamanla azalır, bu da türbinin hızının düşmesine neden olur. Türbin hızındaki bu azalma, frekansın nominal değerinden sapmasına yol açar. Hızdaki bu değişimler, regülatörler tarafından tespit edilir, böylece frekans nominal değerine geri çekilir. Şekil 6'da regülatörün blok diyagramı verilmiştir;



Şekil 6. Regülatör blok diyagramı

Burada, τ_g regülatör zaman sabitini temsil ederken, R hız regülasyon sabitini temsil eder. R değeri, üretim ünitesinin hız çıkış gücü karakteristiğini belirtir. Denklem 13 regülatör modeli için oluşturulan transfer fonksiyonunu gösterir.

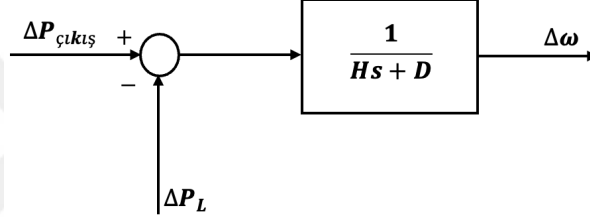
$$G_g(s) = \frac{\Delta P_t}{\Delta P_g} = \frac{1}{\tau_g s + 1} \quad (13)$$

Bir güç sistemine bağlanan yükler, omik, endüktif veya kapasitif olabilir. Bu yükler bağlı oldukları elektrikli cihazların özelliklerine göre seçilir. Elektriksel yüklerinin büyük bir kısmı motor yüklerinden oluşur ve bu yüzden, sisteme talep edilen yükün frekans

üzerindeki etkisini incelemek için bir modele ihtiyaç duyulur (Can, 2022). Yük ve frekans arasındaki matematiksel ilişki Denklem 14' teki gibidir.

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (14)$$

Burada, ΔP_L frekanstan bağımsız yük değişimini temsil ederken, $D\Delta\omega$ ise frekansa bağımlı yük değişimini temsil etmektedir. D yük sönüm sabitidir. Yük sönüm sabiti, frekanstaki yüzde değişime karşılık gelen yükteki değişim olarak tanımlanabilir. Bu değer, genellikle %1 ile %2 arasında olur. Şekil 7' de atalet ve yük modelinin blok diyagramı verilmiştir;



Şekil 7. Atalet ve yük blok diyagramı

Bu tez çalışmasında kullanılan LFC modelinin parametreleri Tablo 5'te verilmiştir (Saadat, 1999);

Tablo 5. LFC sistem parametreleri

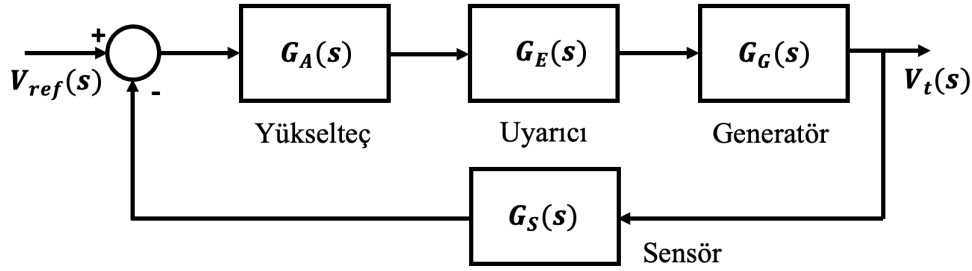
LFC MODELİ	PARAMETRELER	
Regülatör	$\tau_g = 0.2$	$K_g = 1$
Türbin	$\tau_t = 0.5$	$K_t = 1$
Atalet ve Yük	$H = 0.2$	$D = 0.8$
Hız Regülasyonu	$R = 0.05$	

2.7. Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR)

Senkron generatörler için yüksek verimliliğe ve hızlı tepki sürelerine sahip AVR geliştirilmesi, istikrarlı elektrik güç kaynağı için kritik öneme sahiptir (Sun et al., 2021). AVR sisteminin amacı, generatör uyarıcı kontrolü ile senkron generatörün terminal gerilimini belirli bir seviyede tutarak güç sisteminin kararlılığını ve kalitesini artırmaktır

(Ekinci & Hekimoglu, 2019). Uyarım ve AVR'nin güç sisteminin kararlılık sorunları üzerinde etkisi vardır. Oluşabilecek yük dalgalanmaları, güç hattı arızaları, kısa devreler ve enerji santrali kesintileri gibi durumlarda, geçici kararlılığın iyileştirilmesi gerekir. Büyük geçici sinyal kararlılığı, güçlü ve hızlı yanıt veren bir AVR ile iyileştirilebilir. Çünkü senkronizasyonu korurken güç sistemini geçici bozulmalara ve sistemde yaşanan dalgalanmalara karşı daha dirençli hale getirir (Dudgeon et al., 2007). Öte yandan, hızlı tepki veren AVR sisteminin elektromekanik harmoniklerin sönümlemesine etkisi, sistemin salınım kararlılığını olumsuz yönde değiştirebilir (Veinović et al., 2023). Salınım kararlılığını artırmak için bir AVR genellikle doğrudan bir güç sistemi denetleyicisine bağlanır (Report, 1981).

Basit bir AVR sistemi dört farklı bileşenden meydana gelir. Bunlar; yükselteç, uyarıcı, generatör ve sensördür. Şekil 8' de AVR sisteminin blok diyagramı verilmiştir;



Şekil 8. AVR sistemi blok diyagramı

Her bir bileşenlerin matematiksel ifadesi aşağıdaki denklemlerde verilmiştir (Ahmed et al., 2016);

$$G_A(s) = \frac{K_A}{\tau_A s + 1} \quad (15)$$

$$G_E(s) = \frac{K_E}{\tau_E s + 1} \quad (16)$$

$$G_G(s) = \frac{K_G}{\tau_G s + 1} \quad (17)$$

$$G_S(s) = \frac{K_S}{\tau_S s + 1} \quad (18)$$

Burada, K_A yükselteç kazancını, τ_A yükselteç zaman sabitini, K_E uyarıcı kazancını, τ_E uyarıcı zaman sabitini, K_G generatör kazancını, τ_G generatör zaman sabitini, K_S sensör kazancını, τ_S ise sensör zaman sabitini temsil etmektedir.

AVR sisteminin her bir parametresi belirli bir değer aralığına sahiptir. Bu değer aralıkları ve tez çalışmasında alınan değerler Tablo 6’da verilmiştir (Saadat, 1999);

Tablo 6. AVR değer aralıkları ve seçilen değerler

KAZANÇ KATSAYISI DEĞER ARALIĞI	SEÇİLEN KAZANÇ DEĞERLERİ
$10 \leq K_A \leq 40$	$K_A = 10$
$1.0 \leq K_E \leq 10$	$K_E = 1$
$0.7 \leq K_G \leq 1.0$	$K_G = 0.8$
$K_S = 1.0$	$K_S = 1$
ZAMAN SABİTİ DEĞER ARALIĞI	SEÇİLEN ZAMAN SABİTİ DEĞERLERİ
$0.02 \leq \tau_A \leq 1.0$	$\tau_A = 0.1$
$0.5 \leq \tau_E \leq 1.0$	$\tau_E = 0.4$
$2.0 \leq \tau_G \leq 2.0$	$\tau_G = 1.4$
$0.001 \leq \tau_S \leq 0.06$	$\tau_S = 0.05$

Denklem 15, 16, 17 ve 18’i kullanarak AVR sisteminin kapalı sistem transfer fonksiyonu hesaplanabilir. Denklem 19’da AVR sisteminin transfer fonksiyonu verilmiştir.

$$G_{AVR}(s) = \frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{G_A(s)G_E(s)G_G(s)}{1 + G_S(s)G_A(s)G_E(s)G_G(s)} \quad (19)$$

$$= \frac{0.4s + 8}{0.0028s^4 + 0.093s^3 + 0.099s^2 + 8}$$

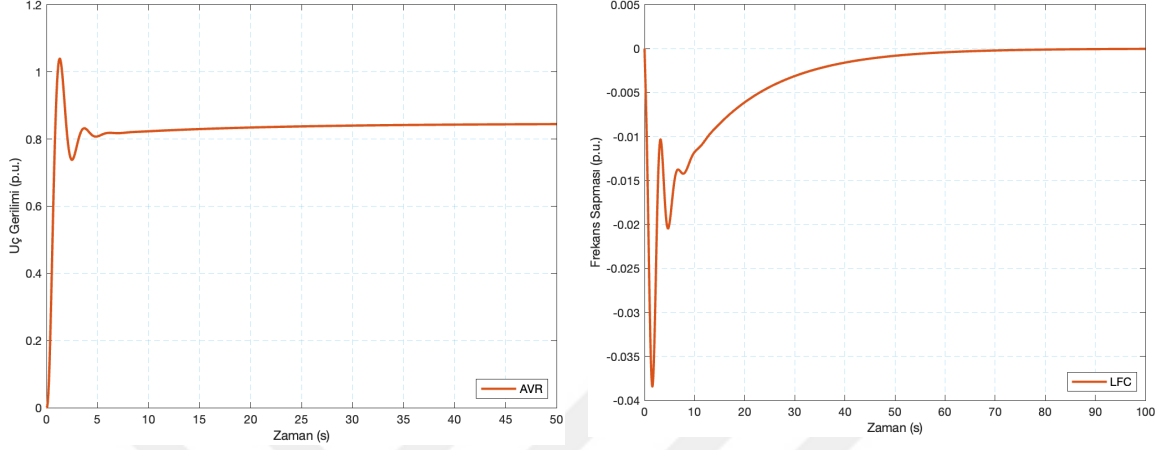
2.8. AVR-LFC Sistem Modeli

Bu tez çalışmasında test edilen tek bölgesi AVR-LFC sistemi blok diyagramı, Şekil 9’da gösterilmiştir (Saadat, 1999);



Şekil 9. 1 bölgesi AVR-LFC sistemi blok diyagramı

Bu AVR-LFC sistemin parametreleri Tablo 5 ve 6'da belirtilmiştir. Bu parametrelerden temel alınarak, sistemin kontrolsüz birim basamak cevabı Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. AVR-LFC sisteminin kontrolsüz birim basamak cevabı

Şekil 10'da görüldüğü üzere AVR kısmı referans gerilim değerine (1 p.u.) ulaşamamaktadır. Bu durum sistemin kalıcı hal hatası oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca, LFC kısmı, referansı yakalamaktadır ancak bu çok uzun zaman almaktadır (Cavdar, Dincer, et al., 2023). AVR-LFC sistemini daha iyi anlayabilmek için zaman analizi yapılmalıdır. Analiz sonuçları Tablo 7' de sunulmuştur. Sistem simülasyonu 100 saniye boyunca çalıştırılmıştır.

Tablo 7. Kontrolsüz AVR-LFC sisteminin geçici durum yanıt sonuçları

Referans	AVR (Referans 1 p.u.)					LFC (Referans 0.p.u.)		
	t_s (%2)	t_r	t_p	Aşım (p.u.)	E_{ss} (p.u.)	t_s (%5)	Aşım (p.u.)	E_{ss} (p.u.)
AVR-LFC	N/A	0.6747	1.2984	1.0400	0.1539	57.2415	-0.0384	2.8e-05

2.9. Denetleyici Tasarımı

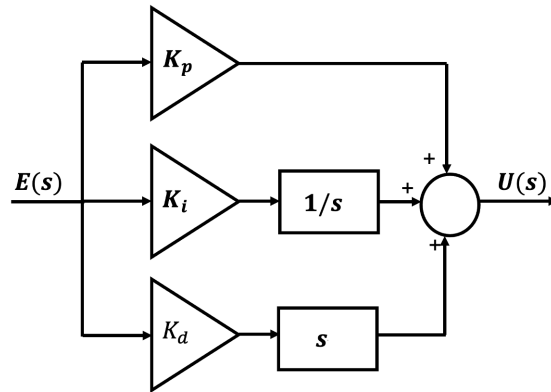
Günümüzde güç sistemlerinin verimli bir şekilde çalışması büyük önem taşımaktadır. Sistemden alınan sonuçların salınımlı ve verimsiz olmaması gereklidir. Bu nedenle denetleyicilere ihtiyaç vardır. Denetleyiciler, sistemdeki hata değerini temel alarak yeni bir giriş sinyali oluştururlar. Bu sayede, sistemdeki sürekli durum hatası giderilir ve daha sağlıklı bir yanıt alınır. Çalışmada kullanılan PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyiciler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.9.1. PID Denetleyici

Literatürde yaygın olarak kullanılan denetleyicilerden biridir. Bu kadar sık kullanılmasının nedenleri basit ve kararlı yapıya sahip olmasıdır (Dhanasekaran et al., 2020). Geleneksel PID denetleyicilerde üç parametre vardır. Bu kontrol parametreleri, sistem içinde farklı etkilere sahiptir (Şahin, 2019). PID denetleyicisinin transfer fonksiyonu, Denklem 20'deki gibidir;

$$G_{PID} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (20)$$

PID denetleyicilerinde, K_p oransal kazanç sabitini, K_i integral kazanç sabitini, K_d ise türevsel kazanç sabitini temsil etmektedir. PID denetleyicilerinin blok diyagramı Şekil 11'deki gibidir;



Şekil 11. PID denetleyici blok diyagramı

2.9.2. Kesir Dereceli PID Denetleyici

Podlubny tarafından önerilen kesir dereceli PID (FOPID) denetleyicisi, tanıtıldığı günden beri literatürde sıklıkla kullanılmaktadır (Moschos & Parisses, 2022). Denklem 21' de verilen sürekli integral-türev operatörü kesirli denetleyicinin matematiksel olarak nasıl ifade edildiğini gösterir;

$$aD_t^\alpha = \{d^\alpha/dt^\alpha\} \quad (21)$$

Burada, α işlem sırasını, a ve t ise sırasıyla alt ve üst sınırları temsil etmektedir. Kesir dereceli denetleyici tasarlayabilmek için kesirli kalkülüse ihtiyaç vardır. Literatürde, Grunwald-Letnikov, Riemann-Liouville ve M. Caputo tanımları oldukça popülerdir (Shah & Agashe, 2016). Ancak kesirli denetleyicilerin gerçek zamanlı ve sayısal uygulamalarda yakınsama teknikleriyle kullanılması gerekmektedir (Micev et al., 2020). Yakınsama tekniklerinde en popüler Oustaloup yakınsamasıdır (Ayas & Sahin, 2021). Oustaloup yakınsamasının matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir (Oustaloup et al., 2000);

$$s^\alpha \approx \omega_h^\alpha \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_z}{s + \omega_p} \quad \text{for } 0 < \alpha < 1 \quad (22)$$

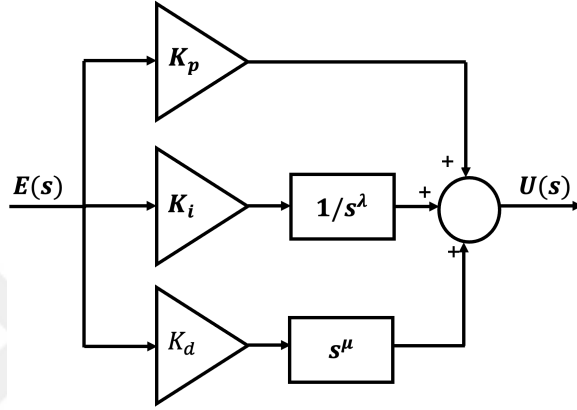
Burada, N kutup çiftleri sayısıdır ve görevi analog filtre derecesini $(2N + 1)$ belirlemektir. Tez çalışmasında, kutup çifti sayısı 5 alınmıştır. ω_z sıfırları, ω_p ise kutupları temsil etmektedir. Sıfırlar ve kutuplar aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$\omega_p = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1+\alpha)}{2N+1}}, \omega_z = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1-\alpha)}{2N+1}} \quad (23)$$

Burada ω_h ve ω_b sırasıyla frekans bandı üst ve alt sınırlarıdır. Çalışmada frekans bandı alt sınırı 10^{-4} rad/s , üst sınır ise 10^4 rad/s olarak tanımlanmıştır. Oustaloup yakınsama yöntemi kullanarak FOPID denetleyicisi transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi tasarlanır;

$$G_{FOPID} = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\mu \quad (24)$$

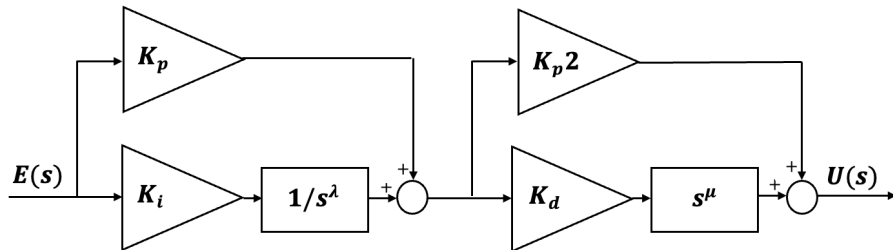
FOPID denetleyicisinin beş adet parametresi; K_p, K_i, K_d, μ ve λ şeklindedir. PID denetleyicilerin sadece üç adet parametre içermesi, sistemde potansiyel olarak daha düşük performansa neden olabilir (Vinagre et al., 2000). FOPID denetleyicisi, beş parametre içermesi sebebiyle PID denetleyicilerine göre daha karmaşık olmasına rağmen daha üstün performans sergiler (Tepljakov et al., 2018). Bu durum, sistemin daha kararlı hale gelmesine katkıda bulunur. FOPID denetleyicisinin blok diyagramı, Şekil 12’deki gibidir;



Şekil 12. FOPID denetleyici blok diyagramı

2.9.3. Kesir Dereceli PI-PD Denetleyici

Kesir dereceli PI-PD denetleyicisi (FOPI-FOPD), iki farklı kesir dereceli denetleyicinin art arda eklenmesiyle oluşturulmuştur. FOPID denetleyicisinde olduğu gibi Oustaloup yakınsama tekniği kullanılmıştır. FOPI-FOPD denetleyicinin blok diyagramı Şekil 13’ deki gibidir;



Şekil 13. FOPI-FOPD denetleyici blok diyagramı

Şekilde görüldüğü üzere FOPI-FOPD denetleyicisinin altı adet parametresi bulunmaktadır. Bu sayede sistem daha kararlı ve verimli yanıt verebilmektedir.

2.10. Amaç Fonksiyonu Tanıtımı

AVR-LFC sistemi için tasarım sürecinin ikinci adımı, performans gereksinimlerini belirlemektir (Moschos & Parisses, 2022). Literatürde, hata tabanlı ‘Mutlak Hatanın Toplamı’(IAE), ‘Hata Karelerin Toplamı’ (ISE), ‘Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı’ (ITAE) ve ‘Zaman Ağırlıklı Hata Karelerinin Toplamı’ (ITSE) gibi amaç fonksiyonları, referans ile sistem çıkışı arasındaki hatayı en aza indirmeyi amaçlar (Ekinci & Hekimoglu, 2019) (Gaing, 2004) (Krohling et al., 2001) (Özbek & Eker, 2019). Amaç fonksiyonun değeri ne kadar az olursa, sistem performansı o kadar iyileştirilmiş olur (Gaing, 2004). Bu yüzden amaç fonksiyonlarının özenle belirlenmesi gerekmektedir. Tez çalışmasında, denetleyici parametrelerinin uygun bir biçimde seçilmesi için literatürde kullanılan amaç fonksiyonlarının yanında Çavdar ve arkadaşları tarafından önerilen amaç fonksiyonu (P_{obj}) da tercih edilmiştir (Cavdar, Dincer, et al., 2023). Yukarıda bahsi geçen amaç fonksiyonlarının matematiksel denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$IAE = \int_0^t |e(t)|dt \quad (25)$$

$$ISE = \int_0^t e^2(t)dt \quad (26)$$

$$ITAE = \int_0^t t|e(t)|dt \quad (27)$$

$$ITSE = \int_0^t te^2(t)dt \quad (28)$$

$$P_{obj} = w_{LFC} * \left(\int_0^t t|e_{LFC}(t)|dt + |Out_{LFCu}| \right) + w_{AVR} * \left(\int_0^t t|e_{AVR}(t)|dt + |Out_{AVRo}| \right) \quad (29)$$

Burada, e hatayı, t hata zamanını, o maksimum aşımını, u minimum aşımını, Out_{LFCu} ve Out_{AVRo} sistem çıkışındaki maksimum saptmayı, w_{LFC} ve w_{AVR} ise birim basamak katsayılarını ifade etmektedir. w_{LFC} ve w_{AVR} sırasıyla 5 ve 1 alınmıştır. Önerilen amaç fonksiyonu, denetleyici girişinden elde edilen bilgiler yardımıyla oluşturulmuştur. Şekil 9'daki ‘AVR-C’ ve ‘LFC-C’ alınan bilgileri ifade etmektedir.

2.11. Kontrol Sistemi Değerlendirme Yöntemleri

2.11.1. Zaman Bölge Analizi

Zaman bölge analizi, bir sistem cevabının zaman içinde nasıl değiştiğini inceleyen bir yöntemdir. Bu analiz, geçici cevapları ve sabit durum hatalarını araştırır. Zaman bölge analizi, bir sistemin zaman içindeki yanıtını gözlemlemek ve anlamak için son derece önemlidir. Bu analiz yöntemi, literatürde ve mühendislik alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

2.11.2. Gürbüzlük Analizi

Güç sistemleri parametreleri yük değişimi, modelleme hataları ve çevresel koşullar sebebiyle belirsizleşebilir ve bozulabilir (Shayeghi et al., 2009). Bu bozulmalar parametrelerin değişmesine sebep olur. Değişiklik sonucu, sistemin dinamik performansında azalmalar oluşabilir ve sistem kararlılığı bozulabilir (Golnaraghi & Benjamin C.Kuo, 2017). Bu sebeple, sistemde kullanılan denetleyicinin kararlılık açısından başarılı bir performans sergilemesi beklenir (Cavdar, Sahin, et al., 2023). Gürbüzlük analizi, sistemlerin gerçek zamanda zor durumlar altında dayanıklılığını test etmek için önemlidir (Azzam & Mohamed, 2002).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Algoritmaların Karşılaştırılması

Tezin bu kısmında, geliştirilen FDB-ZOA algoritmasının performansı, rakip meta-sezgisel algoritmalarla karşılaştırılarak test edilmiştir. Test için FDB-ZOA dahil olmak üzere on iki farklı meta-sezgisel algoritma, benchmark problemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler, otuz dokuz adet benchmark problemi üzerinde her biri elli bir kez çalıştırılarak ve üç farklı problem boyutu için sonuçlar elde edilmiştir. CEC problemleri için on iki adet meta-sezgisel algoritmanın 30, 50 ve 100 boyutlarına ait Friedman sonuçları Tablo 8’de verilmiştir;

Tablo 8. FDB-ZOA ve rakip meta-sezgisel algoritmalar için Friedman skorları

Algoritma	Boyut=30		Boyut=50		Boyut=100	
	CEC17	CEC20	CEC17	CEC20	CEC17	CEC20
FDB-ZOA	4,09	4,24	4,122	4,092	5,323	4,161
ZOA	9,086	8,575	9,31	8,429	10,004	8,381
AEO	4,504	4,355	4,829	4,629	5,056	6,038
WHO	4,299	4,930	4,485	4,716	5,136	4,575
PSO	5,059	5,138	4,993	5,428	6,135	5,718
FPA	7,651	5,648	4,949	5,853	5,844	5,718
GWO	5,796	6,018	5,948	5,835	6,56	7,612
DE	4,912	6,538	5,804	7,051	6,335	5,312
IWO	8,064	7,02	8,029	6,53	7,618	5,332
SPO	6,947	7,893	7,919	8,502	5,68	8,865
WOA	9,332	8,7	9,145	8,408	5,56	7,638
FFA	8,254	8,94	8,462	8,52	8,742	8,644

Tabloya göre en iyi üç algoritma sırasıyla FDB-ZOA, WHO ve AEO’dur. FDB-ZOA algoritması on iki rakip algoritma sıralamasında birinci sırada yer alırken, ZOA algoritması onuncu sırada bulunmaktadır. İkisi arasındaki bu büyük ortalama fark, FDB metodunun algoritmayı iyileştirdiğini göstermektedir.

Friedman test sonuçlarına göre, boyutların (D=30, 50 ve 100) ve benchmark problem paketlerinin (CEC17, CEC20) farklılığından dolayı, algoritmaların sıralamaları her boyutta değişmiştir. Örneğin AEO algoritması, 100 boyut için CEC17 problem paketinde birinci olmasına rağmen 30 ve 50 boyutlarda FDB-ZOA algoritmasının gerisinde kalmıştır. WHO

algoritması genelde konumunu korumuştur. Bu durum, WHO algoritmasının çalışmalarda istikrarlı bir performans sergilediğini kanıtlar. Önerilen FDB-ZOA algoritması, altı çalışmanın beşinde birinci olarak güçlü bir performans sergilemiştir. Ek olarak, CEC20 problem paketinde FDB-ZOA algoritması, diğer algoritmalarla kıyasla çok daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Önerilen FDB-ZOA algoritmasının performansını değerlendirmek için, Friedman testine ek olarak literatürde yaygın olarak kullanılan Wilcoxon testi de kullanılmıştır. Rakip algoritmaların Wilcoxon test sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. FDB-ZOA ve rakip meta-sezgisel algoritmalar için Wilcoxon sonuçları

FDB-ZOA vs. +/-/-	Boyut=30		Boyut=50		Boyut=100	
	CEC17	CEC20	CEC17	CEC20	CEC17	CEC20
ZOA	0/2/27	0/2/8	0/2/27	0/2/8	0/2/27	0/2/8
AEO	9/8/12	3/4/3	9/5/15	3/2/5	12/8/9	2/2/6
WHO	7/13/9	3/4/3	6/11/12	3/4/3	9/11/9	3/5/2
PSO	5/7/17	2/4/4	5/5/19	1/1/8	10/2/17	2/1/7
FPA	0/3/26	2/2/6	7/4/18	2/1/7	8/6/15	2/2/6
GWO	7/8/14	2/3/5	10/6/13	2/3/5	11/4/14	1/1/8
DE	11/7/11	2/3/5	10/6/13	2/3/5	13/3/13	4/2/4
IWO	5/5/19	3/2/5	3/6/20	2/3/5	7/4/18	3/2/5
SPO	2/4/13	0/3/7	0/8/21	0/2/8	12/7/10	1/1/8
WOA	0/2/27	0/1/9	0/2/27	0/2/8	10/8/11	0/2/8
FFA	1/3/25	0/1/9	3/4/22	0/2/8	6/2/21	2/1/7

Tablo 9 incelendiğinde Wilcoxon testinde sunulan istatistikler, rakip algoritmaların FDB-ZOA algoritmasına göre sırasıyla daha iyi, eşit ve daha kötü (+/=/-) performans gösterdiği üç bölümden meydana gelir. Örneğin, PSO algoritması 30 boyutlu CEC17 benchmark problem paketlerinde önerilen FDB-ZOA algoritmasına kıyasla beş problemde daha başarılı olmuştur, yedi problemde berabere kalmıştır. Ancak on yedi problemde daha kötü bir sonuç vermiştir.

Sonuç olarak, Friedman test sonuçlarına göre ZOA algoritması son sıralarda yer almasına rağmen, geliştirilmiş versiyonunun on iki algoritma arasında en iyi olduğu görülmüştür. Wilcoxon test sonuçlarına göre ise, tüm algoritmalarla çok daha üstün olduğu kanıtlanmıştır.

3.2. Ortalama ve Standart Sapma

Algoritma geliştirilmesinde hata değerlerinin standart sapma ve ortalama analizi, algoritmanın yetenekleri hakkında çok sayıda bilgi sağlar. Bu, algoritmaların performansını karşılaştırmayı kolaylaştırır. Bu analiz yöntemleri CEC20 ve CEC17 için ayrı ayrı ele alınmıştır. CEC20 için hata değerlerinin ortalama ve standart sapma sonuçları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. CEC20 benchmark problemleri için ortalama ve standart sapma

Fonksiyon	Boyut	FDB-ZOA		ZOA	
		Standart Sapma	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama
F1	30	4,69E+04	1,73E+04	5,31E+09	9,03E+09
	50	8,02E+03	5,90E+03	7,53E+09	2,74E+10
	100	3,12E+07	4,47E+06	1,50E+10	8,82E+10
F2	30	3,39E+02	2,75E+03	3,68E+02	3,49E+03
	50	4,53E+02	5,71E+03	5,70E+02	6,84E+03
	100	6,57E+02	1,29E+04	7,16E+02	1,49E+04
F3	30	4,68E+01	2,17E+02	6,81E+01	4,16E+02
	50	8,55E+01	5,60E+02	7,74E+01	8,71E+02
	100	1,65E+02	1,96E+03	1,14E+02	2,46E+03
F4	30	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	50	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	100	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
F5	30	3,77E+05	2,92E+05	9,37E+06	6,39E+06
	50	6,76E+05	7,20E+05	2,00E+07	1,83E+07
	100	9,47E+05	1,12E+06	2,75E+07	5,05E+07
F6	30	1,45E+02	4,28E+02	3,33E+02	9,51E+02
	50	2,98E+02	1,48E+03	6,75E+02	2,64E+03
	100	8,16E+02	4,79E+03	1,30E+03	8,03E+03
F7	30	6,95E+04	8,42E+04	2,77E+06	1,61E+06
	50	2,25E+05	3,28E+05	4,66E+06	4,16E+06
	100	2,38E+06	1,78E+06	1,50E+07	2,07E+07
F8	30	4,35E+02	1,66E+02	1,31E+03	2,97E+03
	50	1,52E+03	5,69E+03	5,78E+02	7,60E+03
	100	8,52E+02	1,49E+04	1,29E+03	1,76E+04
F9	30	3,75E+01	5,46E+02	1,06E+02	1,05E+03
	50	8,98E+01	8,57E+02	1,41E+02	1,71E+03
	100	2,80E+02	2,47E+03	4,49E+02	4,92E+03
F10	30	1,57E+01	3,97E+02	1,61E+02	6,96E+02
	50	3,58E+01	5,51E+02	8,98E+02	2,48E+03
	100	6,35E+01	8,10E+02	1,57E+03	6,38E+03

Tablo 10’ da en iyi değerler koyu renkle belirtilmiştir. FDB-ZOA algoritmasının temel ZOA’ ya kıyasla daha az hata değerleri verdiği görülmektedir. Tablo 11’ de ise CEC17 için hata değerlerinin ortalaması ve standart sapma sonuçları sunulmuştur.

Tablo 11. CEC17 benchmark problemleri için ortalama ve standart sapma

Fonksiyon	Boyut	FDB-ZOA		ZOA	
		Standart Sapma	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama
F1	30	1,73E+05	4,75E+04	3,84E+09	8,46E+09
	50	5,56E+03	5,83E+03	7,38E+09	2,69E+10
	100	4,81E+05	1,04E+05	1,42E+10	8,61E+10
F2	30	0,00E+00	-2,00E+02	0,00E+00	-2,00E+02
	50	0,00E+00	-2,00E+02	0,00E+00	-2,00E+02
	100	0,00E+00	-2,00E+02	0,00E+00	-2,00E+02
F3	30	2,13E+00	5,22E-01	8,05E+03	2,29E+04
	50	2,62E+02	1,09E+02	1,25E+04	5,80E+04
	100	8,84E+03	2,74E+04	2,02E+04	1,78E+05
F4	30	3,10E+01	6,12E+01	7,68E+02	8,92E+02
	50	4,77E+01	9,22E+01	1,75E+03	3,71E+03
	100	5,04E+01	2,66E+02	3,15E+03	1,04E+04
F5	30	2,36E+01	1,03E+02	2,83E+01	1,93E+02
	50	3,02E+01	2,40E+02	3,29E+01	3,40E+02
	100	5,16E+01	6,86E+02	5,03E+01	8,74E+02
F6	30	6,22E+00	2,51E+01	6,62E+00	4,91E+01
	50	5,29E+00	4,34E+01	4,55E+00	6,09E+01
	100	3,69E+00	5,83E+01	3,38E+00	6,79E+01
F7	30	6,00E+01	2,23E+02	6,94E+01	4,21E+02
	50	9,66E+01	5,75E+02	8,56E+01	8,74E+02
	100	1,73E+02	1,92E+03	1,00E+02	2,45E+03
F8	30	1,72E+01	8,51E+01	2,36E+01	1,39E+02
	50	3,99E+01	2,49E+02	4,38E+01	3,54E+02
	100	7,77E+01	7,64E+02	8,85E+01	1,00E+03
F9	30	4,54E+02	1,52E+03	6,28E+02	3,15E+03
	50	1,50E+03	7,13E+03	1,49E+03	1,14E+04
	100	2,16E+03	2,22E+04	1,96E+03	2,68E+04
F10	30	3,33E+02	2,96E+03	4,24E+02	3,68E+03
	50	4,48E+02	5,38E+03	4,67E+02	6,42E+03
	100	7,21E+02	1,29E+04	6,77E+02	1,45E+04
F11	30	3,77E+01	1,26E+02	8,43E+02	8,68E+02
	50	5,31E+01	1,97E+02	1,86E+03	3,04E+03
	100	2,28E+02	1,11E+03	1,17E+04	3,78E+04
F12	30	4,74E+05	2,84E+05	8,28E+08	5,12E+08
	50	1,69E+06	1,98E+06	6,21E+09	8,86E+09
	100	5,54E+06	7,99E+06	1,38E+10	3,53E+10

Tablo 11'in devamı

F13	30	4,51E+04	4,78E+04	4,81E+08	1,87E+08
	50	2,44E+04	1,53E+04	4,22E+09	2,46E+09
	100	2,50E+04	1,91E+04	3,76E+09	6,57E+09
F14	30	3,88E+03	3,94E+03	4,30E+05	3,20E+05
	50	5,26E+04	6,44E+04	1,12E+06	1,08E+06
	100	4,76E+05	6,79E+05	3,85E+06	5,84E+06
F15	30	3,05E+04	3,90E+04	4,34E+06	1,69E+06
	50	6,91E+04	2,52E+04	5,14E+08	1,95E+08
	100	5,80E+03	4,50E+03	2,24E+09	2,47E+09
F16	30	1,78E+02	8,31E+02	3,27E+02	1,32E+03
	50	3,10E+02	1,48E+03	5,34E+02	2,24E+03
	100	6,81E+02	4,66E+03	1,42E+03	6,80E+03
F17	30	1,15E+02	2,54E+02	2,74E+02	7,06E+02
	50	2,08E+02	1,06E+03	4,01E+02	1,87E+03
	100	5,05E+02	3,34E+03	2,73E+04	1,83E+04
F18	30	1,20E+05	1,59E+05	2,58E+06	2,02E+06
	50	5,71E+05	6,02E+05	9,94E+06	7,46E+06
	100	1,19E+06	1,63E+06	3,65E+06	4,65E+06
F19	30	4,64E+05	2,16E+05	4,98E+06	2,01E+06
	50	2,39E+05	7,04E+04	2,63E+08	9,48E+07
	100	6,48E+03	6,37E+03	1,55E+09	1,99E+09
F20	30	6,31E+01	2,83E+02	8,75E+01	3,90E+02
	50	1,48E+02	6,74E+02	1,99E+02	8,29E+02
	100	2,89E+02	2,36E+03	3,07E+02	2,64E+03
F21	30	2,24E+01	2,97E+02	4,03E+01	3,85E+02
	50	4,14E+01	4,39E+02	4,72E+01	6,22E+02
	100	1,03E+02	1,09E+03	1,48E+02	1,64E+03
F22	30	6,02E+02	2,26E+02	1,33E+03	3,30E+03
	50	1,53E+03	5,71E+03	7,77E+02	7,50E+03
	100	7,21E+02	1,46E+04	1,09E+03	1,75E+04
F23	30	5,58E+01	5,22E+02	1,26E+02	9,20E+02
	50	8,83E+01	8,46E+02	1,86E+02	1,59E+03
	100	1,55E+02	1,76E+03	3,18E+02	3,43E+03
F24	30	3,88E+01	5,50E+02	8,48E+01	1,03E+03
	50	7,86E+01	8,34E+02	1,44E+02	1,69E+03
	100	3,01E+02	2,45E+03	4,45E+02	4,92E+03
F25	30	1,70E+01	3,97E+02	1,26E+02	6,75E+02
	50	3,84E+01	5,53E+02	7,00E+02	2,25E+03
	100	6,50E+01	8,24E+02	1,62E+03	6,06E+03
F26	30	1,06E+03	2,41E+03	9,67E+02	5,45E+03
	50	2,06E+03	5,42E+03	8,34E+02	1,01E+04
	100	4,22E+03	1,89E+04	2,09E+03	3,00E+04
F27	30	2,56E+01	5,54E+02	1,95E+02	1,19E+03
	50	1,40E+02	9,36E+02	5,06E+02	2,84E+03
	100	2,10E+02	1,31E+03	8,98E+02	6,55E+03

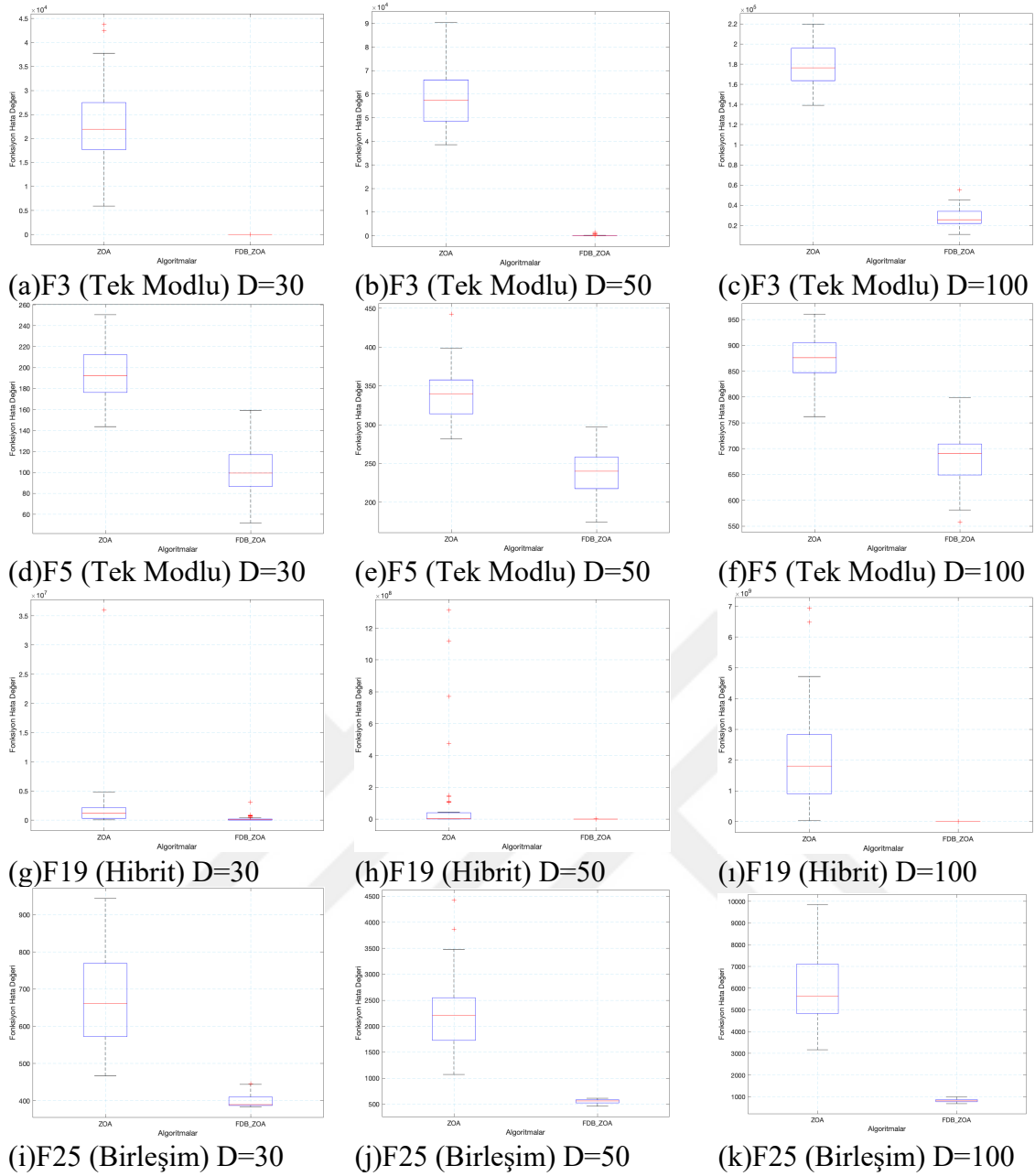
Tablo 11'in devamı

F28	30	5,60E+01	3,47E+02	4,02E+02	1,08E+03
	50	3,19E+01	5,04E+02	6,94E+02	2,79E+03
	100	3,83E+01	6,11E+02	1,69E+03	9,12E+03
F29	30	2,18E+02	9,83E+02	4,76E+02	1,98E+03
	50	4,50E+02	1,94E+03	1,10E+03	4,85E+03
	100	1,18E+03	6,03E+03	3,46E+03	1,19E+04

Tablo 11' deki en iyi değerler koyu renkle belirtilmiştir. FDB-ZOA'nın CEC17 benchmark problemlerinde de başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Hata değerlerini daha iyi gözlemleyebilmek için Bölüm 3.3' te kutu grafikleri sunulmuştur.

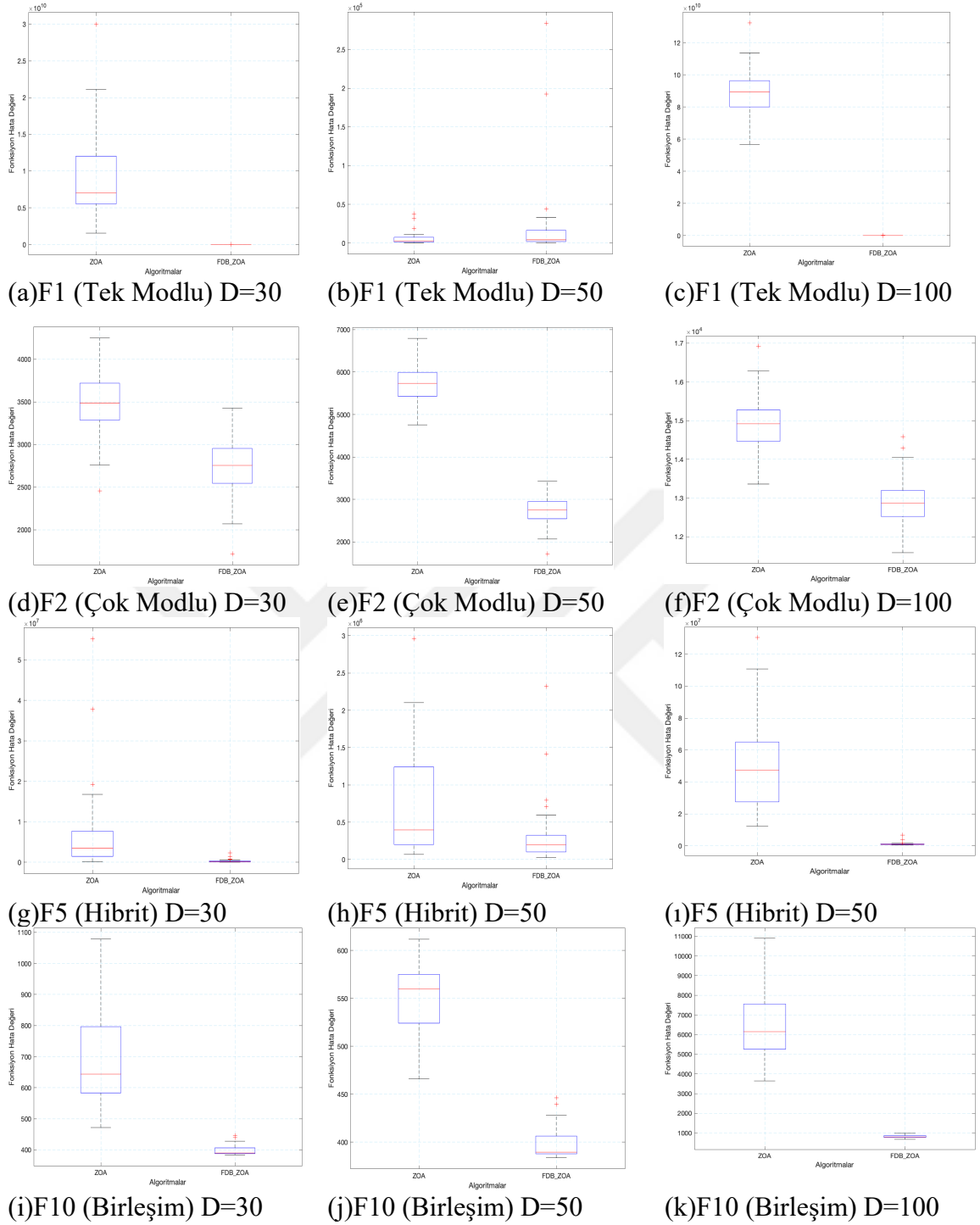
3.3. Kutu Grafiği

Kutu grafiği, Amerikalı matematikçi John W. tarafından üretilen ve verilerin yayılma derecesini ölçen bir görselleştirme metodudur (Li et al., 2016). Bu yöntem, istatistik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir veri analiz aracıdır. FDB-ZOA algoritmasının hata değerlerini daha iyi gözlemleyebilmek için kutu grafiği yöntemi kullanılmıştır. CEC17 ve CEC20 benchmark problem paketlerinin fonksiyonları için 30, 50 ve 100 boyutlarında hata değerleri ile kutu grafiği oluşturulmuştur. Şekil 14' te, CEC17 için tek modlu (3. Fonksiyon), çok modlu (5. Fonksiyon), hibrit (19. Fonksiyon) ve birleşim (25. Fonksiyon) fonksiyonlarının 30, 50 ve 100 boyuttaki kutu grafikleri sunulmuştur.



Şekil 14. CEC17 benchmark problemleri için kutu grafiği çizimleri

Şekil 14 incelendiğinde geliştirilen FDB-ZOA algoritmasının temel algoritmaya göre belirgin bir üstünlük sağladığı görülmektedir. Şekil 15’ te, CEC20 için tek modlu (1. Fonksiyon), çok modlu (2. Fonksiyon), hibrit (5. Fonksiyon) ve birleşim (10. Fonksiyon) fonksiyonlarının 30, 50 ve 100 boyuttaki kutu grafikleri çizilmiştir.



Şekil 15. CEC20 benchmark problemleri için kutu grafiği çizimleri

Şekil 15'e bakıldığında FDB-ZOA algoritmasının, CEC20 benchmark problemlerinde ZOA algoritmasına çok daha başarılı olduğunu görülmüştür.

3.4. Yakınsama Eğrileri

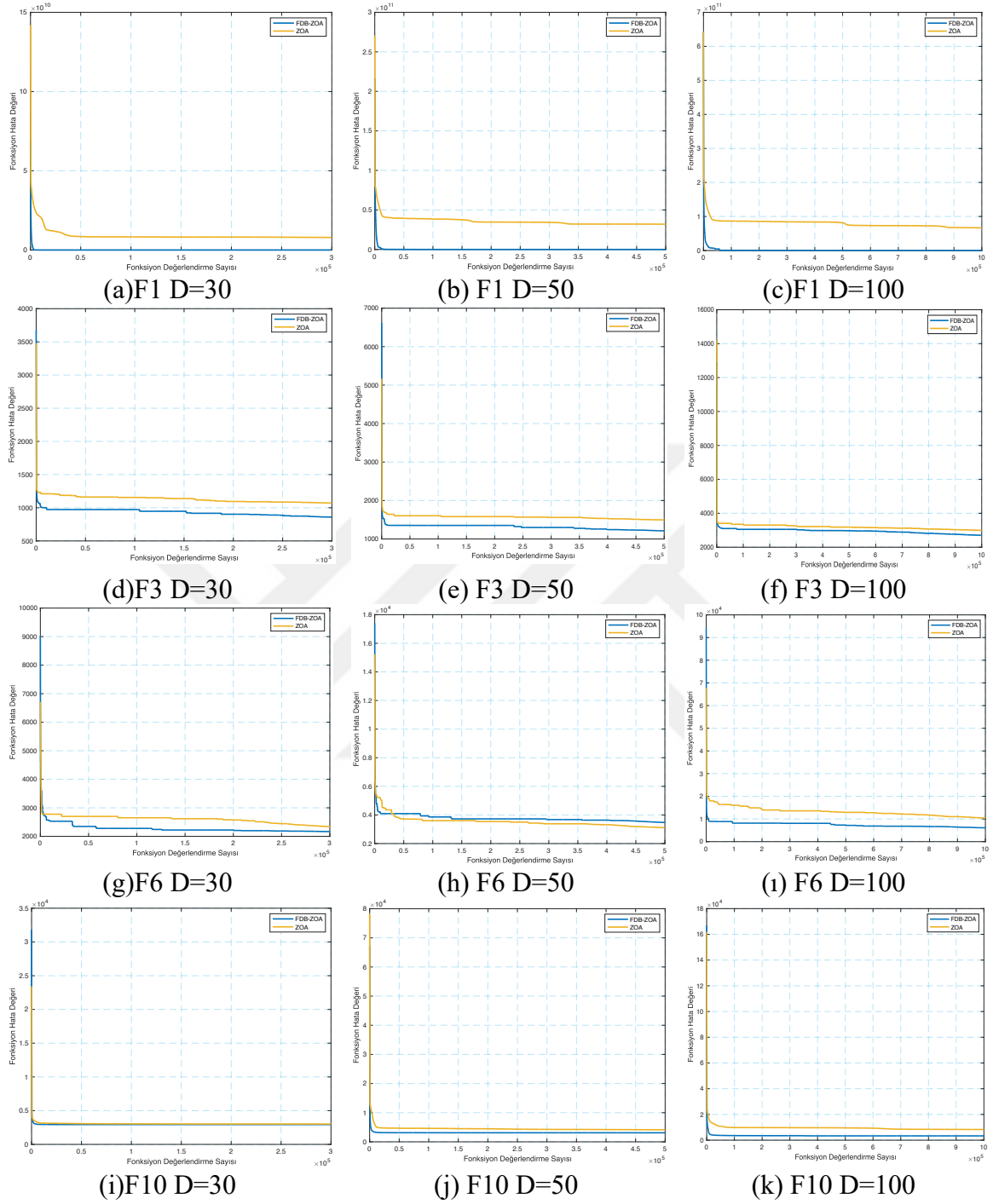
Yakınsama eğrisi, optimizasyon süreci boyunca ya da iterasyona bağlı olarak çözüm arayışında nasıl ilerleme kaydettiğini gösteren bir grafiktir. Bu eğrilerin amacı algoritmanın performansını ve hızını değerlendirmektir. Grafikte, yatay eksen iterasyonu veya zamanı temsil ederken, dikey eksen ise hata oranını temsil eder. Şekil 16’ da CEC17 için tek modlu (1. Fonksiyon), hibrit (12. ve 15. Fonksiyon) ve birleşim (29. Fonksiyon) fonksiyonların yakınsama eğrileri verilmiştir;





Şekil 16. CEC17 benchmark problemleri için yakınsama eğrileri çizimleri

Şekil 16’ da görülebileceği gibi geliştirilmiş FDB-ZOA algoritması, temel ZOA’ ya göre sıfıra yakın bir değere yaklaşmıştır. Bu da FDB seçim yönteminin ZOA algoritmasında başarılı bir şekilde uyarlandığını ve arama kabiliyeti performansını güçlendirdiğini göstermektedir. Şekil 17’ de CEC20 için tek modlu (1. Fonksiyon), basit (3. Fonksiyon), hibrit (6. Fonksiyon), ve birleşim (10. Fonksiyon) fonksiyonlarının yakınsama eğrileri sunulmuştur.



Şekil 17. CEC20 benchmark problemleri için yakınsama eğrileri çizimleri

CEC17 benchmark problemlerinde olduğu gibi, CEC20 problemlerinde de FDB-ZOA algoritması, ZOA algoritmasına kıyasla daha üstün bir performans göstermiştir. Boyut arttıkça, algoritmalar arasındaki performans farkları daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, sistemin karmaşık problemler karşısında iyileştirilmiş performans sunduğunu göstermektedir.

3.5. Kontrol Sistemleri ve Probleminin Sonuçları

3.5.1. Zaman-Bölge Analizi

AVR-LFC sisteminde kontrol parametrelerinin alt ve üst sınır değer aralıklarını belirlemek, optimizasyon sürecini test edebilmek için gereklidir. Alt ve üst sınır değerleri için (Cavdar, Dincer, et al., 2023) çalışması referans alınmıştır. Denetleyicilerin alt ve üst sınırları Tablo 12’ de verilmiştir.

Tablo 12. Denetleyiciler için alt ve üst sınır limitleri

LFC						AVR					
K_{p1}	K_{i1}	K_{d1}	K_{p12}	λ_1	μ_1	K_{p2}	K_{i2}	K_{d2}	K_{p22}	λ_2	μ_2
0,01-10	0,01-10	0,01-10	0,01-10	0,1-1,5	0,1-1,5	0,01-2	0,01-2	0,01-2	0,01-2	0,1-1,5	0,1-1,5

Tablo 12’ de belirtildiği gibi, LFC sistemleri için parametre değeri aralığı 0 ile 10 arasında iken AVR sistemleri için 0 ile 2 arasında seçilmektedir (Cavdar, Dincer, et al., 2023). Optimizasyon süresi boyunca ITAE, ITSE, IAE, ISE ve P_{obj} amaç fonksiyonları için Tablo 12’ deki sınırlar içerisinde çalıştırılmıştır.

FDB-ZOA ve temel ZOA algoritması için PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerinden elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 13, Tablo 14 ve Tablo 15’te sunulmuştur.

Tablo 13. PID denetleyicisi için parametre değerleri

	ZOA					FDB-ZOA				
Amaç Fonk.	IAE	ISE	ITAE	ITSE	P_{obj}	IAE	ISE	ITAE	ITSE	P_{obj}
K_{p1}	1,594	9,999	9,877	9,994	2,777	1,898	10	9,734	10	1,539
K_{i1}	9,999	9,999	10	9,999	10	9,999	10	10	10	10
K_{d1}	5,409	9,999	3,491	7,454	9,395	5,182	9,999	3,401	8,001	7,982
K_{p2}	1,999	1,999	1,838	1,999	1,317	2	1,999	1,827	2	1,31
K_{i2}	1,062	1,999	0,994	1,253	0,678	1,065	1,999	0,989	1,252	0,675
K_{d2}	0,834	1,729	0,625	1,054	0,452	0,832	1,729	0,619	1,051	0,448
Amaç Fonk. Değeri	0,342	0,153	0,083	0,0209	0,319	0,342	0,153	0,083	0,448	0,318

Tablo 14. FOPID denetleyicisi için parametre değerleri

Amaç Fonksiyonu Değeri	μ_2	λ_2	K_{d2}	K_{i2}	K_{p2}	μ_1
0,311105	1,08491	1,00011	0,82475	1,00639	1,99999	0,55006
0,068738	1,48346	0,81560	1,75609	1,45866	1,69525	0,54854
0,090549	1,02725	1,00023	0,76406	0,96395	1,87972	0,89922
0,016239	1,11187	0,93269	1,05568	1,35035	1,99999	0,62261
0,349515	1,08997	1,00032	0,69652	0,97315	1,95660	0,71417
0,299855	1,08780	1,00169	0,72543	0,99097	2	1,01989
0,062842	1,48512	1,11671	1,91369	1,99763	1,98749	0,83340
0,065774	1,03618	1,00032	0,71348	1,05713	2	1,09761
0,015943	1,10178	0,92339	1,09533	1,42106	1,99991	0,63907
0,277768	1,05978	1,00039	0,59455	0,86768	1,72393	1,11722

Tablo 14'ün devamı

Amaç Fonksiyonu	K_{p1}	K_{i1}	K_{d1}	λ_1
ZOA	IAE	6,17373	9,10686	6,09466
	ISE	7,02128	5,25424	2,62794
	ITAE	7,46098	8,49455	3,78584
	ITSE	6,04203	9,09824	6,12916
	P_{obj}	7,03228	8,54763	6,72667
FDB-ZOA	IAE	9,99944	10	3,68607
	ISE	9,60215	9,96938	8,26198
	ITAE	9,57382	9,99998	2,84938
	ITSE	9,98914	9,99759	9,97413
	P_{obj}	4,09621	9,99507	9,99592

Tablo 15. FOPI-FOPD denetleyicisi için parametre değerleri

K_{p12}	λ_1	μ_1	K_{p2}	K_{i2}	K_{d2}	K_{p22}	λ_2	μ_2	Amaç Fonksiyonu Değeri
9,99991	1,00002	1,08816	1,99999	1,10087	0,61768	1,99999	1,00001	1,36423	0,166353
7,68681	0,96589	0,79887	1,78210	1,54813	1,10022	1,84620	1,04989	1,49306	0,061433
2,63451	1,04054	0,91821	1,99568	1,24196	0,69067	1,99020	0,99975	1,23063	0,076157
7,89101	1,12022	0,91769	1,39654	1,57168	1,21952	1,89949	0,99960	1,48737	0,003965
3,69271	0,98960	1,233642	0,69097	1,39690	0,75965	0,54283	1,00062	0,99378	0,18234
9,98456	0,99979	0,99845	2	1,10308	0,63314	2	1,00003	1,36527	0,166142
6,58944	0,92706	1,04806	1,97595	1,53017	0,99149	1,98765	1,15802	1,49482	0,060765
9,99324	0,99966	1,13522	1,34264	0,84000	0,72878	1,81364	0,99992	1,15368	0,049163
8,26820	0,98114	1,07936	1,98071	1,70662	0,83680	2	1,02652	1,49227	0,003615
9,99906	0,99198	1,28454	1,30757	0,82175	0,51373	1,27506	0,99998	1,13155	0,084297

Tablo 15'in devamı

Amaç Fonksiyonu	K_{p1}	K_{i1}	K_{d1}
IAE	9,69237	9,99420	3,88880
ISE	6,72382	7,24202	6,96870
ITAE	4,99575	4,96425	5,76448
ITSE	6,15102	4,85150	7,24337
P_{obj}	4,54991	8,21828	6,35232
IAE	8,61072	9,87467	9,54124
ISE	5,84544	9,80320	7,20890
ITAE	5,81086	9,88736	2,05049
ITSE	4,43989	5,85447	4,95723
P_{obj}	10	9,99259	10
ZOA			
FDB-ZOA			

IAE amaç fonksiyonunda, geliştirilmiş FDB-ZOA algoritması, FOPI-FOPD ve FOPID denetleyicilerinde ZOA algoritmasına kıyasla daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. Ancak PID denetleyicisinde ise benzer bir performans sergilemiştir. FDB-ZOA algoritması daha fazla parametre içeren denetleyicilerde başarılı sonuçlar verdiğini ve algoritmanın performansının iyileştirilebileceğini göstermektedir.

FDB-ZOA, ISE amaç fonksiyonunda, IAE amaç fonksiyonunda olduğu gibi iki denetleyicide başarılı performans göstermiş, ancak PID denetleyicisinde benzer bir yanıt göstermiştir. Yine de ISE amaç fonksiyonunun hata değeri, IAE'ye kıyasla daha düşüktür.

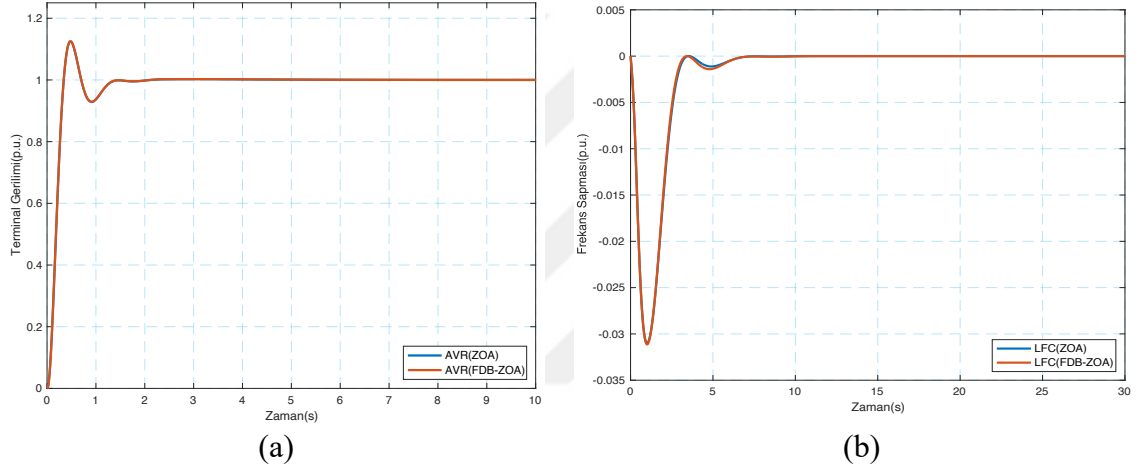
ITAE amaç fonksiyonunda, FDB-ZOA algoritması, FOPI-FOPD ve FOPID denetleyicilerine kıyasla ZOA algoritmasından belirgin bir şekilde daha üstün performans sergilenmiştir. Ancak, PID denetleyicisinde her iki algoritma da benzer sonuçlar vermiştir. Sonuçlara bakıldığında, optimize edilen parametre sayısı arttıkça FDB-ZOA algoritmasının performansı daha belirgin hale gelmiştir.

ITSE amaç fonksiyonunda, FDB-ZOA algoritması, FOPI-FOPD ve FOPID denetleyicilerine kıyasla daha üstün performans sergilemiştir. Ancak elde edilen hata değerlerindeki sayısal fark, ITSE'nin sisteme uygun olmadığını göstermektedir. PID

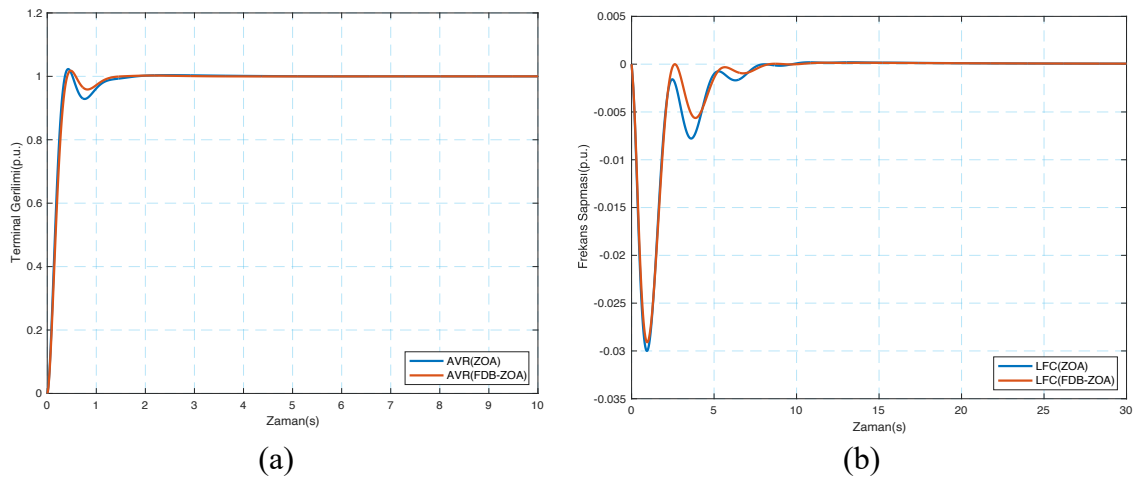
denetleyicisinde ise diğer üç amaç fonksiyonunda olduğu gibi, iki algoritma benzer performans göstermiştir.

P_{obj} amaç fonksiyonunda, FDB-ZOA algoritması ile optimize edilmiş FOPI-FOPD, FOPID ve PID denetleyicilerin, ZOA algoritmasına kıyasla çok daha üstün performans göstermiştir. FDB-ZOA algoritması, gözle görülebilir farkla performansında iyileşme olduğu açıkça görülmektedir.

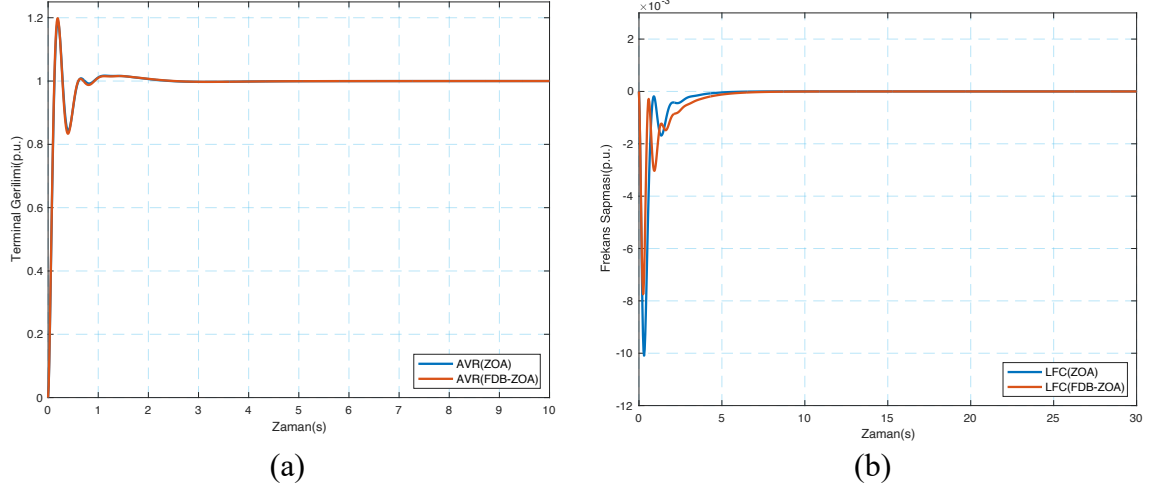
Bu çalışmada, FDB-ZOA algoritmasının performansını ZOA ile karşılaştırmak amacıyla tüm amaç fonksiyonlarının zaman bölge grafiği çizilmiştir. Öncelikle, IAE amaç fonksiyonunun geçici yanıtları Şekil 18, 19 ve 20’ de sunulmuştur.



Şekil 18. PID denetleyicide IAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



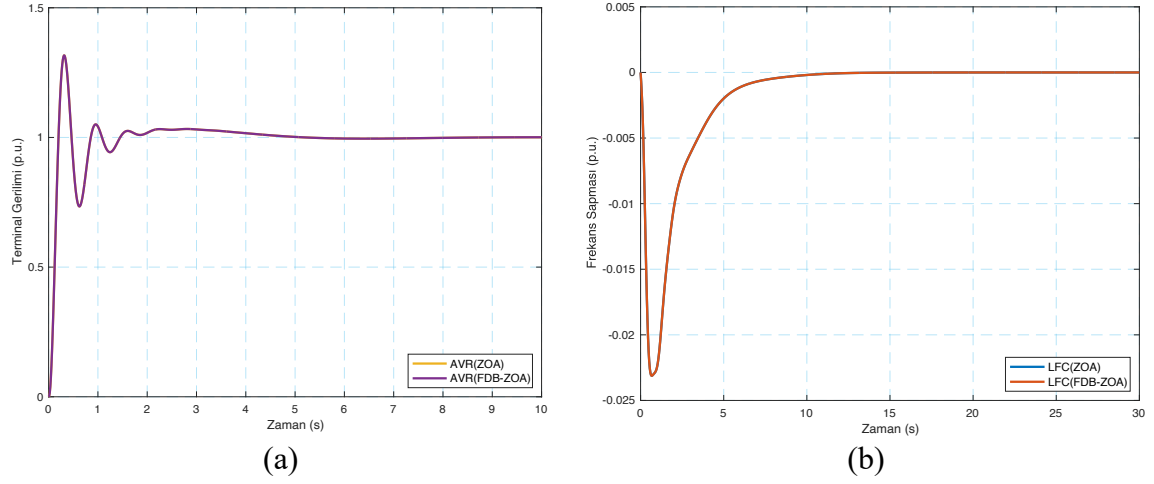
Şekil 19. FOPID denetleyicide IAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



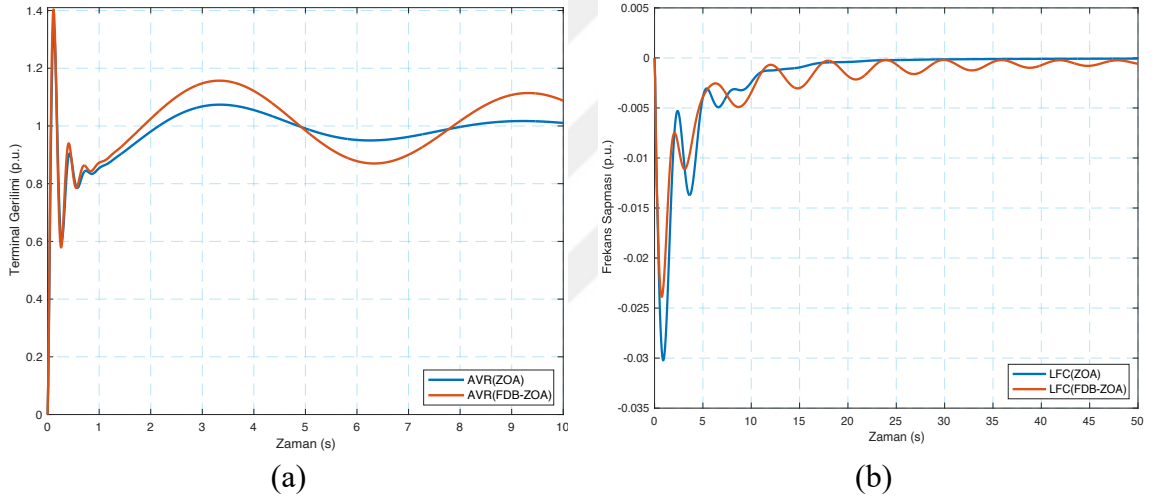
Şekil 20. FOPI-FOPD denetleyicide IAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları

PID denetleyicisinde hem AVR hem de LFC’de iki algoritmanın da benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. PID denetleyicisinin az parametre içermesi, belirgin bir fark oluşmamıştır. FOPID denetleyicinin AVR kısmında, FDB-ZOA algoritması, ZOA algoritmasına göre kısa sürede ve daha az aşım ile kararlılığa ulaşmıştır. LFC kısmında da AVR kısmındaki sonuçlar geçerlidir. Bu sonuçlar, denetleyicinin matematiksel ifadesi daha karmaşık olmasına rağmen algoritmanın daha yüksek performansla çalıştığını göstermektedir. FOPI-FOPD denetleyicisinin AVR kısmında, iki algoritma benzer yanıtlar vermiştir. Geçici yanıtta aşım fazla olsa da referans değerine ulaşmayı başarmıştır. LFC kısmında ise, FDB-ZOA algoritması, ZOA algoritmasına göre daha az aşım ile referans değerine ulaşmıştır.

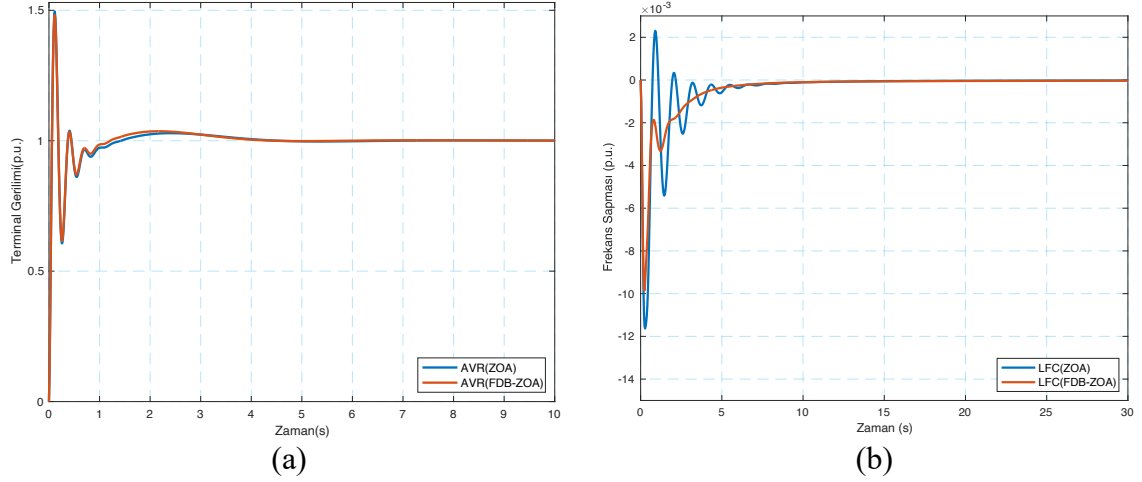
Şekil 21, 22 ve 23’ te ISE amaç fonksiyonu için geçici yanıtları göstermektedir.



Şekil 21. PID denetleyicide ISE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



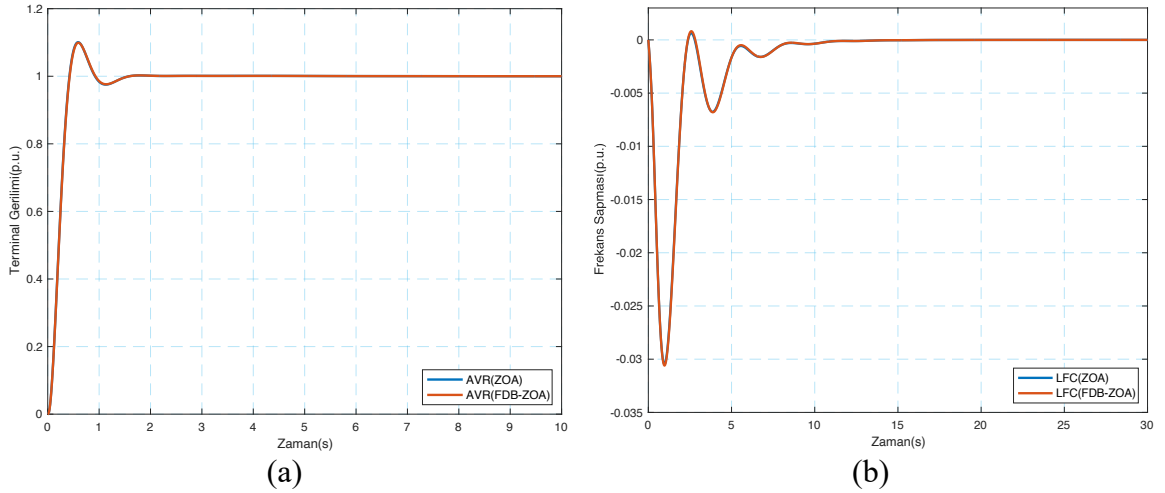
Şekil 22. FOPID denetleyicide ISE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



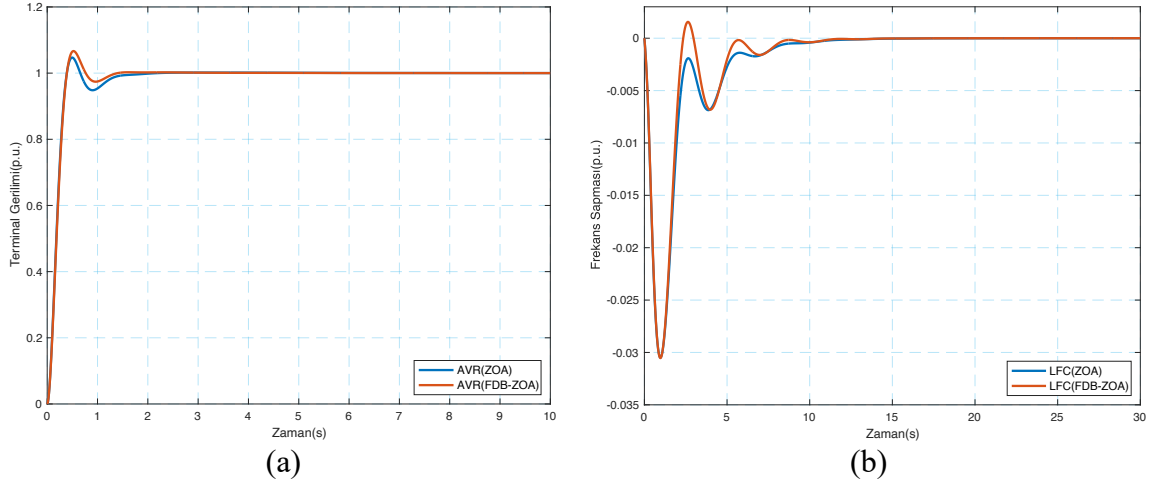
Şekil 23. FOPI-FOPD denetleyicide ISE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları

FOPID denetleyicisinde çıkış sinyali hem AVR hem de LFC kısmında kalıcı hal hatası meydana gelmiştir. FOPI-FOPD denetleyicisi AVR kısmında benzer sonuçlar vermesine rağmen LFC kısmında FDB-ZOA algoritması, ZOA algoritmasında meydana gelen dengesiz salınımlar nedeniyle daha başarılı sonuç vermiştir. PID denetleyicisinde ise her iki kısmında da iki algoritma benzer sonuçlar vermiştir.

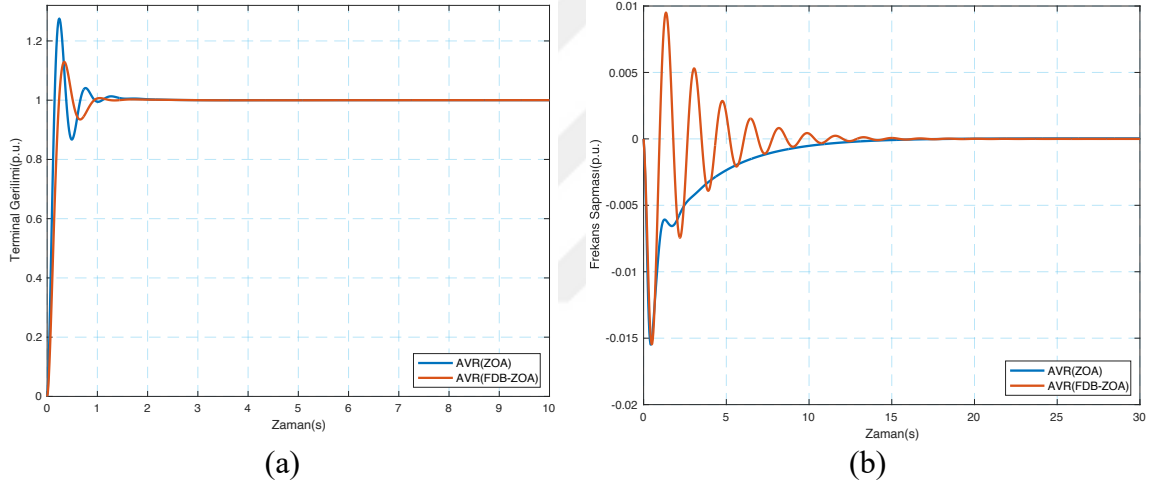
Şekil 24, 25 ve 26’ da ITAE amaç fonksiyonunda üç denetleyici için geçici yanıtlar verilmiştir.



Şekil 24. PID denetleyicide ITAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



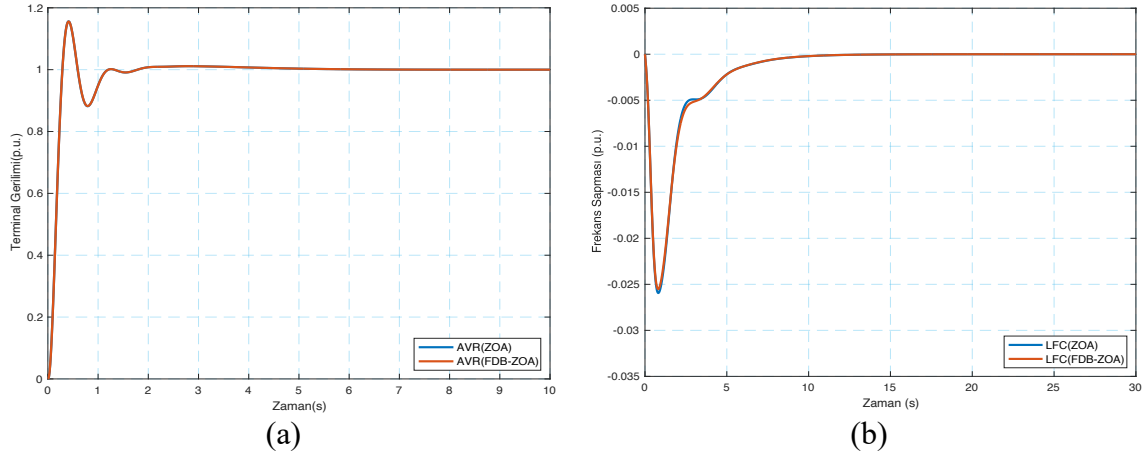
Şekil 25. FOPID denetleyicide ITAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



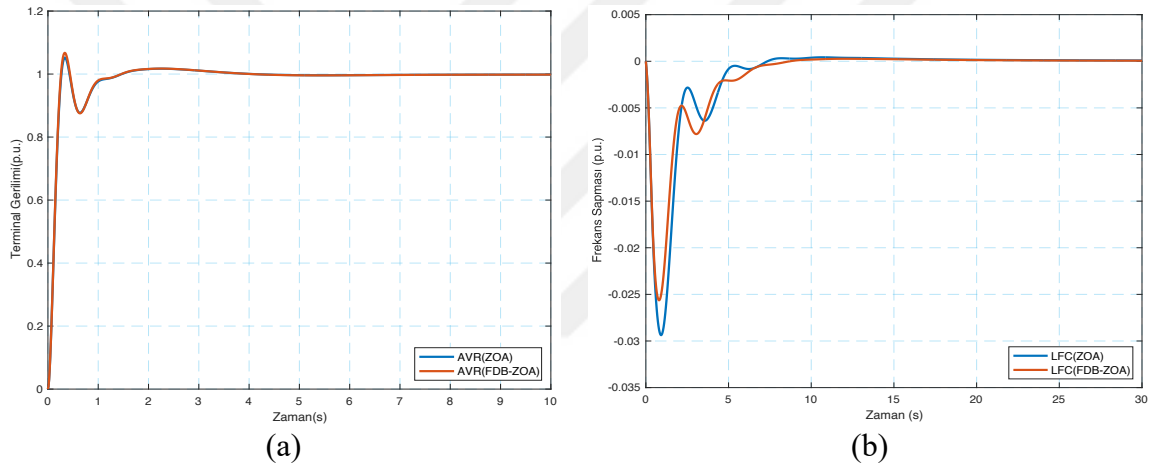
Şekil 26. FOPI-FOPD denetleyicide ITAE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları

PID denetleyicisinin çıkış sinyali, her algoritma benzer yanıt vererek referans değerine oturmuştur. FOPID denetleyicisinde, AVR kısmında FDB-ZOA sayesinde daha az salınımla referansa otururken, LFC kısmında çıkış sinyali ZOA algoritması daha az salınım ile referansa yerleşmiştir. FOPI-FOPD denetleyicisinde, AVR kısmında FDB-ZOA algoritması sayesinde çıkış sinyali daha az aşım ile referansa oturmasına rağmen LFC kısmında sistemde büyük miktarda salınım gözlemlenmektedir.

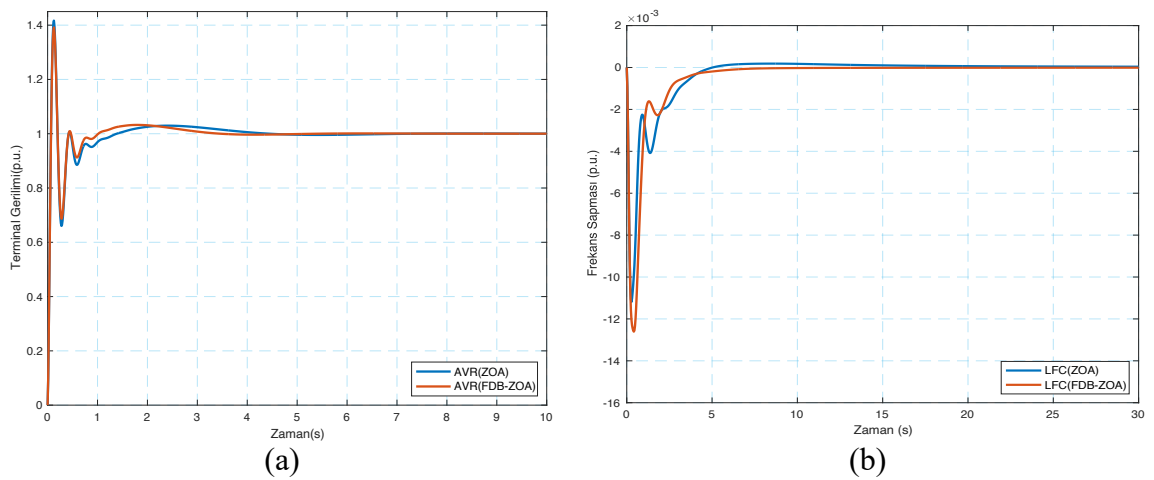
Şekil 27, 28 ve 29' da ITSE amaç fonksiyonu için geçici yanıtlar verilmiştir.



Şekil 27. PID denetleyicide ITSE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



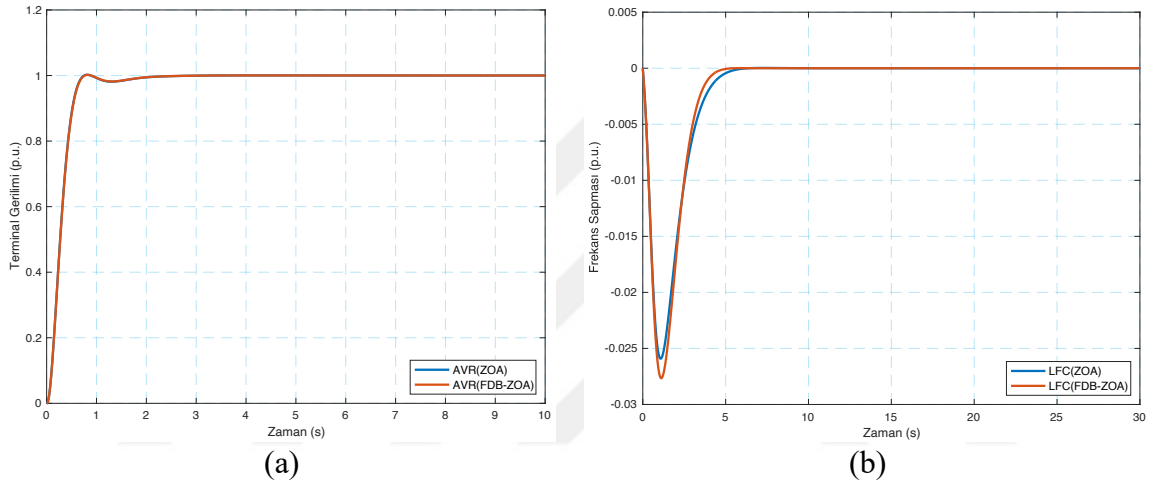
Şekil 28. FOPID denetleyicide ITSE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



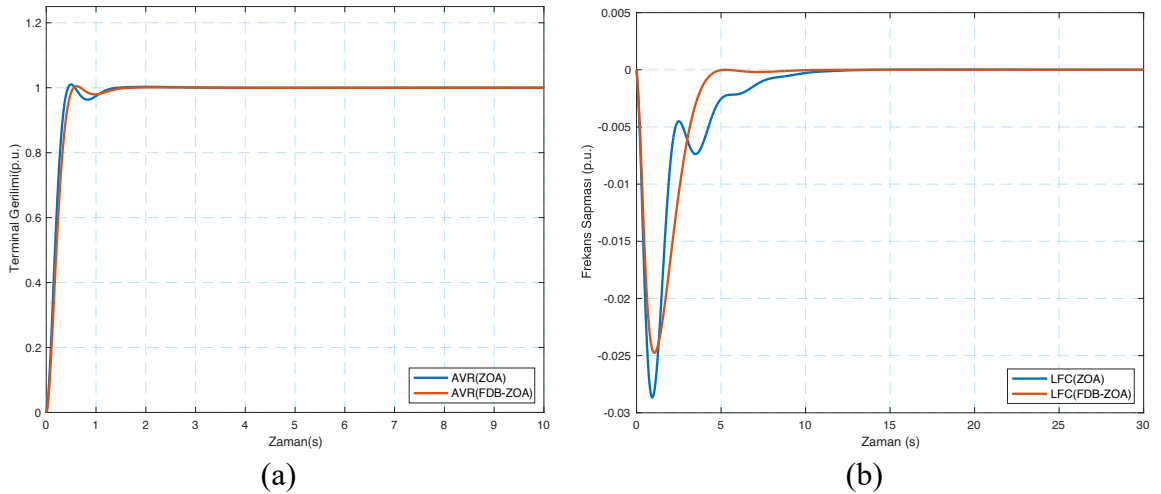
Şekil 29. FOPI-FOPD denetleyicide ITSE amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları

PID denetleyicisinde, her iki algoritma benzer sonuçlar göstererek referans değerine ulaşmıştır. FOPID denetleyicisinin AVR kısmında, her iki algoritma benzer yanıt vermesine rağmen LFC kısmında FDB-ZOA algoritması kullanılmasıyla, çıkış sinyali daha az aşım ile daha başarılı sonuç vermiştir. FOPI-FOPD denetleyicisinde ise hem LFC hem de AVR kısmında FDB-ZOA algoritması, ZOA'ya göre referans sinyali daha kısa sürede yerleşmiştir.

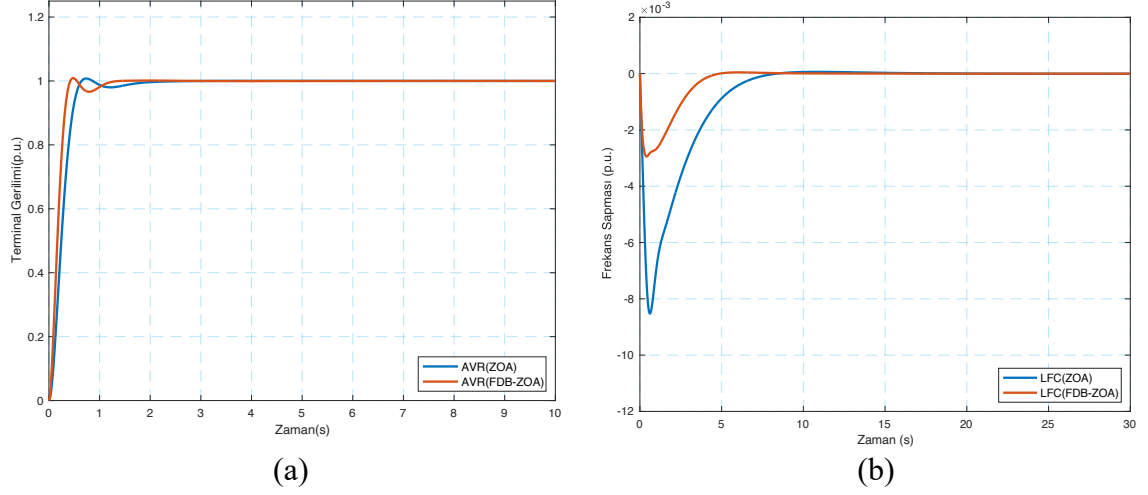
Şekil 30, 31 ve 32' de P_{obj} amaç fonksiyonu için geçici yanıtlar verilmiştir.



Şekil 30. PID denetleyicide P_{obj} amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



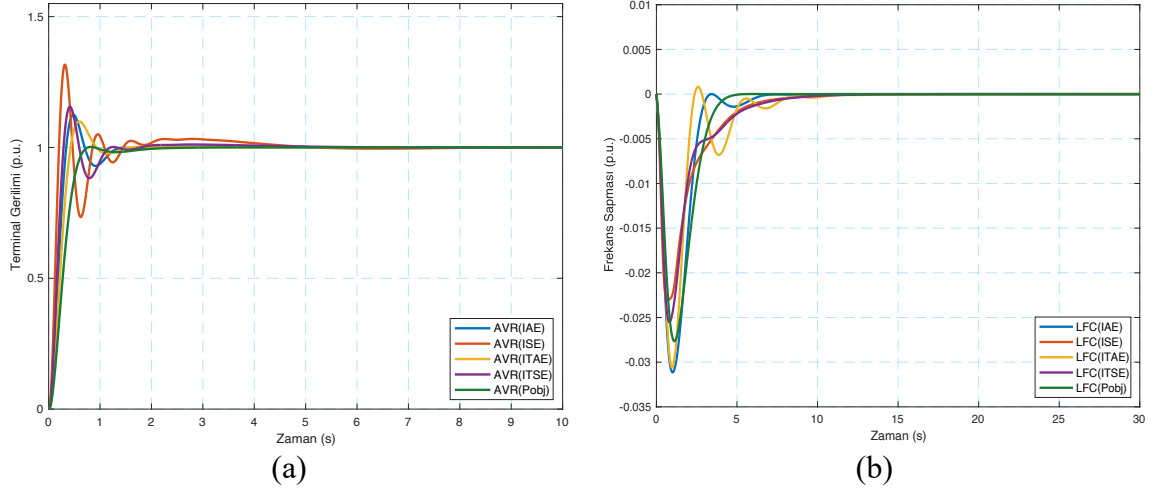
Şekil 31. FOPID denetleyicide P_{obj} amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



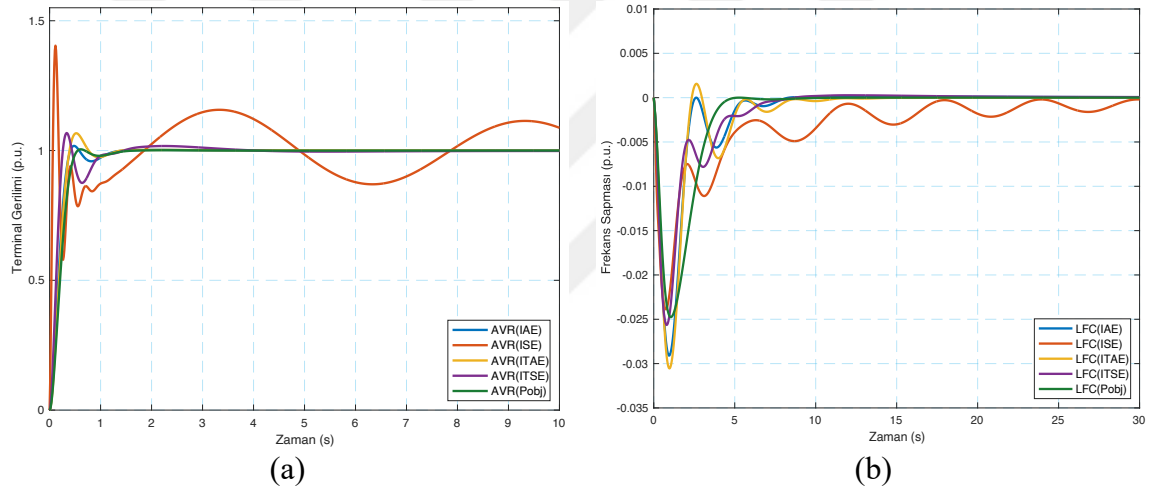
Şekil 32. FOPI-FOPD denetleyicide P_{obj} amaç fonksiyonunun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları

PID denetleyicisinin çıkış sinyalinin LFC kısmında FDB-ZOA algoritmasının çıkış sinyali referansa daha kısa sürede yerleştiği görülmektedir. FOPID denetleyicisinde, AVR kısmında FDB-ZOA'nın çıkış sinyali ZOA'ya göre daha az salınımla referans değerine ulaşmıştır. LFC kısmında da FDB-ZOA gözle görülebilecek ezici farkla ZOA algoritmasını geride bırakmıştır. ZOA algoritmasının çıkış sinyali referans noktasına ulaşırken salınımlar meydana gelirken, FDB-ZOA algoritmasının çıkış sinyali salınım oluşmadan daha kısa sürede referansa yerleşmiştir. FOPI-FOPD denetleyicinde AVR kısmı için FDB-ZOA algoritmasının çıkış sinyali, ZOA algoritmasının çıkış sinyalinden daha kısa sürede referansa noktasına ulaşmıştır. LFC kısmında ise FDB-ZOA algoritması birincil kontrol çevrimi sırasında hızlıca toparlayarak referans noktasına ulaşmıştır.

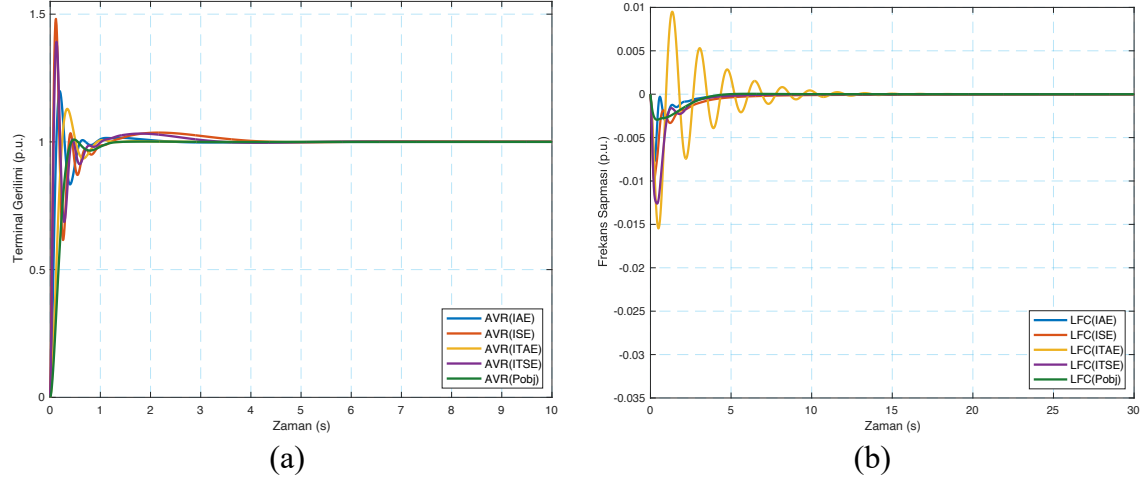
Şekil 33, 34 ve 35' te her bir denetleyici için tüm amaç fonksiyonlarının geçici yanıtları verilmiştir.



Şekil 33. FDB-ZOA algoritmasının PID denetleyicide 5 farklı amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



Şekil 34. FDB-ZOA algoritmasının FOPID denetleyicide 5 farklı amaç fonksiyonun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları



Şekil 35. FDB-ZOA algoritmasının FOPI-FOPD denetleyicide 5 farklı amaç fonksiyonunun (a)AVR ve (b)LFC için optimum geçici yanıtları

Şekildeki üç denetleyici incelediğinde, sistemlerin geçici tepkilerinde P_{obj} amaç fonksiyonu ön planda olduğu görülmektedir. Bazı amaç fonksiyonlarında, FDB-ZOA algoritmasının ZOA algoritmasından daha geri planda kaldığı durumlar oluşmaktadır. Bu nedenle, geçici yanıtlarda aşımı analiz etmek yetersiz kalabilir. Karşılaştırmayı daha iyi yapabilmek için bakılması gereken önemli parametrelerden biri olan yerleşme zamanlarını incelemek önemlidir. Geçici yanıtlarda yerleşme zamanını görebilmek zordur. Bu sebeple Tablo 16, 17 ve 18’ de her bir denetleyici için yerleşme zamanı, yükselme zamanı, tepe zamanı ve aşımın değerleri ayrıntılı şekilde verilmiştir.

Tablo 16. FOPID denetleyicisi için zaman bölge analizi sonuçları

	Amaç Fonksiyonu	AVR				LFC	
		t_s (%2)	t_r	t_p	Maksimum Aşım (p.u.)	t_s (%0,05)	Minimum Aşım (p.u.)
ZOA	IAE	1,1342	0,2309	0,4272	1,023	7,3121	-0,03
	ISE	7,521	0,0496	0,1197	1,3405		-0,0302
	ITAE	1,2295	0,2561	0,4961	1,047	8,8432	-0,0305
	ITSE	1,0395	0,1788	0,3379	1,0522	6,8319	-0,0294
	P_{obj}	1,0427	0,13	0,3071	1,2902	7,55596	-0,0101
FDB-ZOA	IAE	1,0681	0,2564	0,4795	1,0178	7,5517	-0,0291
	ISE		0,0456	0,1148	1,4040		-0,0239
	ITAE	1,0906	0,26	0,5227	1,0666	8,0973	-0,0305
	ITSE	1,0029	0,1745	0,336	1,0673	6,916	-0,0256
	P_{obj}	1,1215	0,1531	0,3545	1,2526	4,3206	-0,0087

Tablo 16 incelendiğinde geliştirilmiş FDB-ZOA algoritması temel ZOA algoritmasından daha başarılı olduğu görülmektedir. LFC kısmında en az aşım ve yerleşme zamanına sahip amaç fonksiyonu P_{obj} olurken, AVR kısmında en kısa yerleşme süresini ITSE, en az aşımı da IAE amaç fonksiyonu vermiştir. Tablo 17’ de FOPI-FOPD denetleyicisi için geçici yanıt sonuçları verilmiştir.

Tablo 17. FOPI-FOPD denetleyicisi için zaman bölge analizi sonuçları

	Amaç Fonksiyonu	AVR				LFC	
		t_s (%2)	t_r	t_p	Maksimum Aşım (p.u.)	t_s (%0,05)	Minimum Aşım (p.u.)
ZOA	IAE	0,5677	0,0897	0,1944	1,1884	2,5386	-0,0101
	ISE	3,2032	0,0428	0,1141	1,495	5,1331	-0,0116
	ITAE	0,8662	0,1035	0,2413	1,2755		-0,0155
	ITSE	3,2198	0,0487	0,1242	1,4167	3,9023	-0,0112
	P_{obj}	1,0656	0,1828	0,4211	1,2379	4,1551	-0,0034
FDB-ZOA	IAE	0,5629	0,0875	0,1910	1,1986	2,9405	-0,0077
	ISE	3,1482	0,0428	0,1136	1,4814	4,2452	-0,0099
	ITAE	0,8449	0,1631	0,3409	1,1292	9,1853	-0,0155
	ITSE	2,5093	0,0497	0,1248	1,3916	3,3841	-0,0126
	P_{obj}	1,0002	0,1241	0,2926	1,2873	1,999	-0,0014

Tablo 17 incelendiğinde FOPI-FOPD denetleyicisi için en kısa yerleşme zamanını hem AVR kısmı hem de LFC kısmı göz önüne alındığında, FDB-ZOA algoritmasında optimize edilmiş amaç fonksiyonlarının daha başarılı olduğu görülmektedir. P_{obj} amaç fonksiyonu LFC kısmında en az aşımına sahipken, ITAE amaç fonksiyonu AVR kısmında en az aşım değerine ulaşmıştır. LFC kısmında en kısa yerleşme zamanına P_{obj} amaç fonksiyonu sahipken, AVR kısmında IAE amaç fonksiyonu vermiştir. Tablo 18’de PID denetleyicisi için geçici yanıt sonuçları verilmiştir.

Tablo 18. PID denetleyicisi için zaman bölge analizi sonuçları

	Amaç Fonksiyonu	AVR				LFC	
		t_s (%2)	t_r	t_p	Maksimum Aşım (p.u.)	t_s (%0,05)	Minimum Aşım (p.u.)
ZOA	IAE	1,2104	0,2249	0,4793	1,1251	6,0128	-0,031
	ISE	3,7781	0,1302	0,3159	1,3164	7,7845	-0,0231
	ITAE	1,2501	0,2787	0,5911	1,1008	7,9774	-0,0305
	ITSE	1,0869	0,19	0,4127	1,1563	8,1325	-0,026
	P_{obj}	1,1464	0,1949	0,4571	1,2373	4,6129	-0,0092
FDB-ZOA	IAE	1,2096	0,2251	0,4799	1,1252	6,0466	-0,0311
	ISE	3,7783	0,1302	0,3159	1,3165	7,7845	-0,0231
	ITAE	1,2446	0,2811	0,5957	1,0991	7,9724	-0,0306
	ITSE	1,0881	0,1903	0,4134	1,1558	8,0890	-0,0255
	P_{obj}	1,1517	0,1963	0,4596	1,2349	4,1358	-0,0098

Tablo 18’ de görüldüğü üzere AVR kısmında en iyi yerleşme zamanını ZOA algoritması ile optimize edilmiş ITSE amaç fonksiyonu verirken LFC kısmında en iyi yerleşme zamanı FDB-ZOA algoritması ile optimize edilmiş P_{obj} amaç fonksiyonu göstermiştir.

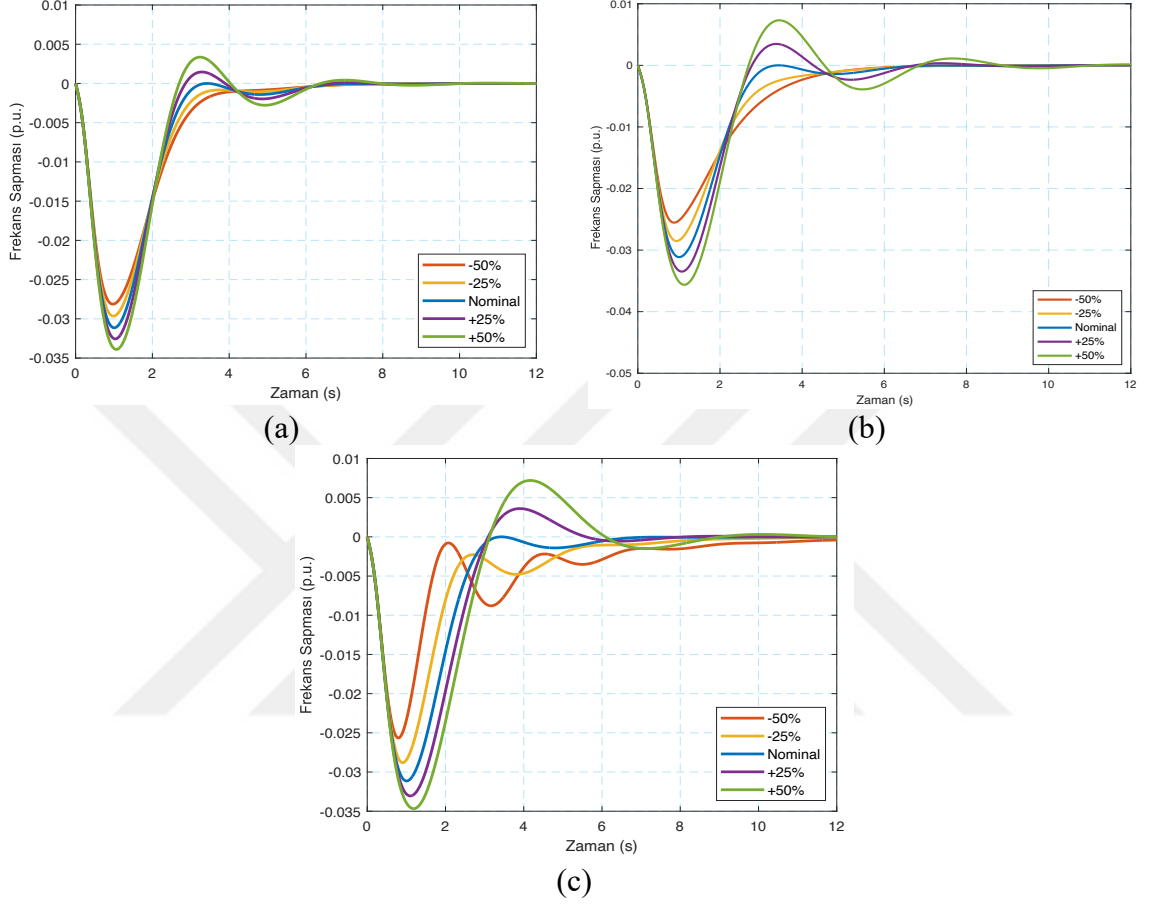
3.5.2. Gürbüzlük Analizi

Kontrol çalışmalarında gürbüzlük analizi son derece önemlidir. Çünkü sistemde anormal koşulların oluşması, sistem parametrelerini etkileyebilir. Sistem parametrelerindeki değişim sonucunda, kullanılan denetleyicinin sistem kararlılığını koruması beklenir.

AVR-LFC sistemleri birçok sistem parametresinden oluşur. Bu nedenle, gürbüzlük analizi için etkili olan parametrelerin seçilmesi önemlidir. Önerilen tez çalışmasında, yedi parametre için gürbüzlük analizi uygulanmıştır. Bunlar; τ_A , τ_E , τ_G , τ_S , τ_g , τ_t ve R parametresidir. Bu parametrelerin oranları -50%, -25%, +25% ve +50% olarak değiştirilmiştir. Değiştirilen parametre değerlerinin etkisi, sistemin geçici yanıtlarının analiz ile incelenmiştir.

Gürbüzlük analizi, FDB-ZOA algoritması ile optimize edilen denetleyicilerin parametrelerine uygulanmıştır. Bunun yanı sıra, Bölüm 3.6.1’de analiz edilen amaç fonksiyonlarının sonuçlarına göre en iyi iki amaç fonksiyonu için gürbüzlük analizi sonuçları sunulmuştur. Bunlar, IAE ve P_{obj} amaç fonksiyonlarıdır.

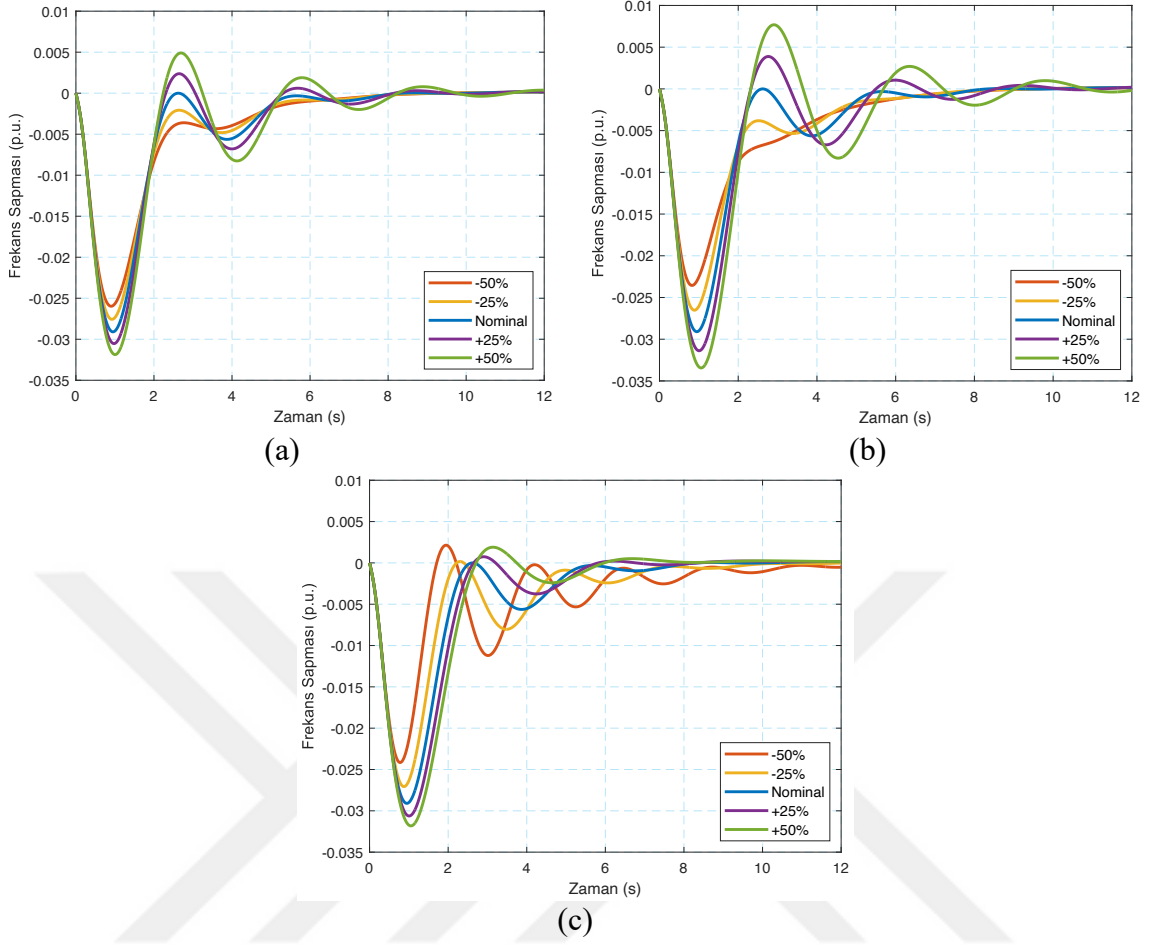
Hem LFC hem de AVR kısımları dahilinde üç denetleyicinin gürbüzlük analizi sonucunda geçici yanıtlar incelenmiştir. Şekil 36’ da LFC geçici tepkisinde üzerinde yüksek etkisi olan τ_g , τ_t ve R parametrelerinin gürbüzlük sonuçlarını göstermektedir (IAE-PID).



Şekil 36. LFC için (a) τ_g (b) τ_t ve (c)R parametrelerin değişimine göre frekans sapması (IAE-PID)

Şekilde, τ_g , τ_t ve R sabitleri arttıkça minimum aşımın arttığı görülmektedir. LFC’deki diğer sabitlerle karşılaştırıldığında, en küçük etkiyi τ_g , en büyük etkininde R parametresinden kaynaklandığı söylenebilir.

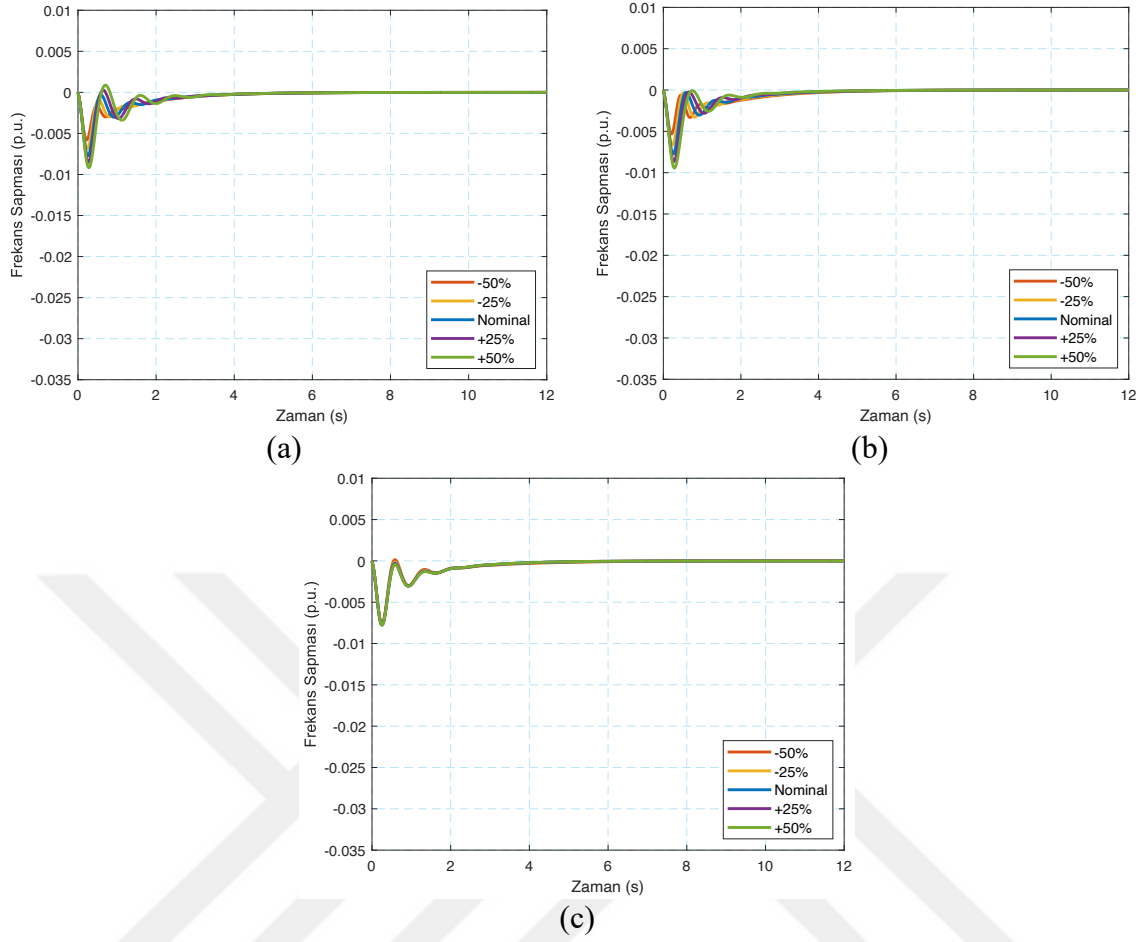
Şekil 37’ de LFC geçici tepkisi üzerinde yüksek etkisi olan τ_g , τ_t ve R parametrelerinin gürbüzlük sonuçları verilmiştir (IAE-FOPID).



Şekil 37. LFC için (a) τ_g (b) τ_t ve (c) R parametrelerin değişimine göre frekans sapması (IAE-FOPID)

Şekil 37'ye bakıldığında, FOPID denetleyicisinin PID denetleyicisinden daha hassas olduğu görülür. Parametrelerdeki yüzdelik değişiklikler sistemi daha kararsız hale getireceği sonucuna varılır. FOPID denetleyicisinde, LFC bölümünü en çok etkileyen parametre R 'dir, en az etkileyen parametre ise τ_g olmuştur.

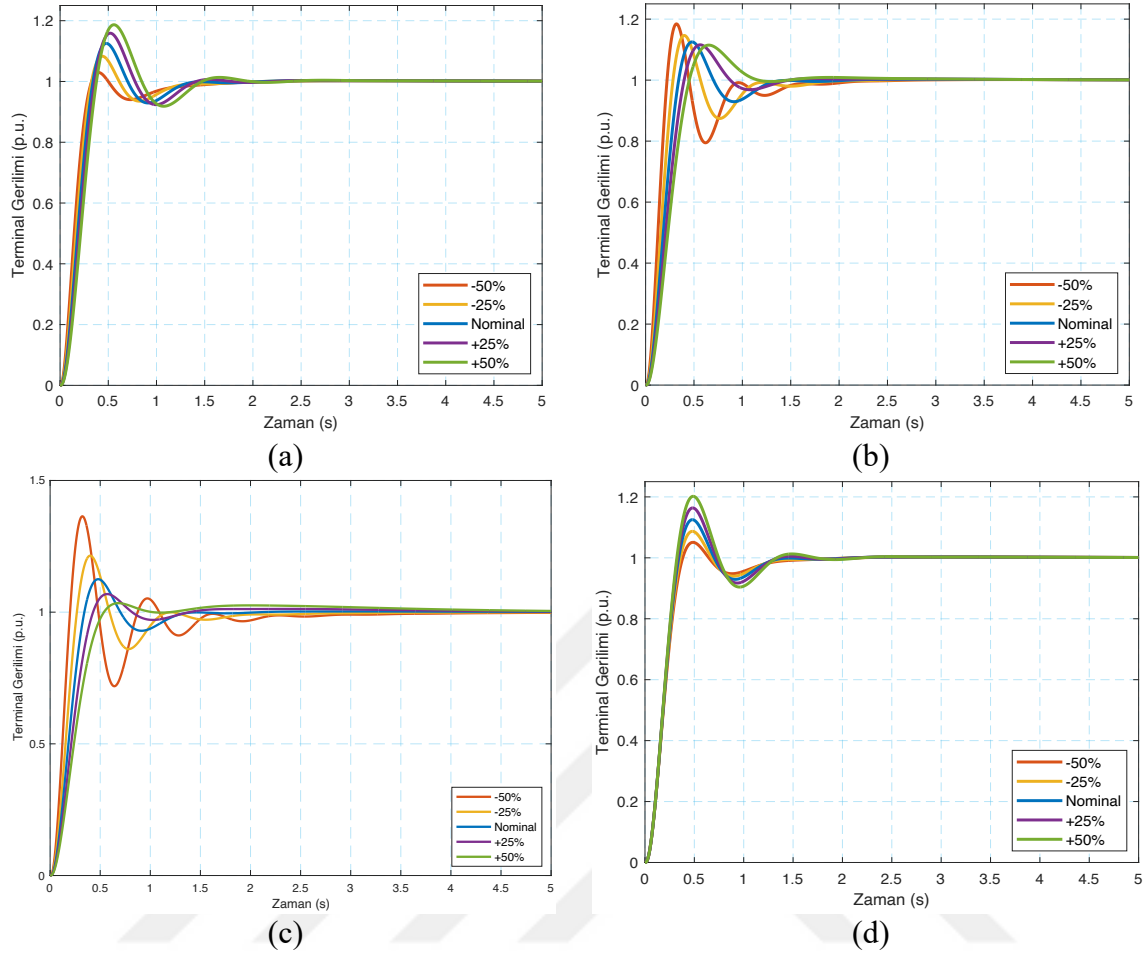
Şekil 38'de LFC'nin geçici tepkisine etkisi olan τ_g , τ_t ve R parametrelerinin gürbüzlük sonuçları sunulmuştur (IAE-FOPID-FOPD).



Şekil 38. LFC için (a) τ_g (b) τ_t ve (c) R parametrelerin değişimine göre frekans sapması (IAE-FOPI-FOPD)

Şekil 38'e bakıldığında, FOPI-FOPD denetleyicisinin üç sabitin yüzdelik değişimlere karşı birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. LFC bölümünde, sistemi en az etkileyen parametre R iken, en çok etkileyen parametre τ_t olmuştur.

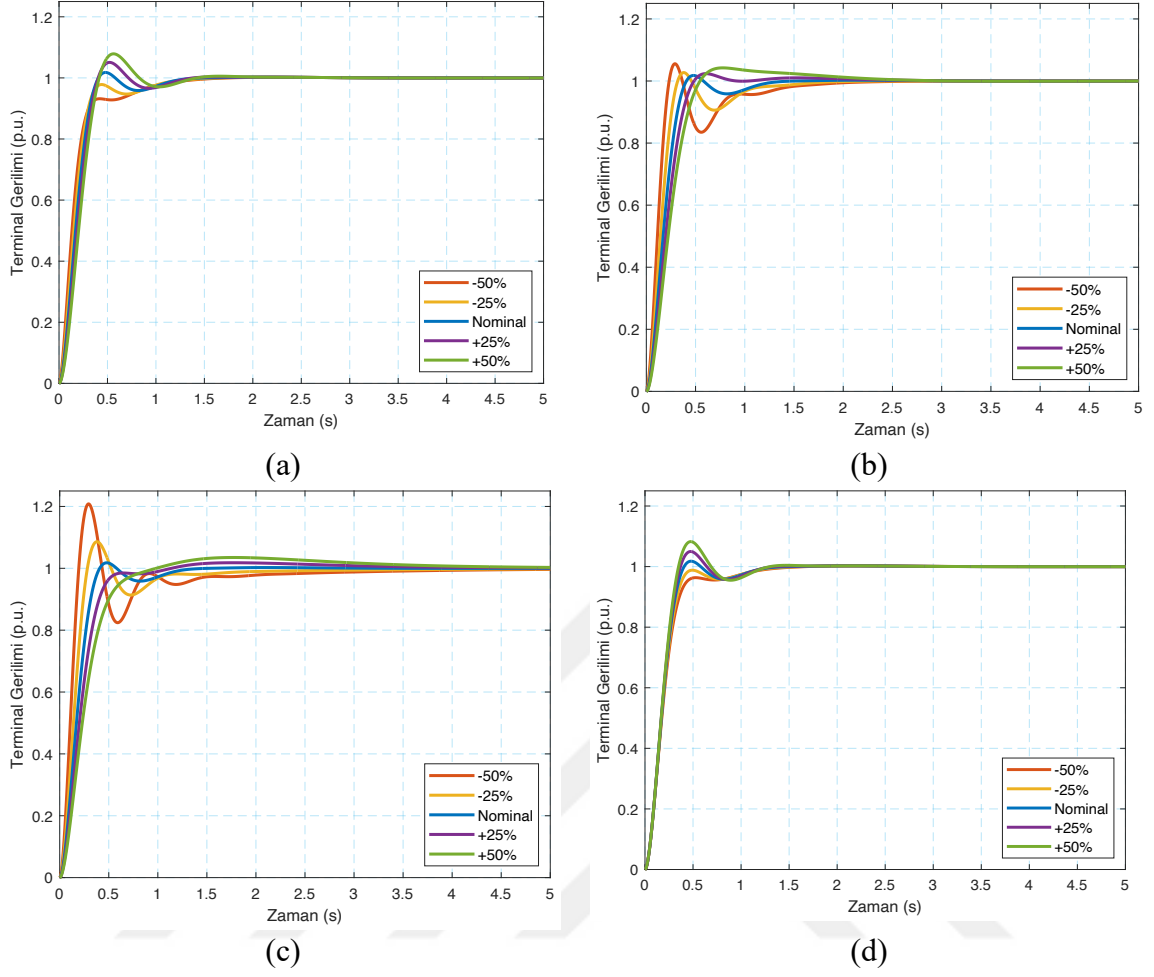
Şekil 39' da AVR geçici tepkisine olan etkisi τ_A , τ_E , τ_G ve τ_S parametrelerinin gürbüzlük sonuçları verilmiştir (IAE-PID).



Şekil 39. AVR için (a) τ_A (b) τ_E (c) τ_G ve (d) τ_S parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi (IAE-PID)

Şekil 39’ da görüldüğü üzere en fazla etkiye sahip olan parametre τ_G iken en az etkiye sahip olan τ_S parametresi olmuştur. τ_G parametresinde, nominal değerden uzaklaştıkça yerleşme zamanının arttığı görülmektedir. Diğer üç parametrede ise parametre değerleri arttıkça yerleşme zamanı azalmıştır.

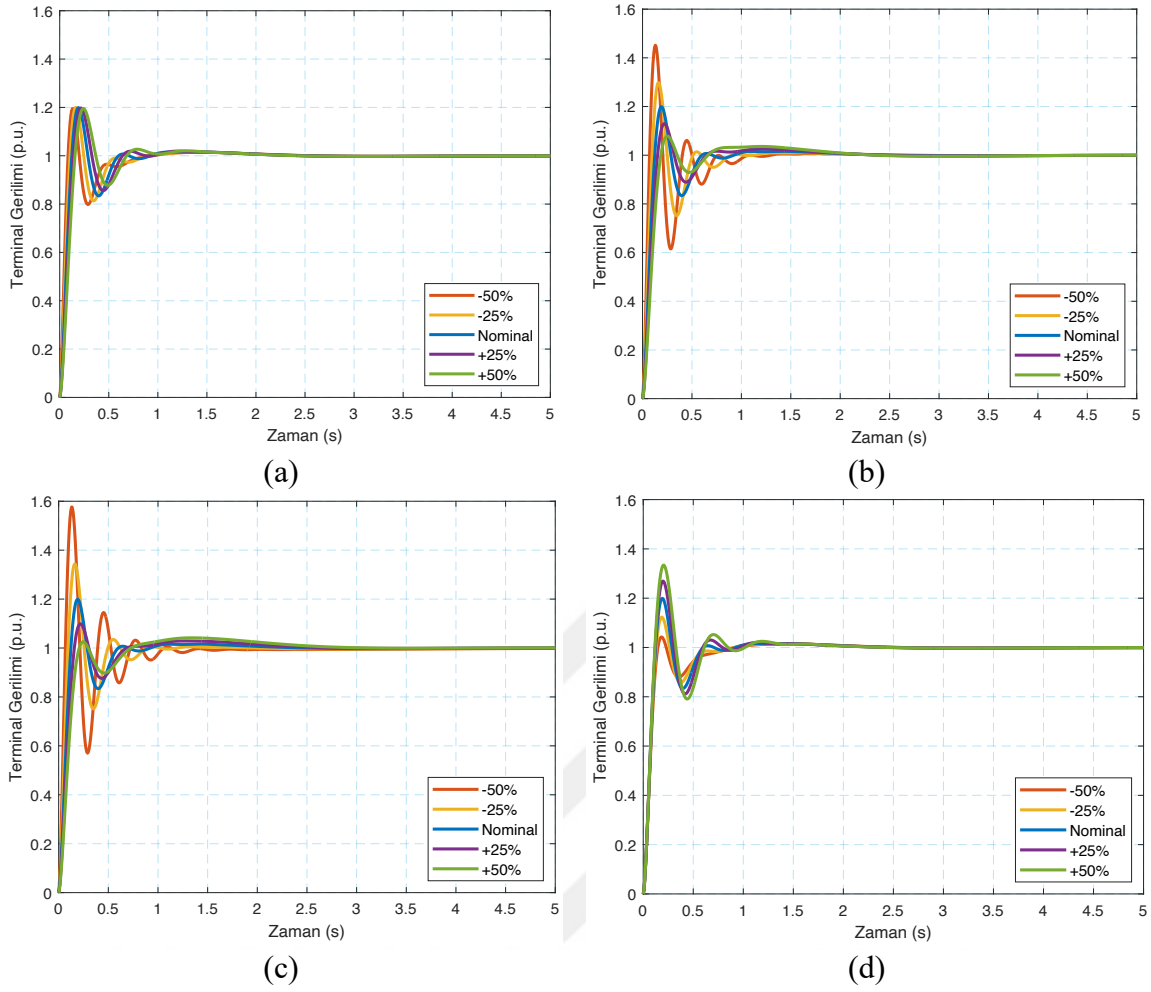
Şekil 40’ta AVR geçici tepkisi üzerinde yüksek etkisi τ_A , τ_E , τ_G ve τ_S parametrelerinin gürbüzlük sonuçları verilmiştir (IAE-FOPID).



Şekil 40. AVR için (a) τ_A (b) τ_E (c) τ_G ve (d) τ_S parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi (IAE-FOPID)

Şekil 40’ da görüldüğü üzere en az etkiye sahip parametre τ_S iken en çok etkiye sahip parametre τ_G olmuştur. τ_G zaman sabitinde nominal değerin üstüne çıktıkça aşımın azaldığı görülmektedir. Dört parametre içinde nominal değerin üstüne çıkıldığında yerleşme zamanının düştüğü gözlemlenmektedir.

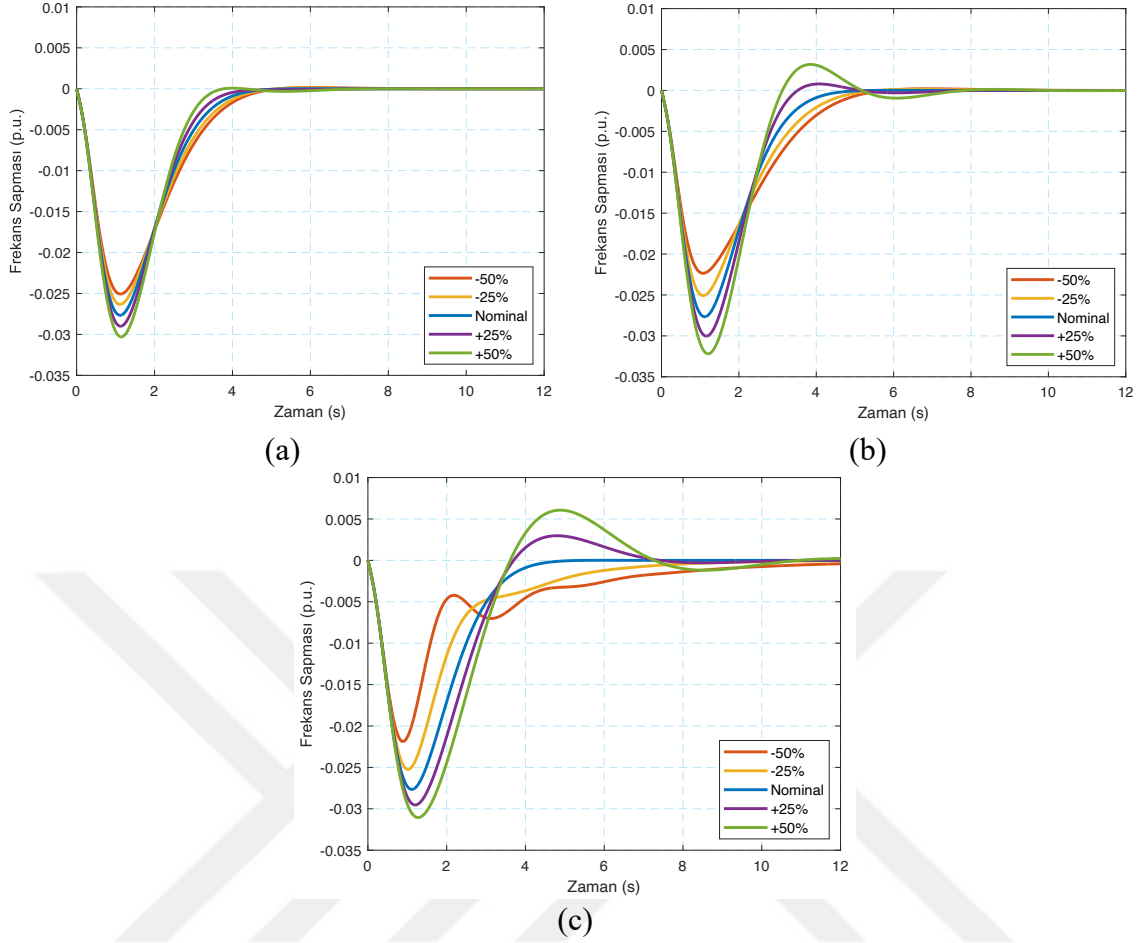
Şekil 41’ de AVR geçici tepkisi üzerinde yüksek etkisi τ_A , τ_E , τ_G ve τ_S parametrelerin gürbüzlük sonuçları verilmiştir (IAE-FOPID-FOPD).



Şekil 41. AVR için (a) τ_A (b) τ_E (c) τ_G ve (d) τ_S parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi (IAE-FOPI-FOPD)

AVR’de en fazla etkiye sahip parametre τ_G iken en az etkiye sahip parametre τ_A olmuştur. τ_E ve τ_G parametrelerindeki değerlerin artışı aşımı azaltmaktadır. τ_A zaman sabitinde meydana gelen değişiklikler sistemde anormallikler meydana getirmediği söylenilebilir. τ_A , τ_E ve τ_G parametrelerindeki yüzdelik artış yerleşme zamanını düşürmüştür.

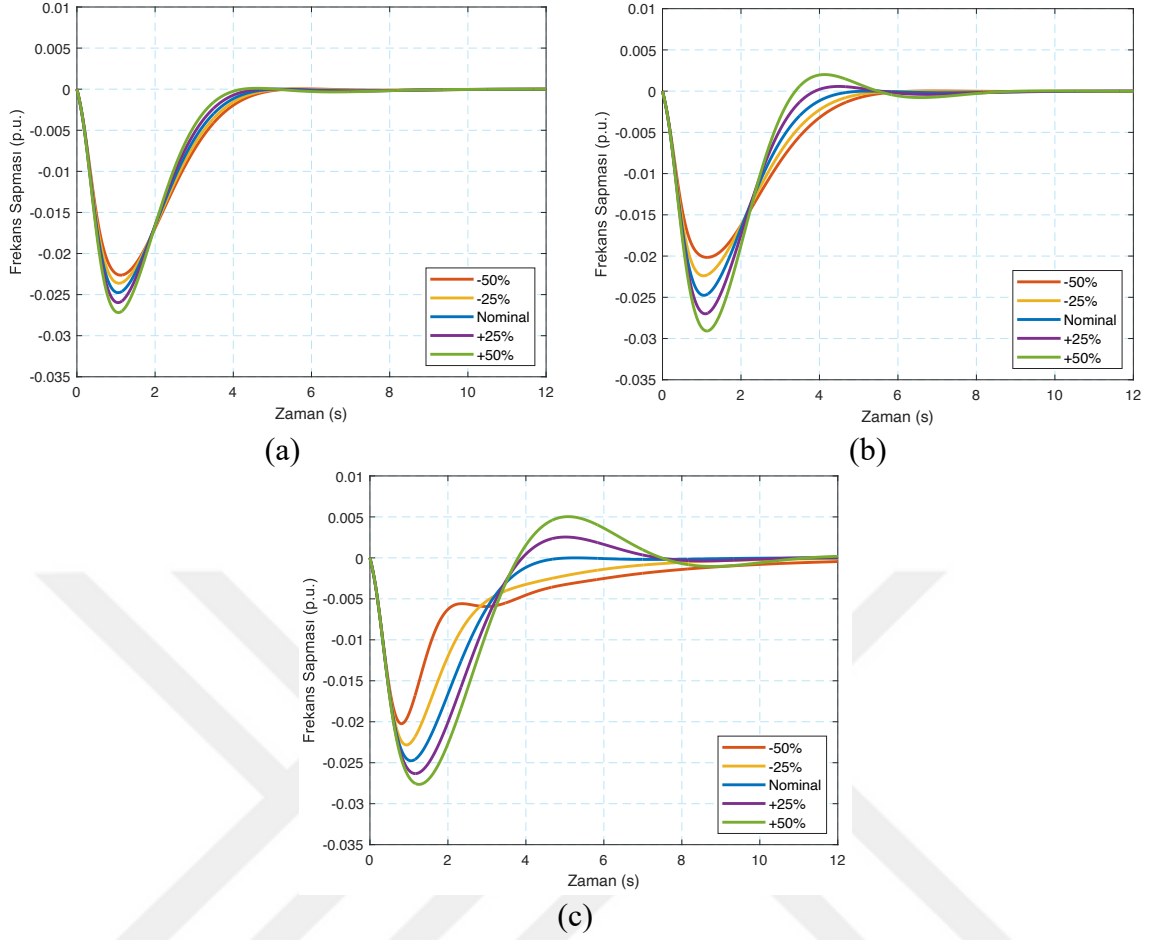
Şekil 42’de LFC geçici tepkisi üzerinde yüksek etkisi olan τ_g , τ_t ve R parametrelerin gürbüzlük sonuçları verilmiştir (P_{obj} -PID).



Şekil 42. LFC için (a) τ_g (b) τ_t ve (c) R parametrelerin değişimine göre frekans sapması (P_{obj} -PID)

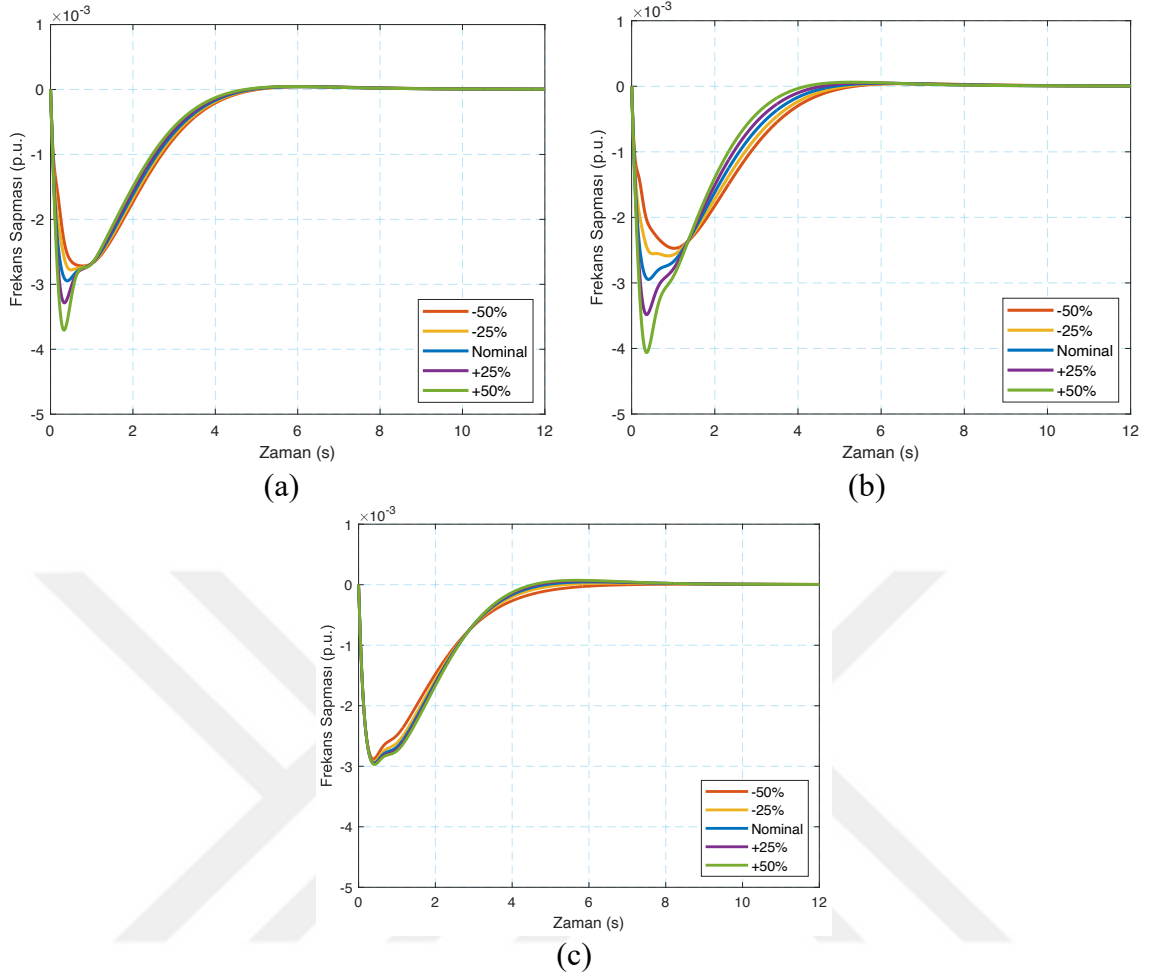
Şekil 42 incelendiğinde LFC kısmını en çok etkileyen parametre R olurken, en az etkileyen parametre τ_g olduğu gözlemlenmiştir. τ_g , τ_t ve R 'de yüzdelik artış olduğunda sistemin minimum aşım değerinde artış olduğu görülmektedir.

Şekil 43'te LFC geçici tepkisi üzerinde yüksek etkisi olan τ_g , τ_t ve R parametrelerin gürbüzlük sonuçları verilmiştir (P_{obj} -FOPID).



Şekil 43. LFC için (a) τ_g (b) τ_t ve (c) R parametrelerin değişimine göre frekans sapması (P_{obj} -FOPID)

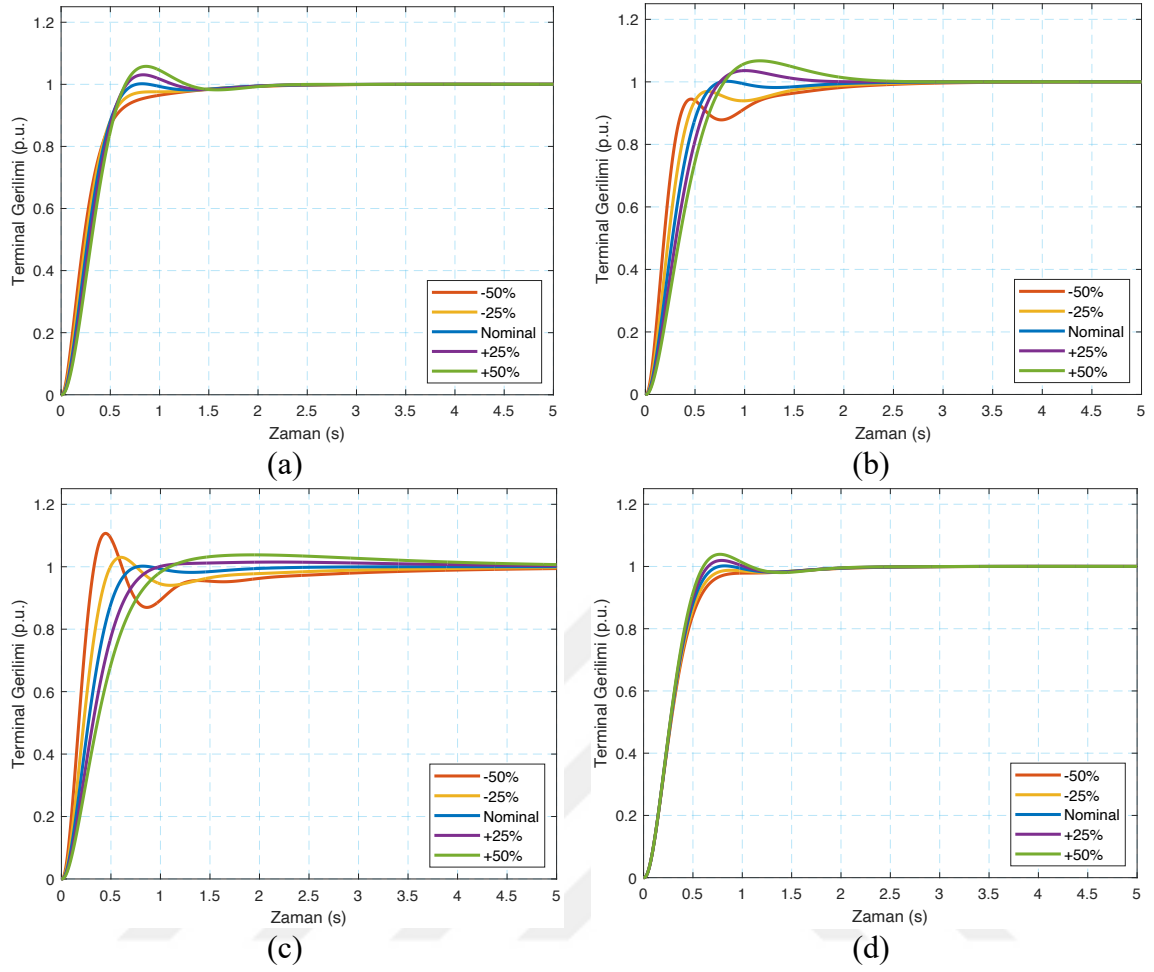
LFC’de en fazla etkileyen parametre R , en az etkileyen parametre ise τ_g olmuştur. Şekil 44’te LFC geçici tepkisi üzerinde yüksek etkisi olan τ_g , τ_t ve R parametrelerinin gürbüzlük sonuçları verilmiştir (P_{obj} -FOPI-FOPD).



Şekil 44. LFC için (a) τ_g (b) τ_t ve (c)R parametrelerin değişimine göre frekans sapması (P_{obj} -FOPI-FOPD)

Şekil 44'ten de anlaşılacağı üzere en iyi sonucu veren denetleyici FOPI-FOPD denetleyicisi olmuştur. LFC'de en az etkili olan parametre R olurken, en çok etkileyen ise τ_t zaman sabiti olmuştur. Parametrelerin her birinde yüzdelik artış minimum aşımı çok fazla etkilememiştir.

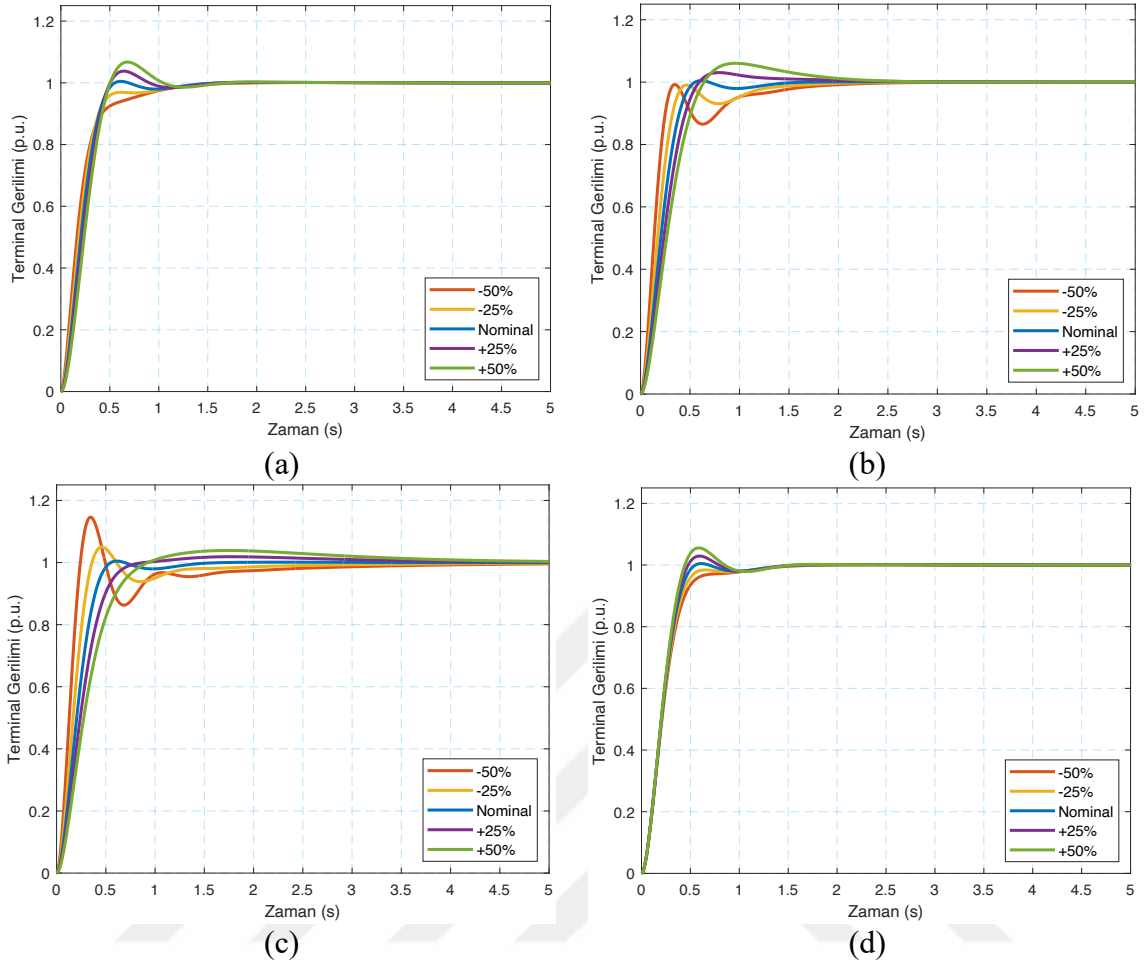
Şekil 45' te AVR geçici tepkisi üzerinde yüksek etkisi τ_A , τ_E , τ_G ve τ_S parametrelerin gürbüzlük sonuçları verilmiştir (P_{obj} -PID).



Şekil 45. AVR için (a) τ_A (b) τ_E (c) τ_G ve (d) τ_S parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi (P_{obj} -PID)

PID'li AVR sisteminde en az etkileyen parametre τ_S olurken, en fazla etkileyen parametre τ_G olmuştur. τ_A , τ_E , τ_G ve τ_S sabitleri arttıkça aşım artmıştır.

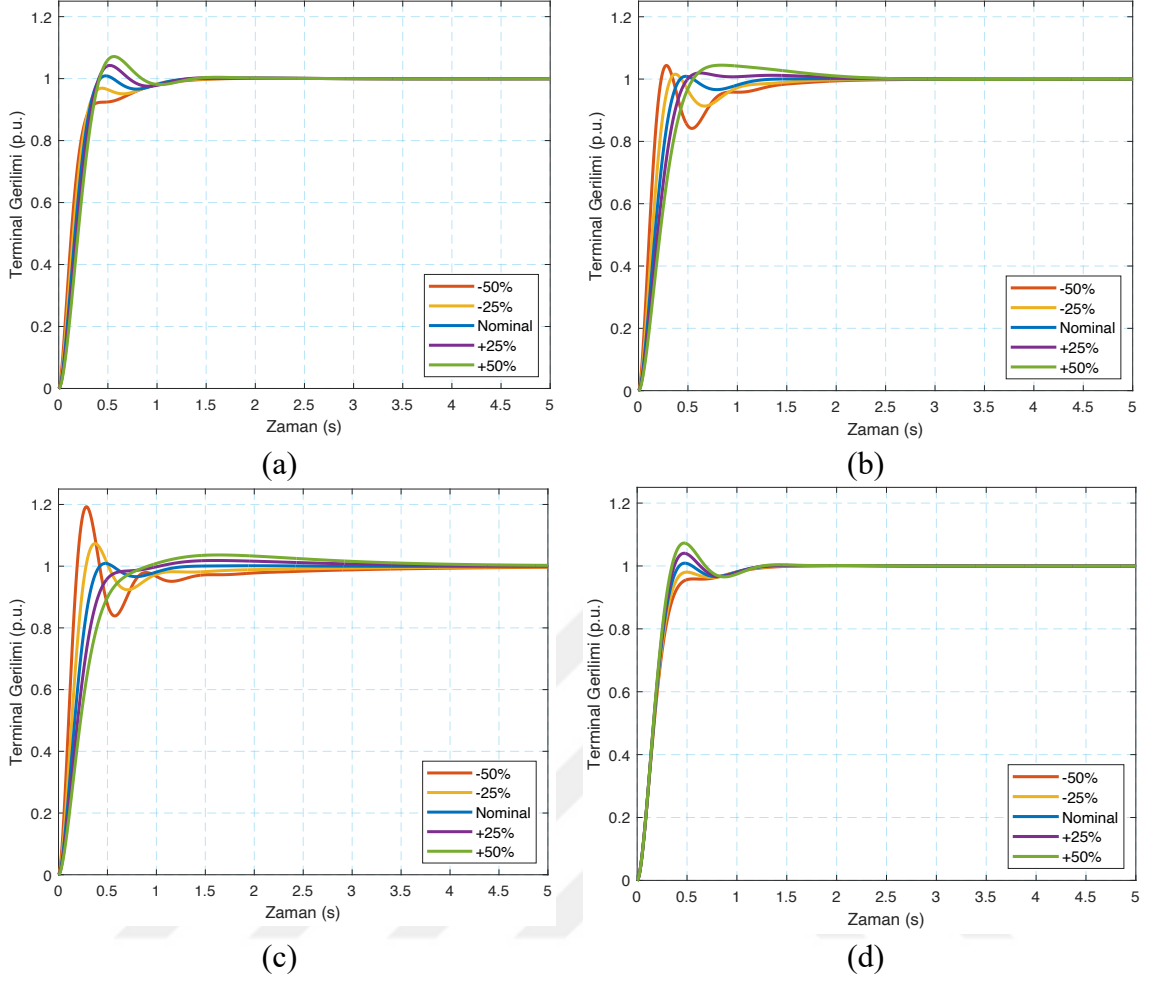
Şekil 46' da AVR geçici tepkisi üzerinde yüksek etkisi τ_A , τ_E , τ_G ve τ_S parametrelerin gürbüzlük sonuçları verilmiştir (P_{obj} -FOPID).



Şekil 46. AVR için (a) τ_A (b) τ_E (c) τ_G ve (d) τ_S parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi (P_{obj} -FOPID)

Şekil 46 incelendiğinde FOPID'li AVR sistemini en az etkileyen parametre τ_S olurken, en fazla etkileyen parametre τ_G olmuştur. τ_E zaman sabitindeki artış ve azalmalar maksimum aşımın yükselmesine sebep olmaktadır. τ_A ve τ_S zaman sabitindeki artış da maksimum aşımı arttırmaktadır.

Şekil 47' de AVR geçici tepkisi üzerinde yüksek etkisi τ_A , τ_E , τ_G ve τ_S parametrelerin gürbüzlük sonuçları verilmiştir (P_{obj} -FOPI-FOPD).



Şekil 47. AVR için (a) τ_A (b) τ_E (c) τ_G ve (d) τ_S parametrelerin değişimine göre terminal gerilimi (P_{obj} -FOPI-FOPD)

Şekil 47’ de görüldüğü üzere AVR sistemini en fazla etkileyen zaman sabiti τ_G ’ iken en az etkileyen zaman sabiti τ_A olmuştur. τ_A ve τ_S zaman sabitleri arttıkça maksimum aşım da artmaktadır. τ_E ve τ_G zaman sabitleri arttıkça maksimum aşım da azalma görülmektedir.

Aşağıdaki tablolarda iki amaç fonksiyonuna ait parametrelerin -50%, -25%, +25% ve +50% oranlarındaki yerleşme, yükselme, tepe zamanları ve aşımları detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 19. IAE-FOPID’li sistem için tüm gürbüzlük sonuçları

Zaman Sabiti	Yüzdelik Değişim	AVR				LFC	
		t_s (s) %2	t_r (s)	t_p (s)	Maksimum Aşım (p.u.)	t_s (s) %0,05	Minimum Aşım (p.u.)
τ_A	-50	1,0675	0,2629	2,2404	1,001947	7,5435	-0,02856
	-25	1,0388	0,2502	2,1583	1,002202	7,5475	-0,0288
	+25	1,1237	0,2668	0,5214	1,050771	7,5561	-0,02945
	+50	1,1906	0,2785	0,5625	1,078804	7,5607	-0,02982
τ_E	-50	1,429	0,1545	0,291	1,055568	7,5193	-0,0282
	-25	1,1415	0,2061	0,3798	1,027124	7,534	-0,02862
	+25	0,6741	0,3046	0,6051	1,023752	7,5725	-0,02943
	+50	1,653	0,35	0,7758	1,042297	7,5967	-0,02959
τ_G	-50	2,1	0,1334	0,294	1,208261	7,5361	-0,02883
	-25	1,1136	0,1905	0,3797	1,085941	7,5444	-0,02905
	+25	0,5624	0,3346	1,7676	1,017983	7,5552	-0,02886
	+50	2,8408	0,4248	1,7731	1,034983	7,5514	-0,02844
τ_S	-50	1,0735	0,298	2,1841	1,002222	7,5643	-0,02866
	-25	1,0632	0,2732	2,1414	1,002351	7,558	-0,02887
	+25	1,0866	0,2447	0,4754	1,049818	7,5454	-0,02936
	+50	1,1149	0,2363	0,4762	1,082519	7,5392	-0,02965
τ_g	-50	1,0695	0,2564	0,4795	1,017802	7,2209	-0,02598
	-25	1,0688	0,2564	0,4795	1,01781	7,3451	-0,02757
	+25	1,0675	0,2564	0,4795	1,01782	7,7944	-0,03053
	+50	1,067	0,2564	0,4795	1,017823	9,337	-0,03187
τ_t	-50	1,0707	0,2564	0,4795	1,017796	7,2541	-0,02355
	-25	1,0692	0,2564	0,4795	1,017809	7,1669	-0,02652
	+25	1,0672	0,2564	0,4795	1,017821	8,1961	-0,03138
	+50	1,0665	0,2564	0,4795	1,017824	10,4282	-0,03344
R	-50	1,0706	0,2564	0,4795	1,017808		-0,02416
	-25	1,0689	0,2564	0,4795	1,017813	9,163	-0,02707
	+25	1,0676	0,2564	0,4795	1,017818	5,5304	-0,03062
	+50	1,0672	0,2564	0,4795	1,017819	6,8145	-0,03182

Elde edilen veriler doğrultusunda τ_t zaman sabitinin yüzdelik değişimi sistemin LFC kısmında dengesizliğe yol açmaktadır. τ_t değeri arttığında yerleşme süresi ve aşım değerlerinde artış görülmektedir. τ_G zaman sabitinde ise yüzdelik değişim sistemin AVR kısmında dengesizlik oluşturmaktadır. τ_G değeri arttıkça yerleşme zamanında artış görülürken, aşımında artış veya azalış görülmektedir.

Tablo 20’ de P_{obj} -FOPID’li sistemin gürbüzlük sonucu verilmiştir.

Tablo 20. P_{obj} -FOPID'li için tüm gürbüzlük sonuçları

Zaman Sabiti	Yüzdelik Değişim	AVR				LFC	
		t_s (s) %2	t_r (s)	t_p (s)	Maksimum Aşım (p.u.)	t_s (s) %0,05	Minimum Aşım (p.u.)
τ_A	-50	1,0824	0,3661	2,5214	1,000955	4,3715	-0,02431
	-25	1,0552	0,3258	2,4197	1,001082	4,3585	-0,02451
	+25	0,7876	0,3266	0,6428	1,037831	4,3323	-0,02506
	+50	0,9357	0,3354	0,6803	1,067237	4,3191	-0,02539
τ_E	-50	1,5485	0,7306	3,9297	0,999812	4,4623	-0,02382
	-25	1,2609	0,2638	3,2264	1,000105	4,4048	-0,02424
	+25	1,0432	0,3728	0,7917	1,030561	4,2835	-0,02516
	+50	1,749	0,4192	0,9603	1,060394	4,2178	-0,02543
τ_G	-50	2,3772	0,1644	0,3453	1,146153	4,5198	-0,02417
	-25	1,401	0,2373	0,4591	1,049951	4,424	-0,02459
	+25	0,674	0,4153	1,7717	1,01877	4,2847	-0,02469
	+50	3,0163	0,5117	1,7388	1,038873	4,2437	-0,02448
τ_S	-50	1,0481	0,371	2,4337	1,001096	4,3787	-0,02445
	-25	1,0262	0,3426	2,3819	1,001153	4,3621	-0,0246
	+25	1,049	0,3056	0,5931	1,029102	4,3286	-0,02495
	+50	1,1339	0,294	0,5857	1,055455	4,3116	-0,02517
τ_g	-50	1,023	0,3212	0,6111	1,004677	4,6737	-0,02263
	-25	1,0192	0,3212	0,6112	1,004705	4,5238	-0,02362
	+25	1,0118	0,3212	0,6113	1,004743	4,1275	-0,02597
	+50	1,0082	0,3212	0,6113	1,004757	3,8618	-0,02719
τ_t	-50	1,0287	0,3212	0,611	1,00465	5,278	-0,02016
	-25	1,0218	0,3212	0,6111	1,004696	4,9067	-0,02239
	+25	1,0097	0,3212	0,6113	1,004748	4,7641	-0,027
	+50	1,0046	0,3212	0,6113	1,004765	7,5132	-0,02908
R	-50	1,0252	0,3212	0,6111	1,004704	11,6354	-0,02024
	-25	1,0189	0,3212	0,6112	1,004719	8,2183	-0,02283
	+25	1,0132	0,3212	0,6112	1,004731	6,8615	-0,02633
	+50	1,0117	0,3212	0,6112	1,004734	10,1678	-0,02764

Tabloda, LFC kısmını en çok etkileyen parametrenin R, AVR kısmını ise τ_G zaman sabitidir. R değerindeki yüzdesel değişimler, yerleşme zamanında dengesizliğe yol açmaktadır. τ_G zaman sabitinde ise aşımda gözle görülebilir sayısal farklar meydana gelmektedir.

Tablo 21 ve 22'de IAE-PID'li sistemin gürbüzlük sonuçları verilmiştir.

Tablo 21. IAE-PID’li sistem için tüm gürbüzlük sonuçları

Zaman Sabiti	Yüzdelik Değişim	AVR				LFC	
		t_s (s) %2	t_r (s)	t_p (s)	Maksimum Aşım (p.u.)	t_s (s) %0,05	Minimum Aşım (p.u.)
τ_A	-50	1,1622	0,2057	0,3985	1,029558	6,0471	-0,03063
	-25	1,1481	0,2136	0,4383	1,083072	6,0468	-0,03083
	+25	1,289	0,2375	0,5202	1,158897	6,0464	-0,03158
	+50	1,3724	0,2496	0,5585	1,186645	6,0461	-0,03209
τ_E	-50	1,4748	0,1446	0,319	1,184359	6,0386	-0,03015
	-25	1,0822	0,1858	0,3996	1,146393	6,0414	-0,03043
	+25	1,253	0,2631	0,5639	1,115716	6,0546	-0,03177
	+50	1,026	0,2996	0,6532	1,114748	6,0659	-0,03221
τ_G	-50	2,12	0,1289	0,3221	1,363925	6,0957	-0,03056
	-25	1,7371	0,1756	0,4002	1,214465	6,0716	-0,03068
	+25	1,1819	0,2791	0,5692	1,068678	6,0181	-0,03125
	+50	2,8764	0,3384	0,6814	1,034197	5,9816	-0,0311
τ_S	-50	1,2132	0,2446	0,4861	1,050811	6,0648	-0,03077
	-25	1,2042	0,2332	0,4802	1,086958	6,0557	-0,03094
	+25	1,226	0,2193	0,4831	1,163807	6,0374	-0,0314
	+50	1,2496	0,2149	0,4883	1,201959	6,0281	-0,03172
τ_g	-50	1,2106	0,2251	0,4799	1,125152	5,8509	-0,02813
	-25	1,21	0,2251	0,4799	1,12516	5,9908	-0,02965
	+25	1,2091	0,2251	0,4799	1,12517	6,0707	-0,03256
	+50	1,2087	0,2251	0,4799	1,125173	6,1075	-0,0339
τ_t	-50	1,2115	0,2251	0,4799	1,125146	5,5941	-0,02554
	-25	1,2104	0,2251	0,4799	1,125158	5,7013	-0,02852
	+25	1,2088	0,2251	0,4799	1,125171	6,3894	-0,03349
	+50	1,2083	0,2251	0,4799	1,125174	8,4444	-0,03563
R	-50	1,212	0,2251	0,4799	1,125158	11,3317	-0,02565
	-25	1,2104	0,2251	0,4799	1,125163	8,0119	-0,0288
	+25	1,209	0,2251	0,4799	1,125167	6,7503	-0,03305
	+50	1,2087	0,2251	0,4799	1,125168	8,4301	-0,03467

IAE-PID’li sistemde, LFC kısmını en çok etkileyen R sabitiyken, AVR kısmında da τ_G zaman sabiti olduğu açıkça görülmektedir. İki sabitte de meydana gelen yüzdelik değişimler yerleşme zamanında büyük farklara yol açmaktadır.

Tablo 22. P_{obj} -PID’li sistem için tüm gürbüzlük sonuçları

Zaman Sabiti	Yüzdelik Değişim	AVR				LFC	
		t_s (s) %2	t_r (s)	t_p (s)	Maksimum Aşım (p.u.)	t_s (s) %0,05	Minimum Aşım (p.u.)
τ_A	-50	1,3679	0,4823	4,4334	1,000218	4,3051	-0,02704
	-25	1,311	0,4351	4,3267	1,000232	4,2855	-0,02733
	+25	0,9769	0,4185	0,8335	1,030733	4,2457	-0,028
	+50	1,1456	0,4235	0,863	1,057959	4,2254	-0,02832
τ_E	-50	1,9066	0,8605	5	1,000027	4,4497	-0,02651
	-25	1,6323	0,3592	5	1,000134	4,3612	-0,02718
	+25	1,3225	0,4728	1,004	1,036064	4,1603	-0,02791
	+50	1,8617	0,5204	1,1533	1,067352	4,0381	-0,02799
τ_G	-50	2,9522	0,2158	0,4461	1,106841	4,5675	-0,02742
	-25	2,1423	0,3122	0,602	1,030186	4,3979	-0,02784
	+25	0,8464	0,5322	2,1645	1,014989	4,1768	-0,02721
	+50	3,4883	0,6402	1,935	1,038067	4,1355	-0,02664
τ_S	-50	1,2553	0,4712	4,3572	1,000226	4,3062	-0,0272
	-25	0,7438	0,4429	4,2881	1,000236	4,286	-0,02742
	+25	0,6061	0,4013	0,7911	1,019425	4,2452	-0,02792
	+50	0,9536	0,387	0,7745	1,039084	4,2246	-0,0282
τ_g	-50	0,6565	0,4198	0,8214	1,00183	4,5801	-0,02506
	-25	0,6565	0,4197	0,8215	1,001878	4,4438	-0,02632
	+25	0,6563	0,4197	0,8218	1,00195	3,9533	-0,029
	+50	0,6563	0,4197	0,8219	1,001977	3,4634	-0,0303
τ_t	-50	0,6566	0,4198	0,8211	1,001771	5,1427	-0,02235
	-25	0,6565	0,4197	0,8214	1,001857	4,8242	-0,02507
	+25	0,6563	0,4197	0,8218	1,001962	4,5811	-0,03003
	+50	0,6563	0,4197	0,822	1,001996	6,9625	-0,03219
R	-50	0,6565	0,4197	0,8212	1,001833	11,323	-0,02187
	-25	0,6564	0,4197	0,8215	1,001889	7,745	-0,02524
	+25	0,6564	0,4197	0,8217	1,001935	6,8236	-0,02954
	+50	0,6564	0,4197	0,8218	1,001947	10,0083	-0,03105

P_{obj} -PID’li sistemde, R sabiti artarsa yerleşme zamanı da artar. τ_G zaman sabitinde de benzer farklar gözlemlenmektedir.

Tablo 23 ve 24’ te IAE-FOPI-FOPD’li sistemin gürbüzlük sonuçları verilmiştir.

Tablo 23. IAE-FOPI-FOPD’li sistem için tüm gürbüzlük sonuçları

Zaman Sabiti	Yüzdelik Değişim	AVR				LFC	
		t_s (s) %2	t_r (s)	t_p (s)	Maksimum Aşım (p.u.)	t_s (s) %0,05	Minimum Aşım (p.u.)
τ_A	-50	0,7261	0,0604	0,1326	1,195434	2,9494	-0,0076
	-25	0,7684	0,0747	0,1633	1,199881	2,9453	-0,00775
	+25	0,6086	0,0994	0,2168	1,197334	2,9342	-0,00767
	+50	1,3366	0,1106	0,2412	1,19568	2,926	-0,00756
τ_E	-50	0,9796	0,0502	0,1299	1,451811	2,9764	-0,00839
	-25	0,8237	0,0687	0,1614	1,298539	2,9604	-0,00811
	+25	1,5435	0,1071	0,2204	1,129377	2,9163	-0,00738
	+50	1,7089	0,128	0,2511	1,078506	2,8903	-0,00703
τ_G	-50	1,0085	0,048	0,1326	1,576853	2,9751	-0,00888
	-25	0,8229	0,0671	0,163	1,343804	2,9597	-0,00831
	+25	1,8148	0,1101	0,2186	1,098997	2,9197	-0,00725
	+50	2,119	0,4546	1,343	1,041564	2,9015	-0,00682
τ_S	-50	0,7267	0,0985	0,1826	1,042579	2,962	-0,00711
	-25	0,5799	0,0912	0,1854	1,123101	2,9513	-0,00744
	+25	1,1625	0,0851	0,1974	1,269451	2,9289	-0,00804
	+50	1,2845	0,0836	0,2038	1,334196	2,9168	-0,00831
τ_g	-50	0,5626	0,0875	0,191	1,199205	3,0661	-0,00579
	-25	0,5626	0,0875	0,191	1,199209	3,0075	-0,00686
	+25	0,5626	0,0875	0,191	1,199213	2,8882	-0,00851
	+50	0,5625	0,0875	0,191	1,199215	3,0386	-0,00918
τ_t	-50	0,5626	0,0875	0,191	1,199203	3,3005	-0,00532
	-25	0,5626	0,0875	0,191	1,199208	3,1316	-0,00667
	+25	0,5625	0,0875	0,191	1,199214	2,8111	-0,00866
	+50	0,5625	0,0875	0,191	1,199215	2,4295	-0,00944
R	-50	0,5626	0,0875	0,191	1,199211	3,1545	-0,00768
	-25	0,5626	0,0875	0,191	1,199212	3,0182	-0,00773
	+25	0,5626	0,0875	0,191	1,199212	2,896	-0,00776
	+50	0,5626	0,0875	0,191	1,199212	2,8684	-0,00777

IAE-FOPI-FOPD’li sistemi en çok etkileyen parametreler τ_G ve τ_t olmasına karşın yerleşme zamanlarında neredeyse benzer sonuçlar verdiği Tablo 23’te gözlemlenmektedir. Oluşan farklar grafiklerde de anlaşılacağı üzere aşımelerde meydana gelmektedir.

Tablo 24. P_{obj} -FOPI-FOPD'li sistem için tüm gürbüzlük sonuçları

Zaman Sabiti	Yüzdelik Değişim	AVR				LFC	
		t_s (s) %2	t_r (s)	t_p (s)	Maksimum Aşım (p.u.)	t_s (s) %0,05	Minimum Aşım (p.u.)
τ_A	-50	0,9917	0,2734	2,1335	1,00092	3,2515	-0,00298
	-25	0,9668	0,2526	2,0248	1,001152	3,2483	-0,00293
	+25	1,0251	0,2675	0,5205	1,042478	3,2416	-0,00301
	+50	0,7703	0,279	0,562	1,071249	3,2382	-0,00307
τ_E	-50	1,391	0,1526	0,2825	1,043731	3,264	-0,00348
	-25	1,0917	0,2055	0,3727	1,01574	3,255	-0,00313
	+25	0,456	0,3069	0,624	1,019548	3,2337	-0,00293
	+50	1,6589	0,3527	0,8391	1,044603	3,2206	-0,00295
τ_G	-50	2,1401	0,1312	0,2857	1,192587	3,2233	-0,0038
	-25	1,0763	0,1894	0,3724	1,073168	3,2329	-0,00325
	+25	0,5987	0,3389	1,6055	1,018426	3,2605	-0,00285
	+50	2,7148	0,4307	1,6383	1,036332	3,2805	-0,00281
τ_S	-50	0,9911	0,3039	2,0461	1,001185	3,2663	-0,0028
	-25	0,982	0,2762	1,999	1,001289	3,2557	-0,00287
	+25	1,0132	0,2447	0,4718	1,040351	3,2342	-0,00302
	+50	1,0475	0,2356	0,4714	1,072802	3,2234	-0,00309
τ_g	-50	0,9901	0,2574	0,4785	1,008886	3,3655	-0,00272
	-25	0,99	0,2574	0,4785	1,008898	3,3063	-0,00278
	+25	0,9898	0,2574	0,4785	1,008924	3,1815	-0,00328
	+50	0,9897	0,2574	0,4785	1,008938	3,1159	-0,00371
τ_t	-50	0,9904	0,2574	0,4784	1,008872	3,5774	-0,00247
	-25	0,9901	0,2574	0,4785	1,008891	3,4161	-0,00259
	+25	0,9897	0,2574	0,4785	1,00893	3,0672	-0,00348
	+50	0,9895	0,2574	0,4785	1,008949	2,8882	-0,00406
R	-50	0,99	0,2574	0,4785	1,008909	3,341	-0,00288
	-25	0,99	0,2574	0,4785	1,00891	3,2742	-0,00292
	+25	0,9899	0,2574	0,4785	1,008911	3,2288	-0,00296
	+50	0,9899	0,2574	0,4785	1,008911	3,2186	-0,00297

P_{obj} -FOPI-FOPD'li sistemde, τ_t ve τ_G sabitleri sistemi en çok etkileyen iki parametre olmasına rağmen yerleşme ve aşım değerlerinde benzer yanıtlar vermiştir.

4. SONUÇLAR

Tez çalışmasında, geliştirilmiş FDB-ZOA algoritmasının performansı, matematiksel yöntemler ve mühendislik problemleri kullanılarak temel ZOA algoritması ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma bir dizi performans testi ile gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta, on rakip algoritma seçilerek bu algoritmalarla birlikte Wilcoxon ve Friedman testlerinde performansları karşılaştırılmıştır. Wilcoxon testi sonuçlarına göre, FDB-ZOA algoritması, ZOA algoritmasını CEC20 benchmark problem paketinde 8/2/0 skorla, CEC17' de ise 27/2/0 ezici bir farkla geçmiştir. FDB-ZOA algoritması rakip algoritmalarına göre en iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır.

AVR-LFC güç sistemi çatısı altında literatürdeki 5 farklı amaç fonksiyonları kullanılarak FDB-ZOA ve ZOA algoritmaları karşılaştırılmıştır. Algoritmaların performanslarını daha iyi karşılaştırmak için PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicileri kullanılmıştır. Optimize edilen denetleyici performansları, zaman bölge ve gürbüzlük analizleriyle değerlendirilmiştir. Zaman bölge analizi sonuçlarına göre, FOPI-FOPD denetleyicisinde en az aşımı FDB-ZOA'da 1,1292 p.u. ile ITAE verirken, LFC kısmında ise -0,0014 p.u. değer ile P_{obj} amaç fonksiyonu vermiştir. FOPID denetleyicisinde en az aşımı FDB-ZOA'da 1,0178 p.u. değeri ile IAE, LFC kısmında ise -0,0087 p.u. ile P_{obj} amaç fonksiyonu vermiştir. PID denetleyicisinde en iyi değerler hem FDB-ZOA hem de ZOA vermiştir. Bu da PID denetleyicisinin FDB-ZOA'nın performansını göstermekte yetersiz olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, amaç fonksiyonlarının yerleşme, yükselme, tepe zamanları ve aşma sonuçları da değerlendirilmiştir.

En başarılı sonuçları veren IAE ve P_{obj} amaç fonksiyonlarına gürbüzlük analizi uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, FDB-ZOA algoritması ile optimize edilmiş sistemin ZOA algoritmasına kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sonuçlar, FDB-ZOA algoritmasının güç sistemlerindeki optimizasyon uygulamalarında önemli bir gelişme sağladığını göstermektedir.

5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, FDB seçim yöntemi ile geliştirilen ZOA algoritmasının performansı sunulmuştur. Bu tez konusu ile çalışma yapmak isteyen araştırmacılara ve uygulayıcılara iletmek istenen öneriler aşağıdaki gibi belirtilmiştir;

- Algoritmalarındaki popülasyon çeşitliliği, algoritmanın geliştirilmesinde önemli bir detaydır. FDB uygulanabileceği yerler ne kadar fazlaysa algoritma o kadar geliştirilmeye uygundur.
- Sistemde optimize edilecek parametrelerin fazla olması, sistemi daha karmaşık hale getirmesine rağmen verimi arttırmaktadır. Farklı denetleyiciler ile AVR-LFC sistemine entegre edilerek sistemden daha iyi performans alınabilir
- AVR-LFC sistemlerinde frekans ile gerilimin, farklı genliklerde ve sapma aralıklarının farklı olması performansını etkilemektedir. Bu problemlere odaklanarak daha farklı bir amaç fonksiyonu tasarlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Ahmed, B. S., Sahib, M. A., Gambardella, L. M., Afzal, W., & Zamli, K. Z. (2016). Optimum design of PI λ D μ controller for an automatic voltage regulator system using combinatorial test design. *PLoS ONE*, 11(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166150>
- Akalın, G. (2000). *Güç sistemlerinde yük-frekans kontrolü*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli.
- Ali, T., Malik, S. A., Daraz, A., Adeel, M., Aslam, S., & Herodotou, H. (2023). Load Frequency Control and Automatic Voltage Regulation in Four-Area Interconnected Power Systems Using a Gradient-Based Optimizer. *Energies*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/en16052086>
- Ali, T., Malik, S. A., Daraz, A., Aslam, S., & Alkhalifah, T. (2022). Dandelion Optimizer-Based Combined Automatic Voltage Regulation and Load Frequency Control in a Multi-Area, Multi-Source Interconnected Power System with Nonlinearities. *Energies*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/en15228499>
- Ali, T., Malik, S. A., Hameed, I. A., Daraz, A., Mujlid, H., & Azar, A. T. (2022). Load Frequency Control and Automatic Voltage Regulation in a Multi-Area Interconnected Power System Using Nature-Inspired Computation-Based Control Methodology. *Sustainability (Switzerland)*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/su141912162>
- Awad, N., Ali, M. Z., Liang, J., & Qu, B. Y. & S. P. N. (2016). *Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2017 special session and competition on single objective bound constrained real-parameter numerical optimization*.
- Awad, N. H. , Ali, M. Z., Suganthan, P. N. , & Reynold, R. G. (2016). *An ensemble sinusoidal parameter adaptation incorporated with L-SHADE for solving CEC2014 benchmark problems*.
- Ayas, M. S., & Sahin, E. (2021). FOPID controller with fractional filter for an automatic voltage regulator. *Computers and Electrical Engineering*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106895>
- Azzam, M., & Mohamed, Y. S. (2002). Robust controller design for automatic generation control based on Q-parameterization. *Energy Conversion and Management*, 43(13). [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00118-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00118-2)
- Barzkar, A., & Ghassemi, M. (2020). Electric power systems in more and all electric aircraft: A review. In *IEEE Access* (Vol. 8). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024168>
- Bevrani, H. (2009). Robust Power System Frequency Control. In *Robust Power System Frequency Control*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84878-5>

- 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). <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.05.056>
- Can, O. (2022). *Yenilenebilir enerji kaynakları içeren güç sistemleri için sezgisel algoritma tabanlı yük frekans denetleyici*. Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce.
- Caro, T., Izzo, A., Reiner, R. C., Walker, H., & Stankowich, T. (2014). The function of zebra stripes. *Nature Communications*, 5. <https://doi.org/10.1038/ncomms4535>
- Castillo, V. Z., Boer, H. S. de, Muñoz, R. M., Gernaat, D. E. H. J., Benders, R., & van Vuuren, D. (2022). Future global electricity demand load curves. *Energy*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124741>
- Cavdar, B., Dincer, K., Baslik, S., Sahin, E. , & Nuroglu, F. M. (2023). A novel objective function design and detailed analysis for the AVR-LFC system. *Springer India*, 4(48), 229. <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02292-zS>
- Cavdar, B., Sahin, E., Sesli, E., Akyazi, O., & Nuroglu, F. M. (2023). Cascaded fractional order automatic generation control of a PV-reheat thermal power system under a comprehensive nonlinearity effect and cyber-attack. *Electrical Engineering*, 105(6). <https://doi.org/10.1007/s00202-023-01943-y>
- Danell, K. , Bergström, R. , & Duncon, P. ,& P. J. (2006). Large herbivore ecology ecosystem dynamics and conservation. *Choice Reviews Online*, 44(04). <https://doi.org/10.5860/choice.44-2102>
- Dhanasekaran, B., Siddhan, S., & Kaliannan, J. (2020). Ant colony optimization technique tuned controller for frequency regulation of single area nuclear power generating system. *Microprocessors and Microsystems*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2019.102953>
- Dudgeon, G. J. W., Leithead, W. E., Dyśko, A., O'Reilly, J., & McDonald, J. R. (2007). The effective role of AVR and PSS in power systems: Frequency response analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4). <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.908404>
- Duman, S., Kahraman, H. T., Sonmez, Y., Guvenc, U., Kati, M., & Aras, S. (2022). A powerful meta-heuristic search algorithm for solving global optimization and real-world solar photovoltaic parameter estimation problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104763>
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). New optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science*. <https://doi.org/10.1109/mhs.1995.494215>
- Ekinci, S., & Hekimoglu, B. (2019). Improved Kidney-Inspired Algorithm Approach for Tuning of PID Controller in AVR System. *IEEE Access*, 7. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906980>

- Fayek, H. H., & Rusu, E. (2022). Novel Combined Load Frequency Control and Automatic Voltage Regulation of a 100% Sustainable Energy Interconnected Microgrids. *Sustainability* (Switzerland), 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159428>
- 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). <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.821821>
- Golnaraghi, F., & Benjamin C.Kuo. (2017). Automatic Control Systems(10th Edition). In *McGraw-Hill Education*.
- Goud, B. S., Kalyan, C. N. S., Rao, G. S., Reddy, B. N., Kumar, Y. A., & Reddy, C. R. (2022). Combined LFC and AVR Regulation of Multi Area Interconnected Power System Using Energy Storage Devices. *2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation, SeFeT 2022*. <https://doi.org/10.1109/SeFeT55524.2022.9909102>
- Gozde, H. , Taplamacıoğlu, M. C. , Kocaarslan, I. , & Senol, M. A. (2009). İki bölgele ara-ısıtmalı termal güç sisteminin yük-frekans kontrolü için parçacık sürü optimizasyonu tabanlı PI-kontrolör. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 1, 13–21.
- Hossam-Eldin, A. A., Negm, E., Ragab, M., & AboRas, K. M. (2023). A maiden robust FPIDD2 regulator for frequency-voltage enhancement in a hybrid interconnected power system using Gradient-Based Optimizer. *Alexandria Engineering Journal*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.10.029>
- İbrahim, E. K. E. (2020). Yapay Arı Kolonisi Algoritmasına Dayalı PID Denetleyicisini Kullanan Termal Üniteli Mikro Şebeke Güç Sisteminde Frekans Kontrolü. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(3).
- Kahraman, H. T., Aras, S., & Gedikli, E. (2020). Fitness-distance balance (FDB): A new selection method for meta-heuristic search algorithms. *Knowledge-Based Systems*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105169>
- Kalyan, C. N. S., & Rao, G. S. (2021). Demonstrating the Effect of Excitation Cross Coupling and Communication Time Delays on Automatic Generation Control. *2021 International Conference on Nascent Technologies in Engineering, ICNET 2021- Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICNTE51185.2021.9487779>
- Kaveh, A., Talatahari, S., & Khodadadi, N. (2022). Stochastic paint optimizer: theory and application in civil engineering. *Engineering with Computers*, 38(3). <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01179-5>
- Krohling, R. A., Rey, J. P., Krohling, R. A., & Rey, J. P. (2001). Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithms. In *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (Vol. 5, Issue 1). <https://doi.org/10.1109/4235.910467>
- Kumar Sahoo, A., Kumar Sahoo, A., Nayak, S., & Kumar Kar, S. (2024). Load frequency and voltage control of two area interconnected power system using

- covariance matrix adaptation evolution strategy based Aquila optimization optimized fast fuzzy-fractional order tilt integral derivative controller. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 8, 100488. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100488>
- Kumar, V., Sharma, V., & Naresh, R. (2023). HHO-based Model Predictive Controller for Combined Voltage and Frequency Control Problem Including SMES. *IETE Journal of Research*, 69(5). <https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1908180>
- Lal, D. K., & Barisal, A. K. (2019). Combined load frequency and terminal voltage control of power systems using moth flame optimization algorithm. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s43067-019-0010-3>
- Li, A., Feng, M., Li, Y., & Liu, Z. (2016). Application of Outlier Mining in Insider Identification Based on Boxplot Method. *Procedia Computer Science*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.069>
- Liang, J. J., Qu, B. Y., & Suganthan, P. N. (2013). Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2014 Special Session and Competition on Single Objective Real-Parameter Numerical Optimization. *Technical Report*, 2, Zhengzhou, China.
- Liang, J. J., Suganthan, P. N., Qu, B. Y., Gong, D. W., & Yue, C. T. (2019). Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2020 special session on multimodal multiobjective optimization. *Technical Report 201912*, Zhengzhou, China
- Mallipeddi, R., & Suganthan, P. N. (2010). *Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2010 Competition on Constrained Real-Parameter Optimization*.
- Micev, M., Čalasan, M., & Oliva, D. (2020). Fractional order PID controller design for an AVR system using Chaotic Yellow Saddle Goatfish Algorithm. *Mathematics*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/math8071182>
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Misaghi, M., & Yaghoobi, M. (2019). Improved invasive weed optimization algorithm (IWO) based on chaos theory for optimal design of PID controller. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3). <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.01.001>
- Moschos, I., & Parissis, 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.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.04.010>

- Naga Sai Kalyan, C. H., & Sambasiva Rao, G. (2022). Combined frequency and voltage stabilisation of multi-area multisource system by DE-AEFA optimised PID controller with coordinated performance of IPFC and RFBs. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1).
<https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1860130>
- Naga Sai Kalyan, C. H., Srikanth Goud, B., Rami Reddy, C., Bajaj, M., Sharma, N. K., Alhelou, H. H., Siano, P., & Kamel, S. (2022). Comparative Performance Assessment of Different Energy Storage Devices in Combined LFC and AVR Analysis of Multi-Area Power System. *Energies*, 15(2).
<https://doi.org/10.3390/en15020629>
- Nahas, N., Abouheaf, M., Darghouth, M. N., & Sharaf, A. (2021). A multi-objective AVR-LFC optimization scheme for multi-area power systems. *Electric Power Systems Research*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107467>
- Naruei, I., & Keynia, F. (2022). Wild horse optimizer: a new meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering with Computers*, 38. <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01438-z>
- Oğuzkağan Alıç. (2014). *Güç Sistemlerinde Optimizasyon Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici ile Yük Frekans Kontrolü*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Oladipo, S., Sun, Y., & Wang, Z. (2021). An effective hFPAPFA for a PIDA-based hybrid loop of Load Frequency and terminal voltage regulation system. *2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica, PowerAfrica 2021*.
<https://doi.org/10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543348>
- 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). <https://doi.org/10.1109/81.817385>
- Özbek, N. S., & Eker, İ. (2019). A novel modified delay-based control algorithm with experimental application. *Information Technology and Control*, 48(1).
<https://doi.org/10.5755/j01.itc.48.1.19066>
- Prakash, A., & Parida, S. K. (2020). Combined frequency and voltage stabilization of thermal-thermal system with UPFC and RFB. *PIICON 2020 - 9th IEEE Power India International Conference*.
<https://doi.org/10.1109/PIICON49524.2020.9113034>
- Ramoji, S. K., & Saikia, L. C. (2022). Comparative performance of multiple energy storage systems in unified voltage and frequency regulation of power system including electric vehicles. *Energy Storage*, 4(6).
<https://doi.org/10.1002/est2.360>

- Report, I. C. (1981). *Excitation system models for power system stability studies*. 145.
- Saadat, H. (1999). *Power system analysis* (Vol. 2). McGraw-Hill.
- Sahani, A. K., Raj, U., Shankar, R., & Mandal, R. K. (2019). Firefly optimization based control strategies for combined load frequency control and automatic voltage regulation for two-area interconnected power system. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 11(4). <https://doi.org/10.15676/ijeei.2019.11.4.8>
- Şahin, E. (2019). *Design of a PID Controller with Fractional Order Derivative Filter for Automatic Voltage Regulation in Power Systems*. <https://doi.org/10.36287/setsoci.4.6.013>
- Sallam, K. M., Elsayed, S. M., Sarker, R. A., & Essam, D. L. (2017). Multi-method based orthogonal experimental design algorithm for solving CEC2017 competition problems. *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2017 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969461>
- Sedighy, S. H., Mallahzadeh, A. R., Soleimani, M., & Rashed-Mohassel, J. (2010). Optimization of printed yagi antenna using invasive weed optimization (IWO). *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 9. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2011.2105458>
- Sekhar, C., & Dahiya, R. (2023). Robust framework based on hybrid deep learning approach for short term load forecasting of building electricity demand. *Energy*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126660>
- Shah, P., & Agashe, S. (2016). Review of fractional PID controller. In *Mechatronics* (Vol. 38). <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.06.005>
- Shayeghi, H., Shayanfar, H. A., & Jalili, A. (2009). Load frequency control strategies: A state-of-the-art survey for the researcher. *Energy Conversion and Management*, 50(2). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.014>
- Singh, A., Sharma, V., Kumar, V., Naresh, R., & Rahi, O. P. (2023). AOA based optimal control of combined AVR-LFC model in wind integrated power system. *Wind Engineering*, 47(3). <https://doi.org/10.1177/0309524X221133791>
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4). <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Sun, Y., Zhou, X., & Huang, Z. (2021). Optimal PID Controller Design for AVR System Based on Multi-objective Optimization and Multi-attribute Decision Making. *Proceedings of the 33rd Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2021*. <https://doi.org/10.1109/CCDC52312.2021.9602735>
- 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). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.014>
- Trojovska, E., Dehghani, M., & Trojovsky, P. (2022). Zebra Optimization Algorithm: A New Bio-Inspired Optimization Algorithm for Solving Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172789>
- Veinović, S., Stojić, D., & Ivanović, L. (2023). Optimized PID2 controller for AVR systems regarding robustness. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108646>
- Vinagre, B. M., Podlubny, I., Dorcak, L., & Feliu, V. (2000). On Fractional PID Controllers: A Frequency Domain Approach. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(4). [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)38220-4](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)38220-4)
- Wilson, A. M., Hubel, T. Y., Wilshin, S. D., Lowe, J. C., Lorenc, M., Dewhurst, O. P., Bartlam-Brooks, H. L. A., Diack, R., Bennett, E., Golabek, K. A., McNutt, J. W., Curtin, N. A., & West, T. G. (2018). Biomechanics of predator-prey arms race in lion, zebra, cheetah and impala. *Nature*, 554(7691). <https://doi.org/10.1038/nature25479>
- Yang, X. S. (2009). Firefly algorithms for multimodal optimization. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5792 LNCS. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6_14
- Yang, X. S. (2012). Flower pollination algorithm for global optimization. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 7445 LNCS. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32894-7_27
- Yılmaz, Z. Y. (2020). *Güç sistemlerinde yük-frekans kontrolünde PID denetleyici ve parametrelerin simbiyotik organizmalar arama algoritması ile ayarı*. Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Düzce.
- Yue, C. T. , Price, K. V. , Suganthan, P. N. , Liang, J. J. , Ali, M. Z. , & Qu, B. Y. , & B. P. P. (2019). *Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2020 special session and competition on single objective bound constrained numerical optimization*.
- Zhao, W., Wang, L., & Zhang, Z. (2020). Artificial ecosystem-based optimization: a novel nature-inspired meta-heuristic algorithm. *Neural Computing and Applications*, 32(13). <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04452-x>

ÖZGEÇMİŞ

Ömer ÖZTÜRK, İlköğretimini Kuleli İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2016 yılında Zühtü Kurtulmuş Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2016-2017 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2020 yılında bu bölümden mezun oldu. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. Orta-iyi derece İngilizce bilmektedir.

Öztürk, Ö., Akyazı, Ö., & Çavdar, B. (2023). Fotovoltaik sistemlerde gri kurt optimizasyon (gko) algoritması ve artımlı iletkenlik (ai) yönteminin maksimum güç noktası takibi (mgnt) için karşılaştırılması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 13(4), 962-978.

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

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