

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde bana rehberlik eden, bilgi ve tecrübeleriyle katkıda bulunan tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKYAZI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, araştırmam boyunca değerli görüşleri ve destekleriyle yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Bora ÇAVDAR'a minnettarım.

Son olarak bu süreçte bana maddi ve manevi destek olan ve beni teşvik eden çok değerli aileme ve arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Tural ASLAN
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Aç Gözlü Uygunluk-Mesafe Dengesi Seçim Yöntemine Sahip Geliştirilmiş Yapay Sinek Kuşu Algoritması ile Yük Frekans Kontrolü Tasarımının Gerçekleştirilmesi” 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.

23/10/2024

Tural ASLAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Motivasyonu, Amacı, Konusu ve Özgünlüğü	8
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	9
2.1. Yöntem	9
2.1.1. Yapay Sinek Kuşu Algoritması (AHA)	9
2.1.2. Geliştirme Yöntemi (FDB)	13
2.1.3. Önerilen Algoritma (FDBAHA)	14
2.1.4. Tezde Kullanılan Algoritmalar	16
2.2. Matematiksel Problemler	20
2.2.1. CEC 2017 Tanıtımı	20
2.2.2. CEC 2020 Tanıtımı	21
2.3. Kontrol Sistemleri Problemi.....	22
2.3.1. Yük Frekans Kontrolü.....	22
2.3.2. Sistem Tanıtımı	24
2.3.3. Denetleyici Tanıtımı	28
2.3.4. Amaç Fonksiyonu Tanıtımı (ITAE).....	31
2.4. Değerlendirme Yöntemleri.....	32
2.4.1. İstatistiksel Değerlendirme Yöntemleri	32
2.4.2. Kontrol Sistemi Değerlendirme Yöntemleri	34
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
3.1. Matematiksel Problemlerin Sonuçları	36

3.2. Kontrol Sistemleri Probleminin Sonuçları	53
3.2.1. İki Alanlı Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi Sonuçları	53
3.2.2. İki Alanlı Çok Kaynaklı Güç Sistemi Sonuçları	62
3.2.3. İki Alanlı FV-Termal Güç Sistemi Sonuçları	71
4. SONUÇLAR.....	81
5. ÖNERİLER.....	82
6. KAYNAKLAR	83
7. EKLER.....	90
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

AÇ GÖZLÜ UYGUNLUK-MESAFE DENGESİ SEÇİM YÖNTEMİNE SAHİP GELİŞTİRİLMİŞ YAPAY SİNEK KUŞU ALGORİTMASI İLE YÜK FREKANS KONTROLÜ TASARIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Tural ASLAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKYAZI
2024, 90 Sayfa

Bu tez çalışmasında, son yıllarda literatüre sunulmuş uygunluk-mesafe dengesi (fitness-distance balance, FDB) seçim yöntemi yapay sinek kuşu algoritmasına (artificial hummingbird algorithm, AHA) uygulanmış ve geliştirilen FDBAHA algoritması güç sistemleri için yük frekans kontrolü (YFK) probleminin çözümünde kontrol yöntemi olarak önerilmiştir. İlk olarak geliştirilen FDBAHA algoritmasının performansı CEC 2017 ve CEC 2020 problemleri bazında temel AHA algoritması ve literatürden seçilen bazı önemli algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra YFK gerçekleştirmek adına, iki alanlı ısıtmasız termal, iki alanlı çok kaynaklı ve fotovoltaik-termal olmak üzere üç ayrı güç sistemi MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Her güç sistemi için parametre değerleri FDBAHA algoritması ile optimize edilen üç ayrı denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyicilerin performansları, her bir güç sisteminde frekans ve bağlantı hattı güç değişim eğrileri çizdirilerek ve buna ek olarak yerleşme süreleri tablolar halinde gösterilerek kıyaslanmıştır. Sonuç olarak geliştirilen FDBAHA algoritmasının performansındaki gelişim istatistiksel ve kontrol yöntemi analizleri ile test edilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yük frekans kontrolü, meta-sezgisel arama, uygunluk-mesafe dengesi, yapay sinek kuşu algoritması

Master Thesis

SUMMARY

REALIZING OF LOAD FREQUENCY CONTROL DESIGN WITH AN ADVANCED ARTIFICIAL HUMMINGBIRD ALGORITHM USING GREEDY FITNESS-DISTANCE BALANCE SELECTION METHOD

Tural ASLAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Energy Systems Engineering Graduate Program
Supervisor: Dr. Asst. Prof. Ömür AKYAZI
2024, 90 Pages

In this thesis, the fitness-distance balance (FDB) selection method, recently introduced in the literature, has been applied to the artificial hummingbird algorithm (AHA), and the developed FDBAHA algorithm is proposed as a control method for solving the load frequency control (LFC) problem in power systems. Initially, the performance of the developed FDBAHA algorithm was compared with the basic AHA algorithm and several significant algorithms selected from the literature based on the CEC 2017 and CEC 2020 problems. Subsequently, to implement LFC, three distinct power systems (two-area non-reheat thermal, two-area multi-source, and photovoltaic-thermal) were modeled in MATLAB/Simulink. For each power system, three separate controllers were designed with parameter values optimized using the FDBAHA algorithm. The performance of the designed controllers was compared by plotting frequency and tie-line power deviation curves for each power system and additionally presenting settling times in tabular form. The improvement in the performance of the developed FDBAHA algorithm was evaluated through statistical and control method analyses, and the results were discussed.

Key Words: Load frequency control, meta-heuristic search, fitness-distance balance, artificial hummingbird algorithm

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. AHA algoritmasının akış diyagramı.....	12
Şekil 2. Yük frekans kontrolünün blok diyagramı	23
Şekil 3. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin blok diyagramı	24
Şekil 4. İki alanlı çok kaynaklı (Termal/Hidro/Gaz) güç sisteminin blok diyagramı	26
Şekil 5. İki alanlı FV-termal güç sisteminin blok diyagramı	28
Şekil 6. PID denetleyicisinin blok diyagramı.....	29
Şekil 7. FOPID denetleyicisinin blok diyagramı.....	30
Şekil 8. FOPI-FOPD denetleyicisinin blok diyagramı	31
Şekil 9. Box-plot grafiği	33
Şekil 10. CEC 2017 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=30)	40
Şekil 11. CEC 2017 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=50)	41
Şekil 12. CEC 2017 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=100)	42
Şekil 13. CEC 2020 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=30)	43
Şekil 14. CEC 2020 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=50)	44
Şekil 15. CEC 2020 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=100)	45
Şekil 16. CEC 2017 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=30).....	46
Şekil 17. CEC 2017 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=50).....	47
Şekil 18. CEC 2017 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=100).....	48
Şekil 19. CEC 2020 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=30).....	49
Şekil 20. CEC 2020 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=50).....	50
Şekil 21. CEC 2020 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=100).....	51
Şekil 22. Alan-1 %10 yük altındayken iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri	55
Şekil 23. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin Tg parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri	59
Şekil 24. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin Tg parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri	60
Şekil 25. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin Tg parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri	61

Şekil 26. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemine uygulanan (a) rastgele yük değişimi ve bu yük sonucunda elde edilen (b) Δf_1 , (c) Δf_2 ve (d) ΔP_{tie} eğrileri.....	62
Şekil 27. Alan-1 %1 yük altındayken iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri	64
Şekil 28. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin Tg parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri.....	68
Şekil 29. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin Tg parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri.....	69
Şekil 30. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin Tg parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri	70
Şekil 31. İki alanlı çok kaynaklı güç sistemine uygulanan (a) rastgele yük değişimi ve bu yük sonucunda elde edilen (b) Δf_1 , (c) Δf_2 ve (d) ΔP_{tie} eğrileri.....	71
Şekil 32. Termal alan %10 yük altındayken iki alanlı FV-termal güç sisteminin (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri	73
Şekil 33. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin Tg parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri.....	77
Şekil 34. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin Tg parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri.....	78
Şekil 35. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin Tg parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri	79
Şekil 36. FV-termal güç sistemine uygulanan (a) rastgele yük değişimi ve bu yük sonucunda elde edilen (b) Δf_1 , (c) Δf_2 ve (d) ΔP_{tie} eğrileri.....	80

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Son zamanlarda yapılmış YFK çalışmaları.....	7
Tablo 2. Tezde kullanılan algoritmaların popülasyon boyutları ve parametre ayarları	16
Tablo 3. CEC 2017 test fonksiyonları	21
Tablo 4. CEC 2020 test fonksiyonları	22
Tablo 5. Friedman testi ile elde edilen sıralamalar.....	37
Tablo 6. Wilcoxon testi ile elde edilen ikili karşılaştırma sonuçları	37
Tablo 7. CEC 2017 için ortalama ve standart sapma değerleri	38
Tablo 8. CEC 2020 için ortalama ve standart sapma değerleri	39
Tablo 9. FDBAHA ve rakip algoritmalar için Friedman testi ile elde edilen sıralamalar.....	52
Tablo 10. FDBAHA ve rakip algoritmalar için Wilcoxon testi ile elde edilen ikili karşılaştırma sonuçları	52
Tablo 11. Alan-1 %10 yük altındayken iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi için tasarlanan en iyi denetleyici parametreleri	53
Tablo 12. Alan-1 %10 yük altındayken iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi için zaman bölgesi analizi sonuçları	54
Tablo 13. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları	56
Tablo 14. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları	57
Tablo 15. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları.....	58
Tablo 16. Alan-1 %1 yük altındayken iki alanlı çok kaynaklı güç sistemi için tasarlanan ideal denetleyici parametreleri	63
Tablo 17. Alan-1 %1 yük altındayken iki alanlı çok kaynaklı güç sistemi için zaman bölgesi analizi sonuçları	63
Tablo 18. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları.....	65
Tablo 19. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları.....	66
Tablo 20. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları	67
Tablo 21. Termal alan %10 yük altındayken iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi için tasarlanan ideal denetleyici parametreleri	72

Tablo 22. Termal alan %10 yük altındayken iki alanlı FV-termal güç sistemi için zaman bölgesi analizi sonuçları	72
Tablo 23. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları.....	74
Tablo 24. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları.....	75
Tablo 25. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları	76



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

i	Alan numarası ($i=1,2$)
f	Nominal alan frekansı (Hz)
P_R	Alan anma gücü (MW)
P_L	Nominal işletme yükü (MW)
Δf_i	Frekans değişimi (Hz)
ΔP_{Li}	Kademeli yük değişimi
ΔP_{tie}	Bağlantı hattı güç değişimi (p.u.)
B_i	Frekans yönelim faktörü (p.u. MW/Hz)
R_i	Hız regülatörü sabiti (Hz/p.u.)
T_t	Buhar türbini zaman sabiti (s)
T_g	Hız regülatörü zaman sabiti (s)
T_{12}	Senkronize tork katsayısı (p.u.)
T_{rs}	Hidro türbin hız regülatörü sıfırlama süresi (s)
T_{gh}	Hidro türbin hız regülatörü zaman sabiti (s)
T_{rh}	Geçici düşüş zaman sabiti (s)
T_w	Cebri borudaki suyun nominal başlama süresi (s)
K_r	Ara-ısıtma kazanç sabiti
T_r	Ara-ısıtma zaman sabiti (s)
K_{PS}	Güç sistemi kazanç sabiti
T_{PS}	Güç sistemi zaman sabiti (s)
K_T	Termal ünitenin katılım faktörü
K_H	Hidro ünitesinin katılım faktörü
K_G	Gaz ünitesinin katılım faktörü
b_g	Valf konumlandırıcısının gaz türbini sabiti (s)
c_g	Gaz türbini valfi konumlandırıcısı
Y_g	Gaz türbini hız regülatörü gecikme süresi sabiti
X_g	Gaz türbini hız regülatörü sağlama süresi sabiti (s)
T_f	Gaz türbini yakıtı zaman sabiti (s)
T_{cd}	Kompresör deşarj hacmi zaman sabiti (s)

T_{cr}	Gaz türbini yanma reaksiyon gecikme süresi (s)
a/b	FV panel için kazanç değerleri
c/d	FV güç sistemi için zaman sabitleri
MW	Mega Watt
Hz	Hertz
s	Saniye
K_p	Oransal kazanç
K_I	İntegral kazancı
K_D	Türev kazancı
λ	Üstel pozitif sayı
μ	Üstel pozitif sayı
AHA	Artificial Hummingbird Algorithm
AKH	Alan Kontrol Hatası
CEC	Congress on Evolutionary Computation
FDB	Fitness-Distance Balance
FOPID	Fractional Order- Proportional Integral Derivative
FV	Fotovoltaik
GDB	Governor Dead Band
GRC	Generation Rate Constraints
MSA	Meta-Sezgisel Arama
PID	Proportional Integral Derivative
YFK	Yük Frekans Kontrolü

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Optimizasyon, bir problem için belirli kısıtlamalar altında istenen çözümün elde edilme süreci olarak tanımlanır. Mühendislik, matematik, ekonomi, ulaşım ve diğer birçok alanda karşılaştığımız problemler optimizasyon teknikleri ile çözülebilmektedir. Optimizasyonun amacı optimize edilen problem için belirlenen amaç fonksiyonunun minimum veya maksimum değerini bulmaktır (Hussain vd., 2019). Problemin karmaşıklığı, boyutu ve tasarlanması gereken parametre değerlerine göre optimizasyon yöntemleri değişiklik gösterir. Herhangi bir belirsizlik ve rastgelelik içermeyen deterministik yöntemler sabit sınırlamalara ve değişkenlik göstermeyen koşullara sahip problemler için ideal yöntemlerdir. Ancak çoğu gerçek dünya problemi belirsizlikler içerir ve daha karmaşıktır. Bu durumda deterministik olmayan (stokastik) yöntemler, diğer bir deyişle sezgisel arama yöntemleri bu tür problemlerin çözümü için yaygın olarak tercih edilir (Bakır, 2022; Hashim vd., 2021).

Sezgisel arama yöntemlerinin gelişimi ve endüstri mühendisliği problemlerinin çözümünde kullanımı elli yılı aşkın bir süredir devam etmektedir. Daha spesifik ve kısıtlı problem çözümlerinde kullanılan sezgisel algoritmaların aksine meta-sezgisel arama (MSA) algoritmaları daha karmaşık ve yüksek boyutlu problemlerin üstesinden gelebilmektedir. Fred Glover (Glover, 1986) tarafından 1986'da ilk kez kullanılan "meta-sezgisel" kelimesindeki "meta" sözcüğünden de anlaşılacağı üzere MSA algoritmaları sezgisel olanların üst seviyesi olarak bilinir (Abdel-Basset vd., 2018). MSA algoritmaları teknolojik gelişmelerle birlikte çok yaygınlaşmış ve birçok alanda karşılaşılan problemlere uyarlanarak çözüm oluşturmuştur. Literatürde yüzlerce MSA algoritması bulunur ve yeni algoritmalar geliştirilmeye devam etmektedir. Ancak son zamanlarda araştırmacılar arasında yeni bir MSA algoritması geliştirmek yerine var olan bir algoritmanın geliştirilmesi daha çok popülerleşmiştir (Aras vd., 2021).

MSA algoritmalarında çözüm adaylarının arama süreci keşif ve sömürü olmak üzere iki işlev ile gerçekleştirilir. Arama süreci boyunca çözüm adayları ya keşif yaparak çeşitliliği artırır ya da komşuluk araması yaparak sömürü işlevini gerçekleştirir. Bir MSA algoritmasının verimliliği keşif ve sömürü işlevlerinin arasındaki dengeyle sağlanır. MSA

algoritmaları çalışma prensiplerine, arama stratejilerine veya matematiksel yapılarına göre birçok farklı şekilde sınıflandırılabilir. Bunlara yapı tabanlı ve popülasyon tabanlı (I.H. Osman, 2003), yörünge (tek çözüm) tabanlı ve popülasyon tabanlı (Gendreau & Potvin, 2005), doğadan esinlenmiş ve doğadan esinlenmemiş (Fister vd., 2013) gibi sınıflandırmalar örnek gösterilebilir (Abdel-Basset vd., 2018). Genel olarak en çok bilinen sınıflandırma yörünge tabanlı ve popülasyon tabanlı MSA algoritmalarıdır. Yörünge tabanlı veya tek çözüm tabanlı MSA algoritmaları arama süreci boyunca tek bir çözüme odaklanır ve bu çözümü geliştirmek için çabalar. Popülasyon tabanlı MSA algoritmalarında ise bir popülasyon oluşturulur ve bu popülasyon içerisinde birçok çözüm sunulabilir. Tek çözüm tabanlı algoritmalar tek bir çözüme odaklandığı için genellikle daha hızlı çözüm alır. Popülasyon tabanlı algoritmalar daha uzun süre işlem gerektirse de birden fazla çözüm adayıyla işlem gerçekleştirdiği için çeşitlilik ve keşif yetenekleri daha yüksektir. Bir optimizasyon problemi için algoritma seçiminde problemin karmaşıklığı, çözüm süresi, bellek kapasitesi ve çeşitlilik gibi faktörler önemli rol oynar (Enes, 2023; Hussain vd., 2019).

Popülasyon tabanlı bir MSA algoritmasının arama sürecinin başarısında arama operatörlerinin olduğu kadar seçim yöntemlerinin de rolü büyüktür. Arama operatörleri her yinelemede sonraki nesli oluştururken seçim yöntemleri ise yeni neslin oluşturulmasında kullanılmak üzere uygunluk değerlerine göre çözüm adaylarını belirler. Turnuva seçimi, rastgele seçim, elitizm ve rulet çarkı seçimi yaygın olarak kullanılan seçim yöntemlerindendir. Turnuva seçim yöntemi sürecinde rastgele seçilen çözüm adayları arasında turnuva gerçekleştirilir ve bu adaylardan en yüksek uygunluk değerine sahip çözüm adayı turnuvayı kazanır. Rastgele seçim yöntemi bir sonraki nesle aktarılabacak olan çözüm adayını uygunluk değerinden bağımsız olarak rastgele seçer. Bu seçim yöntemi çeşitliliği korusa da global optimuma ulaşma hızını yavaşlatabilir. Elitizm veya aç gözlü seçim yöntemi popülasyondaki en yüksek uygunluk değerine sahip adayları doğrudan bir sonraki nesle aktarır. Aç gözlü seçim yöntemi komşuluk aramasına üstünlük verir ve popülasyondaki en iyi çözüm adaylarının korunmasına yardımcı olur. Son olarak rulet çarkı seçim yönteminde ise uygunluk değeri yüksek olan çözüm adaylarının seçilme olasılığı daha yüksek olmakla birlikte seçim rastgelelik barındırır. Yani bu seçim yönteminde sonraki nesil için bireyler rastgele seçilir ancak uygunluk değeri yüksek olanların seçilme şansı daha yüksektir (Bakir vd., 2022; Kahraman vd., 2020).

Literatüre son yıllarda sunulan uygunluk-mesafe dengesi (fitness-distance balance, FDB), bahsedilen yaygın seçim yöntemlerine alternatif bir seçim yöntemidir ve bu tez çalışmasında da kullanılarak MSA algoritmalarının üzerindeki pozitif etkisi gözlemlenmiştir. Açgözlü bir seçim yöntemi olan FDB seçim yöntemi popülasyondaki herhangi bir çözüm adayının uygunluk değeri dışında mesafe değerini de işleme dahil eder ve buna göre her bir çözüm adayını puanlandırır. Örneğin bir çözüm adayının hem uygunluk değeri hem de mevcut en iyi uygunluk değerine sahip çözüm adayına uzaklığı yüksekse bu çözüm adayının puanı yüksek olur. Uygunluk değeri yüksek olsa bile en iyi çözüm adayına yakın olan adayların puanı ise düşük olur. Sonuç olarak FDB seçim yönteminde çözüm adayları uygunluk ve mesafe değeri olmak üzere iki kritere göre puanlandırılır ve en yüksek puanı alan çözüm adayları bir sonraki nesle aktarılır. Uygunluk ve mesafe değerlerinin her ikisinin de dikkate alınması ile bir MSA algoritmasında arama süreci boyunca çeşitlilik ve komşuluk aramasının dengede tutulması sağlanır.

Simbiyotik organizma arama (symbiotic organism search, SOS) algoritması FDB seçim yönteminin uygulandığı ve sömürü yeteneklerinin geliştirildiği ilk algoritmadır (Kahraman vd., 2020). Başka bir çalışmada öğretme ve öğrenme temelli yapay arı kolonisi (teaching-learning based artificial bee colony, TLABC) algoritması FDB seçim yöntemiyle geliştirilmiştir (Duman vd., 2022). Ayrıca stokastik fraktal arama (stochastic fractal search, SFS) algoritması ve lévy uçuş dağılımı (lévy flight distribution algorithm, LFD) algoritmasının da son yıllarda FDB seçim yöntemiyle geliştirildiği çalışmalar bulunmaktadır (Aras vd., 2021; Bakir vd., 2022). Bu tez çalışmasında ise FDB seçim yöntemi ile yapay sinek kuşu algoritmasının (artificial hummingbird algorithm, AHA) arama sürecindeki zayıflıklar geliştirilmiş ve çeşitli analizlerle test edilmiştir.

Elektik enerjisi tüketimi ve ihtiyacının hızlı artışı, üretim kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve üretilen enerjinin mümkün olan en az kayıpla iletilmesi için yeni stratejilerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Doğası gereği bir güç sisteminde yük değeri sürekli değildir ve anlık olarak değişim gösterir. Böyle durumlarda tüketilen güç ve üretilen güç arasında dengesizlik oluşur. Bu da sistem frekansında salınımların oluşmasına yol açar. Frekans kararlılığı sistem güvenliği ve verimliliği açısından son derece kritik öneme sahiptir. Bu yüzden ani yük değişimi sırasında ortaya çıkan frekans salınımlarını sönmölemek için yük frekans kontrolü (YFK) gerçekleştirilmelidir. Güç sistemlerinde YFK önemli ve sürekli geliştirilmesi gereken bir problemdir (Ram Babu vd., 2023; Shankar vd., 2017).

Bu tez çalışmasında arama sürecine FDB seçim yöntemi uygulanarak CEC 2017 ve CEC 2020 problemleri üzerinden AHA algoritmasının performans iyileştirmesi (geliştirmesi) gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen FDBAHA algoritması performansının daha iyi anlaşılması için güç sistemlerinde verimlilik açısından kritik öneme sahip olan YFK problemine uyarlanarak sonuçları gözlemlenmiştir.

Güç sistemlerinde karmaşıklığın artışı şebeke frekansının kontrolünü de güçleştirmiştir. Bu sebeple araştırmacılar YFK için en verimli çözümü bulmak adına çalışmalarını sürdürmektedir. Güç sistemlerinde ilk modern YFK çalışmalarını 1970 yılında Elgerd ve Fosha yaptıkları çalışmayla enterkonnekte güç sisteminin frekans kontrolü için oransal denetleyici tasarlayarak gerçekleştirmiştir (Elgerd & Fosha, 1970).

Sahu ve arkadaşları 2016 yılında iki alanlı çok kaynaklı bir güç sisteminde YFK için iki dereceli oransal-integral-türev (proportional-integral-derivative-PID) denetleyicisi önermiştir. Denetleyicinin tasarımı öğretilme-öğrenme tabanlı optimizasyon (teaching learning based optimization, TLBO) algoritması ile gerçekleştirilmiştir (R. K. Sahu vd., 2016).

2016 yılında Zamani ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada gazların brownian hareket optimizasyonu (gases brownian motion optimization, GBMO) yöntemiyle iki alanlı termal güç sistemi için kesir dereceli PID (fractional order PID, FOPID) denetleyicisinin tasarımı gerçekleştirilmiştir (Zamani vd., 2016).

Guha ve arkadaşları (2017) iki alanlı üretim oranı sınırlamaları (generation rate constraints, GRC) ve ölü bantlı hız düzenleyici (governor dead band, GDB) lineer olmayan etkileri içeren iki alanlı termal bir güç sisteminin YFK için PID denetleyicisi tasarlamıştır. Denetleyici parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmek için yarı-karşıt simbiyotik organizma arama algoritması (quasi-oppositional symbiotic organism search algorithm, QOSOS) önerilmiştir (Guha vd., 2017).

2017 yılında Padhy ve arkadaşları modifiye edilmiş gri kurt optimizasyonu (grey wolf optimization, GWO) yöntemiyle elektrikli araçların da modellendiği iki alanlı çok kaynaklı bir güç sistemi için tasarladıkları PI-PD denetleyicisini önermiştir (Padhy vd., 2017).

Gheisarnejad 2018 yılında hibrit harmoni arama ve guguk kuşu optimizasyon algoritması (harmony search and cuckoo optimization algorithm, HSCOA) yöntemiyle iki alanlı çok kaynaklı bir güç sistemi için bulanık mantık tabanlı PI ve PID denetleyicisi önermiştir (Gheisarnejad, 2018).

Sharma ve Yadav (2019) çok kaynaklı iki alanlı bir güç sisteminde frekans dalgalanmalarının daha sağlıklı şekilde sınırlandırılabilmesi için FOPI denetleyicisi tasarlamıştır. Denetleyici parametrelerinin optimizasyonunda Levy metodu ile geliştirilmiş aslan algoritması (lion algorithm, LA) yöntemi kullanılmıştır (Sharma & Yadav, 2019).

Hasanien ve El-Fergany (2019) yaptıkları çalışmada gerçekçi bir yaklaşımla rüzgâr hızını ve güneş ışınlamalarının değişimini de hesaba katarak yenilenebilir enerji kaynaklarının da yer aldığı bir güç sisteminin frekans kontrolünü gerçekleştirmiştir. Çalışmada salp sürü algoritması (salp swarm algorithm, SSA) yöntemi ile tasarlanmış PID denetleyicisi kullanılmıştır (Hasanien & El-Fergany, 2019).

2020 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada Khadanga ve arkadaşları iki alanlı fotovoltaik (FV) ve termal kaynaklardan oluşan güç sisteminde PI ve PID denetleyicilerinin optimizasyonu için sıçrayan kurbağa algoritması (shuffled frog-leaping algorithm, SFLA) ve desen arama (pattern search, PS) algoritmalarını birleştirerek hibrit hSFLA-PS algoritmasını önermiştir (Khadanga vd., 2020a).

2021 yılında Çelik termal, hidro ve gaz güç kaynaklarının olduğu 1, 2 ve 3 alanlı güç sistemlerinde YFK çalışması gerçekleştirmiştir. Sistemler için yusufçuk arama algoritması (dragonfly search algorithm, DSA) metodu kullanılarak FOPI-FOPD denetleyicileri tasarlanmıştır (Çelik, 2021).

Khadanga ve arkadaşları (2022) fotovoltaik güç kaynağı içeren hibrit bir güç sistemi için TID denetleyicisi tasarlamıştır. Denetleyicinin optimizasyonunu modifiye edilmiş GWO algoritması ve guguk kuşu arama algoritması (cuckoo search algorithm, CS) birleştirilerek geliştirilen hibrit MGWO-CS algoritması ile gerçekleştirilmiştir (Khadanga vd., 2022).

Dahiya ve arkadaşları 2022 yılında yaptıkları bir çalışmada FV ve termal güç ünitelerinden oluşan iki alanlı bir güç sisteminde YFK gerçekleştirmek için PI ve PID denetleyicilerinin tasarımını karadul optimizasyonu (black widow optimization, BWOA) algoritması ile gerçekleştirmiştir (Dahiya & Saha, 2022).

Daraz ve arkadaşları (2023) gerçekleştirdikleri bir çalışmada deniz anası arama optimizasyonu (jellyfish search optimizer, JSO) algoritması ile yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarından oluşan hibrit bir güç sisteminde YFK için modifiye edilmiş FOPID denetleyicisi tasarlamıştır (Daraz vd., 2023).

2023 yılında Murugesan ve arkadaşları kohort zekâ optimizasyon (cohort intelligence, CI) algoritması ile bir ve iki alanlı iki ayrı termal güç sisteminin frekans

kontrolü için FOPID denetleyici tasarımının gerçekleştirildiği bir çalışma yayınlamıştır (Murugesan vd., 2023).

2023 yılında gerçekleştirdikleri bir çalışmada Cavdar ve arkadaşları PV ve termal güç kaynaklarından oluşan iki alanlı bir güç sisteminde frekans salınımlarını iyileştirmek adına PID ve TID denetleyicilerinden türetilen PI-PD ve TI-TD denetleyicilerini önermiştir. Denetleyicilerin parametre değerleri mayıs sineği algoritması (mayfly algorithm, MA) yöntemiyle tasarlanmış ve optimum sonuçların dayanıklılığı siber saldırı analizi gerçekleştirilerek test edilmiştir (Cavdar vd., 2023).

Gong ve arkadaşları (2023) pompaj depolamalı bir güç sisteminde YFK için FOPID denetleyicisinin tasarımını kaotik parçacık sürüsü optimizasyonu (chaotic particle swarm optimization, CPSO) algoritması ile gerçekleştirmiştir. (Gong vd., 2023).

İlk YFK çalışmalarından günümüze kadar geliştirme girişimleri sürekli olarak devam etmiştir. Literatürde farklı yapılarda ve parametre değerlerindeki güç sistemleri, farklı tasarımlarda denetleyiciler, farklı optimizasyon yöntemleri ve amaç fonksiyonları ile yapılan birçok YFK çalışması bulunmaktadır. Tablo 1’de yukarıda verilen literatür ve son yıllarda yapılmış YFK çalışmalarından bazıları özet halinde gösterilmiştir.

Tablo 1. Son zamanlarda yapılmış YFK çalışmaları

Ref.no	Denetleyici Tipi	Algoritma	Amaç Fonksiyonu	Güç Kaynağı Tipi	Bölge
(Dahiya & Saha, 2022)	PI/PID	BWOA	ITAE	FV-Termal	2
(Khadanga vd., 2022)	PID/TID	MGWO-CS	ITAE	FV-Termal	2
(Çelik, 2021)	FOPI-FOPD	DSA	ITAE	Termal-Hidro-Gaz	1-2-3
(Daraz vd., 2023)	MFOPID	JSO	ITSE	Termal-Hidro-Gaz-YEK	2
(Sharma & Yadav, 2019)	FOPI	LA	ISE	Termal-Hidro-Gaz	2
(Gheisarnejad, 2018)	PID/Fuzzy-PI/Fuzzy PID	HSCOA	ITAE	Termal-Hidro-Gaz	2
(R. K. Sahu vd., 2016)	PI/PID/2DOF-PID	TLBO	ITAE	Termal-Hidro-Gaz	2
(Chen vd., 2020)	PID/Fuzzy-PID	IACO	ITAE/ITSE/ISE/IAE	Termal-Hidro	2
(B. K. Sahu vd., 2016)	PID/Fuzzy-PID	LUS-TLBO	ITAE	Termal-Hidro-Gaz	2
(Padhy vd., 2017)	PID/PI-PD	MGWO	ITAE	Termal-Hidro-Gaz EV ile	1-2-5
(Padhy & Panda, 2017)	PI/PID/PI-PD	hSFS-PS	ITAE	Termal-Hidro-Gaz EV ile	1-2-3
(Khadanga vd., 2020a)	PI/PID	SFLA	ITAE	FV-Termal	2
(Khadanga vd., 2020b)	PID/PIDF	MWOA	ITAE	FV-Termal	2
(Zamani vd., 2016)	FOPID	GBMO	ITAE	Termal	2
(Murugesan vd., 2023)	FOPID	CI	ITAE	Termal	1-2
(Cui vd., 2023)	PID/PI-PD/TID/FOPI-FOPID	ICA	ITAE	Termal-Hidro	2
(Kumar Sahu vd., 2016)	PID/TIDF	GA/PSO/DE	ITAE	Termal	2-3
(Padhan vd., 2014)	I/PI/PID	FA	ITAE	Termal	1-2-3
(Mohanty vd., 2014)	I/PI/PID	DE	ITAE/ITSE/ISE/IAE	Termal-Hidro-Gaz	1-2

Yapılan literatür araştırması sonucu güç sistemlerinde frekans kontrolü için sadece denetleyici seçimi değil denetleyicinin ideal parametrelerini ayarlayan optimizasyon algoritmalarının seçiminin de önemli olduğu görülmüştür. Ayrıca optimizasyon sırasında kullanılacak olan ideal amaç fonksiyonu da YFK probleminin çözümündeki başarıya katkısı büyüktür. Bunun için literatürde farklı yapılarda amaç fonksiyonu belirleme çalışmaları yapılmış ve önerilmiştir. Tablo 1’de de görüldüğü gibi çoğu araştırmacı çalışmalarında ITAE amaç fonksiyonunu tercih etmiştir. Buradan ITAE amaç fonksiyonunun YFK problemi çözümünde genellikle ideal amaç fonksiyonu olduğu sonucuna varılabilir. Bu yüzden bu çalışmada da gerçekleştirilmiş olan YFK problemi çözümünde ITAE amaç fonksiyonu tercih edilmiştir.

1.2. Tezin Motivasyonu, Amacı, Konusu ve Özgünlüğü

Son yıllarda literatüre sunulan AHA algoritmasına, geliştirilmesi amacıyla FDB seçim yöntemi uygulanması ve geliştirilen algoritmanın güç sistemleri için YFK probleminin çözümünde kullanılması bu tez çalışmasının temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

İlk olarak CEC 2017 ve CEC 2020 problemlerine uyarlanan AHA algoritmasının yapılan testler sonucunda keşif ve sömürü özelliklerinin dengesizliği ve yerel çözüm tuzaklarına yakalandığı gözlemlenmiştir. Algoritmanın bu eksi yönlerini geliştirmek adına FDB seçim yöntemi gerekli arama operatörlerine uygulanmış ve istatistiksel analiz yöntemleri ile test edilerek önerilen algoritmanın başarısı ortaya koyulmuştur.

Geliştirilen uygunluk-mesafe dengesi tabanlı yapay sinek kuşu (FDBAHA) algoritması, iki alanlı termal, iki alanlı çok kaynaklı ve FV-termal olmak üzere üç farklı güç sistemi için YFK tasarımında kullanılmıştır. Bu güç sistemleri için üç farklı denetleyicinin (PID, FOPID ve FOPI-FOPD) tasarımı yapılmıştır. Optimizasyon sırasında amaç fonksiyonu olarak literatürde sık kullanılan ITAE amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar zaman bölgesi, gürbüzlük ve bozucu yük analizleri ile test edilerek değerlendirilmiştir.

Özetle bu tez çalışmasında;

- FDB seçim yöntemi AHA algoritmasına uygulanarak algoritmanın performansı arttırılmıştır.
- Geliştirilen FDBAHA ve orijinal AHA algoritması CEC 2017 ve CEC 2020 problemlerindeki performansları farklı analizlerle kıyaslanmıştır.
- Literatürden seçilen üç farklı sistem (iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi, iki alanlı çok kaynaklı güç sistemi ve iki alanlı FV-termal güç sistemi) için YFK gerçekleştirilmiştir.
- Güç sistemleri için PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicileri tasarlanmıştır.
- Denetleyici parametreleri geliştirilen FDBAHA algoritması ile optimize edilmiştir.
- Optimizasyon sırasında amaç fonksiyonu olarak ITAE kullanılmıştır.
- Geliştirilen FDBAHA algoritmasının YFK performansı ayrıca literatürde yapılmış bazı çalışmalarla da kıyaslanarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Yöntem

Bu bölüm, Zhao ve arkadaşları tarafından 2022 yılında literatüre sunulmuş AHA algoritmasının matematiksel yapısı ve çalışma prensibinin, son yıllarda başarılı bir seçim yöntemi olarak popülaritesini artırmış FDB seçim yönteminin ve bu yöntemle geliştirilmiş olup optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılması için önerilen FDBAHA algoritmasının detaylı açıklamasını içerir. Bu konuları kapsayan üç alt bölüm oluşturulmuştur;

- İlk alt bölümde AHA algoritmasının genel yapısı açıklanmıştır.
- İkinci alt bölümde popülasyon tabanlı MSA algoritmalarının seçim sürecinin iyileştirilmesi için önerilen ve bu tez çalışmasında da AHA algoritmasının geliştirilmesinde kullanılan FDB seçim yöntemi tanıtılmıştır.
- Üçüncü alt bölümde önerilen FDBAHA algoritmasının tanıtımı yapılmıştır.
- Dördüncü alt bölümde ise tezde kullanılan diğer algoritmalar kısaca açıklanmıştır.

2.1.1. Yapay Sinek Kuşu Algoritması (AHA)

AHA algoritması sinek kuşlarının doğadaki yiyecek arama stratejilerinden ilham alan bir meta-sezgisel algoritmadır. Bir sinek kuşu eksenel, diyagonal ve çok yönlü olmak üzere üç farklı uçuş becerisine sahiptir. Ayrıca, bu kuşların hedef besin kaynağını seçmeye yönelik hafıza yetenekleri, AHA algoritmasının en önemli bileşenidir. AHA optimizasyon sürecini yürütürken üç yiyecek arama davranışını taklit eder: rehberli yiyecek arama, bölgesel yiyecek arama ve göç ederek yiyecek arama. Şekil 1’de AHA algoritmasının akış diyagramı gösterilmiştir (Zhao vd., 2022).

Bir sinek kuşu hedef besin kaynağına üç farklı uçuş tekniği kullanarak gidebilir: eksenel uçuş, diyagonal uçuş ve çok yönlü uçuş. Yiyecek ararken, beslenirken ve avcılardan kaçarken bu üç uçuş becerisi sinek kuşlarına kolaylık sağlar. Diğer kuşlardan farkı, bir sinek kuşunun eksenel ve diyagonal uçuş tekniğinde usta olmasıdır. AHA algoritmasında bir yön değiştirme vektörü modellenir. Bu vektör bir sinek kuşunun d

boyutlu bir arama uzayında hedef besin kaynağına hangi uçuş tekniği ile varacağına karar verir (Zhao vd., 2022).

Eksenel uçuşun matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

$$D^{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = \text{randi}([1, d]) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, d \quad (1)$$

Diagonal uçuşun matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

$$D^{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = P(j), j \in [1, k], P = \text{randperm}(k), \\ & k \in [2, [r_1 \cdot (d - 2)] + 1] \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, d \quad (2)$$

Çok yönlü uçuşun matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

$$D^{(i)} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, d \quad (3)$$

burada $\text{randi}([1, d])$ 1'den d 'ye kadar tam sayılardan oluşan bir vektördür, $\text{randperm}(k)$ 1'den k 'ya kadar rastgele tam sayı permütasyonu üretir ve r_1 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır (Fathy, 2022; Zhao vd., 2022).

Ziyaret tablosu bir sinek kuşunun her besin kaynağını kaç yineleme boyunca ziyaret etmediğini takip eder. Tablodaki değeri en yüksek olan besin kaynağı, en uzun süre ziyaret edilmeyen besin kaynağıdır. Dolayısıyla, en çok nektar bu tablodaki en yüksek değere sahip besin kaynağında birikir. Bir sonraki yinelemede sinek kuşu bu tabloya göre en yüksek nektara sahip besin kaynağına yönelir. Her yineleme sonunda ziyaret tablosu güncellenir. Rehberli yiyecek arama aşamasında her bir sinek kuşu kendi hedef besin kaynağını bu tablodan seçebilir (Zhao vd., 2022).

AHA algoritmasının rehberli yiyecek arama aşamasında her sinek kuşu ziyaret tablosundan kendi hedef besin kaynağını belirler ve ona doğru ilerlemeyi planlar. Burada hedef besin kaynağı nektar doldurma oranı en yüksek besin kaynağıdır. Rehberli yiyecek aramanın matematiksel modeli aşağıdaki gibidir (Shadman Abid vd., 2022; Zhao vd., 2022):

$$v_i(t+1) = x_{i,tar}(t) + a \cdot D \cdot (x_i(t) - x_{i,tar}(t)) \quad (4)$$

burada $x_i(t)$ i 'inci sinek kuşunun bulunduğu besin kaynağının t zamanındaki konumu, $x_{i,tar}(t)$ i 'inci sinek kuşunun ziyaret etmeyi planladığı hedef besin kaynağının konumu ve a normal dağılıma sahip rehber arama faktörüdür. i 'inci besin kaynağının konumu aşağıdaki denklem ile güncellenir:

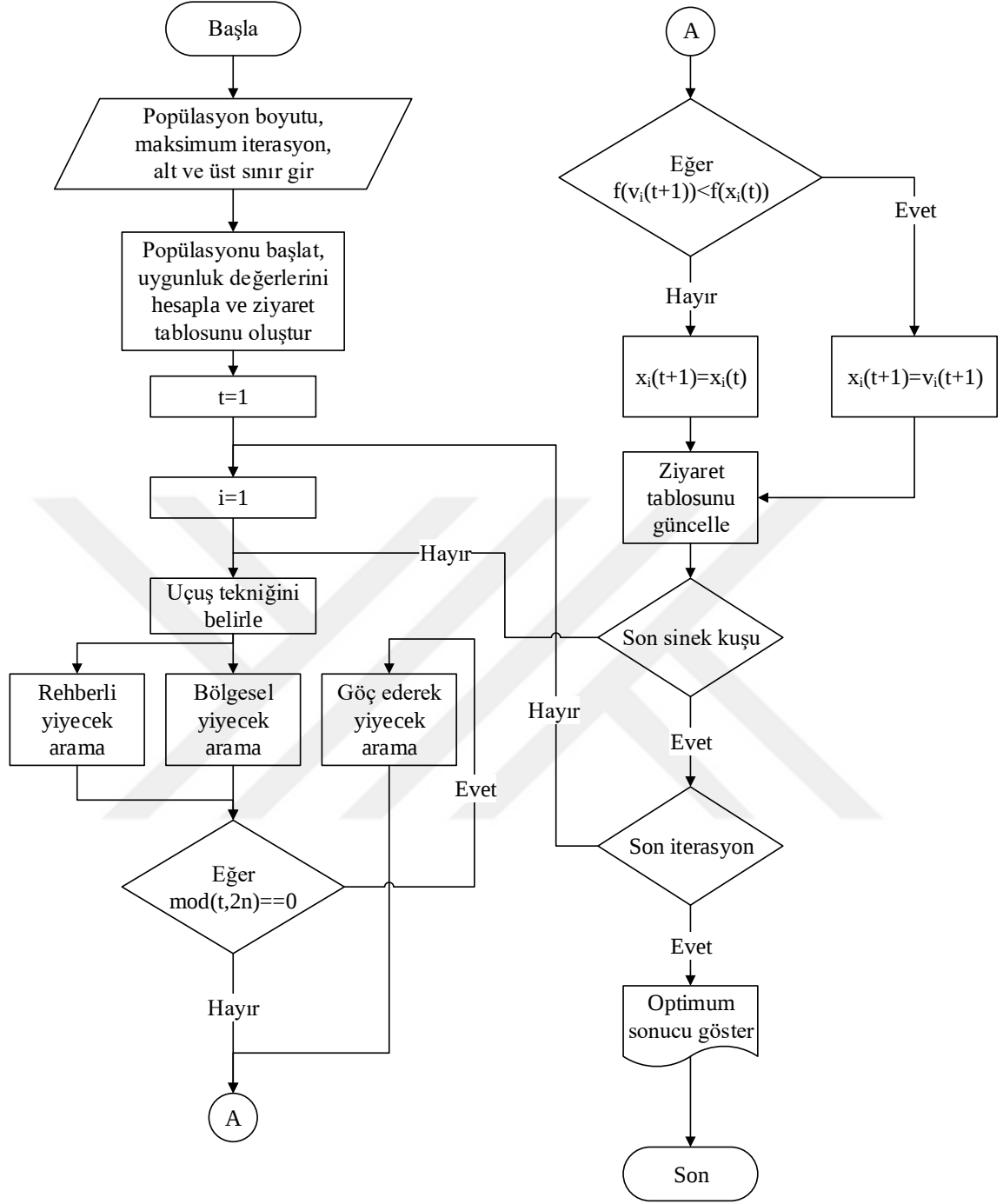
$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) & f(x_i(t)) \leq f(v_i(t+1)) \\ v_i(t+1) & f(x_i(t)) > f(v_i(t+1)) \end{cases} \quad (5)$$

burada f uygunluk değerini temsil eder.

Bölgesel yiyecek arama aşaması her sinek kuşunun kendi komşu bölgesindeki besin kaynaklarını ziyaret ettiği aşamadır. Bu aşamada yerel bir arama yapılır ve mevcut besin kaynağından daha fazla nektar doldurma oranına sahip bir kaynak bulunursa besin kaynağının pozisyonu güncellenir. Bölgesel yiyecek aramanın matematiksel modeli aşağıdaki gibidir (Shadman Abid vd., 2022; Zhao vd., 2022):

$$v_i(t+1) = x_i(t) + b \cdot D \cdot x_i(t) \quad (6)$$

burada b normal dağılıma sahip bölgesel arama faktörüdür.



Şekil 1. AHA algoritmasının akış diyagramı

AHA algoritmasında bir sinek kuşunun beslendiği kaynak yetersiz ise bu sinek kuşu göç ederek farklı bölgelerdeki kaynaklara yönelir. Göç ederek yiyecek arama aşamasında bir göç katsayısı belirlenir. Yineleme sayısı, göç katsayısının önceden ayarlanmış değerini aşarsa, en az yiyeceğin bulunduğu besin kaynağındaki sinek kuşu farklı bir bölgeye göç

eder. Göç ederek yiyecek aramanın matematiksel modeli aşağıdaki gibidir (Zhao vd., 2022):

$$x_{wor}(t + 1) = Low + rand \cdot (Up - Low) \quad (7)$$

burada Low ve Up d boyutlu bir problem için alt ve üst sınırlar, x_{wor} en kötü nektar doldurma oranına sahip besin kaynağının konumu ve $rand$ 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır.

2.1.2. Geliştirme Yöntemi (FDB)

FDB seçim yöntemi MSA algoritmalarında arama süreci performansının geliştirilmesi için 2020 yılında Kahraman ve arkadaşları (Kahraman vd., 2020) tarafından önerilmiştir. FDB seçim yöntemi ile popülasyondaki çözüm adaylarının uygunluk ve en iyi çözüm adayına uzaklığı belirlenip bu değerler kullanılarak her bir çözüm adayı puanlandırılır. Bir çözüm adayının uygunluk değeri onun başarısını gösterir. Hem uygunluk değeri hem de en iyi çözüm adayına uzaklık değeri yüksek olan çözüm adayı en yüksek puanı alır. Puanı yüksek olan çözüm adayları mevcut popülasyondaki çeşitliliğe (keşif) katkıda bulunur, yani en iyi çözüm adayının eksiklerini kapatabilecek potansiyele sahiptir. Uzaklık değeri düşük olan, yani mevcut popülasyondaki en iyi çözüm adayına yakın olan çözüm adaylarının uygunluk değeri yüksek olsa da FDB puanı düşük olur. Bu çözüm adayları popülasyon çeşitliliğine katkıda bulunamasa da komşuluk aramasını (sömürü) etkileyebilir. Sonuç olarak FDB seçim yöntemi sayesinde arama yönü daha sağlıklı ve doğru şekilde belirlenir (Bakır, 2022; Kahraman vd., 2020).

FDB seçim yöntemi birkaç basit adımla uygulanabilir. İlk olarak çözüm adaylarının uygunluk değerleri (F_p) belirlenir. Burada F_p , problemin amaç fonksiyonundan elde edilen değerlere göre belirlenir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$F_p \equiv \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (8)$$

Uygunluk değerleri belirlendikten sonra FDB puanlarının hesaplanması için her bir çözüm adayının en iyi çözüm adayı ile arasındaki mesafe vektörü oluşturulmalıdır. Bu

yüzden m tasarım değişkeni ve n çözüm adayının bulunduğu P popülasyonunda i 'ninci çözüm adayı (x_i) ile en iyi çözüm adayı (x_{best}) arasındaki Öklid mesafesi aşağıdaki gibi hesaplanır (Kahraman vd., 2020):

$${}_{i=1}^n \forall P_i, D_{P_i} = \sqrt{(x_{1_i} - x_{1_{best}})^2 + (x_{2_i} - x_{2_{best}})^2 + \dots + (x_{m_i} - x_{m_{best}})^2} \quad (9)$$

Mesafe vektörü (D_P) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$D_P \equiv \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (10)$$

Uygunluk değeri ve mesafe değeri belirlenen her bir çözüm adayının FDB puanı Eşitlik 11'de gösterildiği gibi hesaplanır. Puan hesabı yapılırken birinin diğerine karşı daha baskın olmasını engellemek için uygunluk değeri ve mesafe değeri normalize edilir. Ayrıca denklemde F_P ve D_P değerlerinin etkisini belirlemek için ağırlık katsayısı (w) kullanılmıştır. Bu çalışmada $w=0.5$ olarak kabul edilmiştir (Kahraman vd., 2020).

$${}_{i=1}^n \forall P_i, S_{P_i} = w \cdot normF_{P_i} + (1 - w) * normD_{P_i} \quad (11)$$

Sonuç olarak FDB puan vektörü (S_P) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$S_P \equiv \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (12)$$

2.1.3. Önerilen Algoritma (FDBAHA)

Doğadaki sinek kuşlarının beslenme ve hızlı hareket etme stratejilerinden ilham alınarak geliştirilen AHA algoritması karmaşık ve çok boyutlu optimizasyon problemlerinde hızlı ve oldukça başarılı çözümler sunabilmektedir. AHA algoritması rehberli, bölgesel ve göç ederek yiyecek arama olmak üzere üç arama operatörüne sahiptir. Bu üç arama operatörü algoritmanın keşif ve sömürü hareketlerini dengeli bir şekilde

gerçekleştirebilmesi için tasarlanmıştır. Ancak CEC 2017 ve CEC 2020 problemlerinin çözümünde AHA algoritmasının farklı koşullarda ve boyutlarda istikrar sağlayamadığı gözlemlenmiştir. Özellikle yapılan analizlerle AHA algoritmasının çok modlu fonksiyonlarda performansının düşük olduğu sonucu elde edilmiştir. Buradan algoritmanın keşif yapma özelliklerinin zayıf olduğuna ve keşif-sömürü dengesini iyi gerçekleştiremediği çıkarımına varılır. Bu yüzden bu tez çalışması AHA algoritmasının FDB seçim yöntemi ile yeniden tasarlanarak keşif ve sömürü kabiliyetlerinin geliştirildiği yeni bir versiyonunu sunmaktadır.

Önerilen yöntem AHA algoritmasının rehberli, bölgesel ve göç ederek yiyecek arama operatörlerine belirli oranlarda FDB seçim yöntemi uygulanarak geliştirilmiştir. Rehberli yiyecek arama operatörü maksimum iterasyonun ilk yarısında Eşitlik 13'te, son yarısında ise Eşitlik 14'te gösterildiği gibi yeniden tasarlanmıştır.

$$v_i(t+1) = x_{i,tar}(t) + a \cdot D \cdot (x_i(t) - x_{i,FDB}(t)) \quad (13)$$

$$v_i(t+1) = x_{i,FDB}(t) + a \cdot D \cdot (x_i(t) - x_{i,tar}(t)) \quad (14)$$

Ayrıca algoritmanın keşif performansının artırılması adına göç ederek yiyecek arama operatörü de FDB seçim yöntemiyle yeniden tasarlanmıştır:

$$x_{wor}(t+1) = x_{i,FDB}(t) \quad (15)$$

Geliştirilen algorithmada, FDB seçim yöntemiyle daha etkili bir keşif süreci sağlayarak, çok modlu fonksiyonlardaki performansını artırmak hedeflenmektedir. Yapılan deneyler, geliştirilen bu yeni versiyonun hem keşif hem de sömürü aşamalarında daha dengeli bir performans sergilediğini göstermiştir. Bu sonuçlar, algoritmanın optimizasyon kabiliyetinin önemli ölçüde iyileştiğini ve daha geniş bir problem yelpazesinde başarılı bir şekilde uygulanabileceğini ortaya koymaktadır. Bu iyileştirmeler, gelecekteki optimizasyon çalışmalarında AHA algoritmasının daha fazla tercih edilmesine ve daha karmaşık problemlerin çözümünde etkili bir araç olarak kullanılmasına olanak tanıyacaktır.

2.1.4. Tezde Kullanılan Algoritmalar

Bu tez çalışmasında geliştirilen FDBAHA algoritmasının kalite testi fonksiyonlarındaki performansı, temel AHA algoritması dışında literatürden seçilen on farklı algoritma ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan algoritmalar literatürde sıklıkla kullanılan ve çoğunluğu son yıllarda geliştirilmiş başarılı optimizasyon algoritmalarıdır. Aşağıdaki alt başlıklarda bu algoritmalar hakkında kısa açıklamalar yapılmıştır. Ayrıca algoritmaların popülasyon boyutları ve parametre ayarları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Tezde kullanılan algoritmaların popülasyon boyutları ve parametre ayarları

Algoritma	Popülasyon boyutu	Parametre ayarı
ARO (Wang vd., 2022)	50	-
CGO (Talatahari & Azizi, 2021)	50	-
DE (Storn & Price, 1997)	50	Ölçekleme faktörünün alt sınırı=0,2, üst sınırı=0,8, çaprazlama olasılığı=0,5
GWO (Mirjalili vd., 2014)	30	Yakınsama sabiti zamanla doğrusal olarak 2'den 0'a
HS (Geem vd., 2001)	100	HMCR=0.95, PAR=0.3
JS (Chou & Truong, 2021)	50	Dağıtım katsayısı=3, zaman kontrol mekanizması sabiti=0.5, popülasyon başlatma katsayısı=4
PO (Askari vd., 2020)	64	Parti değiştirme oranı zamanla doğrusal olarak 1'den 0'a, her parti için üye sayısı=8
TLBO (Rao vd., 2011)	50	Öğretim faktörü=1 veya 2
MA (Zervoudakis & Tsafarakis, 2020)	20	Tek noktalı çaprazlama oranı=0,95, $a1 = 1$, $a2 = 1,5$, $\beta = 2$, $d = 0,1$, $fl = 0,1$
MRFO (Zhao vd., 2020)	50	-

- Yapay Tavşan Optimizasyonu (ARO)

Doğadaki tavşanların yiyecek arama stratejilerinden esinlenerek geliştirilen yapay tavşan optimizasyonu (artificial rabbits optimization, ARO) algoritması 2022 yılında Wang ve arkadaşları tarafından literatüre sunulmuştur. Tavşanların doğadaki dolambaçlı yiyecek arama ve rasgele gizleme stratejileri ARO algoritmasının keşif ve sömürü becerilerinin temelini oluşturur. Ayrıca enerji minimizasyonu stratejisi algoritmada keşif ve sömürü dengesini sağlar (Wang vd., 2022). Son yıllarda birçok çalışmada kullanılan ARO

algoritması kalite testi fonksiyonları ve farklı mühendislik problemleri çözümündeki başarısıyla popüleritesini artırmaktadır.

- Kaos Oyunu Optimizasyonu (CGO)

Talatahari ve Azizi tarafından 2021’de geliştirilen kaos oyunu optimizasyonu (chaos game optimization, CGO) matematiğin bir dalı olan kaos teorisinden ilham alır. Kaos teorisi, dinamik ve başlangıç koşullarına son derece duyarlı olan sistemleri inceler ve bu sistemlerin uzun vadeli davranışlarının tahmin edilemez olduğunu ortaya koyar. CGO algoritması bu teoriden ilham alarak fraktal yapılar ve kaotik davranışların optimizasyon süreçlerine uygulanmasını sağlar. Kaos teorisinde olduğu gibi, CGO da fraktal yapıların oluşturulmasına dayanır. Bir başlangıç noktası ve çokgen şekli belirlenir. İteratif süreçlerle, başlangıç noktası ve çokgen köşeleri arasındaki mesafeler hesaplanarak yeni noktalar oluşturulur. En iyi çözümler belirlendikten sonra iterasyonda bu çözümler üzerinden yeni noktalar üretilir. Yinelemeli süreçler ve kaotik davranışlar, hızlı ve etkin çözüm arayışı sağlar (Talatahari & Azizi, 2021). CGO, farklı türde optimizasyon problemlerine uyarlanabilir ve çeşitli alanlarda uygulanabilir.

- Diferansiyel Evrim (DE)

Diferansiyel evrim (differential evolution, DE) algoritması Storn ve Price tarafından 1997 yılında geliştirilmiştir. DE, kolay uygulanabilir ve karmaşık problemlerde bile etkin sonuçlar verebilen popülasyona dayalı bir algoritmadır. Özellikle sürekli değişkenlere sahip karmaşık ve çok boyutlu problemlerin çözümünde etkili bir yöntemdir. Yapılan testler sonucunda algoritmanın diğer birçok optimizasyon algoritmasından daha hızlı ve daha erken optimum sonuç bulduğu görülmüştür (Storn & Price, 1997).

- Gri Kurt Optimizasyonu (GWO)

2014 yılında literatüre sunulan gri kurt optimizasyonu (grey wolf optimizer, GWO) algoritması doğadaki gri kurtların avlanma ve liderlik hiyerarşisi davranışlarından ilham alır. Mirjalili ve arkadaşları tarafından geliştirilen algoritma kolay anlaşılır ve uygulanabilir yapıdadır. Gri kurt sürülerinde her zaman alfa (lider), beta (liderin yardımcısı), delta (sadece alfa ve betaya itaat eden) ve omega (diğer tüm sürü üyeleri) olmak üzere bir liderlik hiyerarşisi vardır ve avlanma hareketlerini sürü halinde gerçekleştirirler. GWO algoritması da optimum sonucu bulmada bu avlanma mekanizmasını kullanır. Bir meta-sezgisel algoritma olarak GWO, çok boyutlu ve karmaşık problemlerin çözümünde başarılı olduğu ispatlanmıştır (Mirjalili vd., 2014).

- Armoni Arama (HS)

Geem ve arkadaşlarının 2001'de literatüre sundukları armoni arama (harmony search, HS) algoritması müzikal beste yapma sürecine dayanan optimizasyon algoritmasıdır. HS algoritması, optimizasyon problemlerini çözmek için belirli parametreler kullanarak çözüm alanını araştırır ve bu süreçte müzik uyumu kavramından esinlenir. Harmony Memory Considering Rate (HMCR) ve Pitch Adjustment Rate (PAR) terimleri, HS algoritmasının önemli parametreleridir. Optimizasyon sırasında en iyi sonuçların saklandığı bir hafıza yapısı oluşturulur ve HMCR yeni çözümün bu hafızadan seçilme oranını ifade eder. PAR ise hafızadan seçilen çözümlerin belirli bir olasılıkla küçük ayarlamalar yapılmasını sağlar. Bu ayarlamalar, çözümlerin ince ayarlarını yaparak daha iyi çözümler elde etmeyi hedefler (Geem vd., 2001).

- Denizanası Arama (JS)

Doğadaki denizanelerinin avlanma stratejilerinden ilham alınarak geliştirilen denizanası arama (jellyfish search, JS) algoritması son yıllarda literatüre sunulan MSA'dır. JS algoritması denizanelerinin su akıntılarına bağlı hareket ve rastgele besin arayışı olmak üzere iki ana hareket stratejisini kullanır. Su akıntılarıyla hareket ve rastgele besin arayışı, keşif ve sömürü yeteneklerini dengeler. Ayrıca JS algoritması anlaşılır ve her türlü probleme kolaylıkla uygulanabilmektedir. Chou ve Truong geliştirdikleri JS algoritmasını literatürde iyi bilinen algoritmalarla karşılaştırarak performansını gözlemlemiştir (Chou & Truong, 2021).

- Politik Optimizasyon (PO) Algoritması

2020 yılında Askari ve arkadaşları tarafından geliştirilen politik optimizasyon (political optimizer, PO) algoritması politik liderlerin karar verme ve strateji geliştirme süreçlerini matematiksel olarak modelleyerek optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan MSA'dır. PO algoritmasında popülasyon politik liderler ve onların destekçilerinden oluşur. Politik liderler popülasyondaki en iyi çözüm adaylarıdır ve diğer çözüm adayları onları takip eder. Liderler, belirli stratejiler geliştirir ve çözümlerini iyileştirmeye çalışır. Bu stratejiler, çözüm alanında belirli bir yöne doğru ilerlemeyi temsil eder. PO algoritması tek ve çok modlu fonksiyonlara uyarlanarak performansı gözlemlenmiş ve hızlı yakınsama becerisiyle ön plana çıkmıştır (Askari vd., 2020).

- Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO)

Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması (teaching-learning based optimization, TLBO) insanların eğitim sürecinden esinlenilerek geliştirilen bir

optimizasyon algoritmasıdır. Algoritma, eğitim sürecinde öğrencilerin öğretmenler tarafından eğitilmesini ve öğrencilerin birbirlerinden öğrenmesini model alır. TLBO, bu eğitim-öğretim sürecini kullanarak optimum çözümleri arar. Rao ve arkadaşlarının önerdikleri bu optimizasyon yöntemi parametre ayarlarına ihtiyaç duymaz, bu da uygulama ve ayar sürecini basitleştirir. TLBO algoritmasının performansı, beş farklı kısıtlı kıyaslama test fonksiyonu, dört farklı kıyaslama mekanik tasarım problemi ve gerçek dünya uygulamaları olan altı mekanik tasarım optimizasyon problemi üzerinde test edilerek ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, TLBO'nun ele alınan mekanik tasarım optimizasyon problemleri için diğer optimizasyon yöntemlerinden daha etkili ve verimli olduğu gözlemlenmiştir (Rao vd., 2011).

- Mayıs Sineği Algoritması (MA)

Mayıs sineği algoritması (mayfly algorithm, MA) 2020 yılında Zervoudakis ve Tsafarakis tarafından geliştirilen bir MSA'dır. MA, doğadaki mayıs sineklerinin çiftleşme davranışlarını ve uçuş dinamiklerini taklit ederek optimum çözüm arar. Bu algorithmada keşif operatörü erkek mayıs sineklerinin rastgele ve hızlı hareketleri ile modellenmiştir. Dişi mayıs sineklerinin erkek mayıs sineklerine çiftleşme çağrıları ile sömürü hareketi gerçekleşir ve yeni mayıs sinekleri yani çözüm adayları doğar. Erkek mayıs sineklerinin dinamik uçuşu, hızlı ve etkili çözüm arayışı sağlar ve bu da optimum çözüme erken yakınsama yeteneğini ön plana çıkarır. MA literatürde bilinen ve optimizasyon problemlerinde çok kullanılan rekabetçi algoritmalarından biridir (Zervoudakis & Tsafarakis, 2020).

- Manta Vatozu Beslenme Optimizasyonu (MRFO)

Manta vatozu beslenme optimizasyon (manta ray foraging optimization, MRFO) algoritması manta vatozlarının beslenme stratejilerinden esinlenen bio-ilhamlı bir optimizasyon algoritmasıdır. 2020 yılında Zhao ve arkadaşları tarafından tanıtılan MRFO algoritması spiral yükselme, lemming araması ve balık sürüsü avlanması olmak üzere üç ana avlanma stratejisini içerir. Spiral yükselme hareketinde manta vatozu suyun yüzeyine doğru spiral bir yol izleyerek besin arar. Lemming arama stratejisinde çözüm adayları en iyi çözüm adaylarından birini lider seçer ve onun etrafında toplanır. Üçüncü ve son avlanma stratejilerinde manta vatozları balık sürüsü halinde hareket ederek avlanırlar. Bu avlanma stratejileri MRFO algoritmasının keşif ve sömürü hareketlerini dengede tutar. Ayrıca gurup halinde hareket ve lider takibi algoritmanın hızlı sonuç alma yeteneğini gösterir (Zhao vd., 2020).

2.2. Matematiksel Problemler

Giderek genişleyen algoritma havuzundaki rekabet uluslararası CEC (IEEE Congress on Evolutionary Computation) konferanslarında sunulan kalite testi (benchmark) fonksiyonlarına göre belirlenir. Özellikle son yıllarda CEC 2014 (J. J. Liang vd., 2013), CEC 2017 (Wu vd., t.y.) ve CEC 2020 (J. Liang vd., 2019) konferanslarında belirlenen çeşitli optimizasyon problemleri geliştirilen algoritmalar arasındaki rekabetin standartlarını tanımlamaktadır. Ayrıca bu algoritmaların performansı daha karmaşık mühendislik problemlerine de uyarlanarak sınanır.

Bu tez çalışmasında da geliştirilen FDBAHA algoritmasının performansı CEC 2017 ve CEC 2020 fonksiyon havuzlarında test edilmiştir. Bu fonksiyonlar tek modlu, çok modlu, hibrit ve birleşik olmak üzere dörde ayrılmaktadır. Tek modlu fonksiyonlar algoritmaların sömürü yönünü, çok modlu fonksiyonlar ise keşif yeteneklerini değerlendirmek için kullanılır. Hibrit fonksiyonlar algoritmaların keşif ve sömürü dengesini test ederken birleşik fonksiyonlar yüksek karmaşıklığa sahip olan arama uzayında algoritmaların performansını değerlendirir.

2.2.1. CEC 2017 Tanıtımı

CEC 2017 test süiti 3'ü tek modlu (F1-F3), 7'si çok modlu (F4-F10), 10'u hibrit (F11-F20) ve 10'u birleşik (F21-F30) olmak üzere klasik test fonksiyonlarından türetilmiş 30 fonksiyondan oluşur. Tablo 3'te bu fonksiyonların türü, adı, arama mesafesi ve boyutları gösterilmektedir. F2 fonksiyonunun yüksek boyutlarda kararsız davranışından ve aynı algoritma için çok farklı performanslar göstermesinden dolayı araştırmacılar tarafından oluşturulan CEC 2017 test süitinden çıkartılmıştır (Awad vd., 2016).

Tablo 3. CEC 2017 test fonksiyonları

Fonksiyon türü	Fonksiyon numarası	Fonksiyon adı	Arama mesafesi	Boyut
Tek modlu	F1	Kaydırılmış ve döndürülmüş bent cigar	[-100, 100]	30, 50, 100
	F3	Kaydırılmış ve döndürülmüş zakharov	[-100, 100]	30, 50, 100
Çok modlu	F4	Kaydırılmış ve döndürülmüş rosenbrock	[-100, 100]	30, 50, 100
	F5	Kaydırılmış ve döndürülmüş rastrigin	[-100, 100]	30, 50, 100
	F6	Kaydırılmış ve döndürülmüş genişletilmiş scaffer f6	[-100, 100]	30, 50, 100
	F7	Kaydırılmış ve döndürülmüş lunacek bi-rastrigin	[-100, 100]	30, 50, 100
	F8	Kaydırılmış ve döndürülmüş kesikli rastrigin	[-100, 100]	30, 50, 100
	F9	Kaydırılmış ve döndürülmüş levy	[-100, 100]	30, 50, 100
	F10	Kaydırılmış ve döndürülmüş schwefel	[-100, 100]	30, 50, 100
Hibrit	F11	Hibrit fonksiyon 1 (N=3)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F12	Hibrit fonksiyon 2 (N=3)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F13	Hibrit fonksiyon 3 (N=3)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F14	Hibrit fonksiyon 4 (N=4)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F15	Hibrit fonksiyon 5 (N=4)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F16	Hibrit fonksiyon 6 (N=4)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F17	Hibrit fonksiyon 6 (N=5)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F18	Hibrit fonksiyon 6 (N=5)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F19	Hibrit fonksiyon 6 (N=5)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F20	Hibrit fonksiyon 6 (N=6)	[-100, 100]	30, 50, 100
Birleşik	F21	Birleşim fonksiyonu 1 (N=3)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F22	Birleşim fonksiyonu 2 (N=3)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F23	Birleşim fonksiyonu 3 (N=4)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F24	Birleşim fonksiyonu 4 (N=4)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F25	Birleşim fonksiyonu 5 (N=5)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F26	Birleşim fonksiyonu 6 (N=5)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F27	Birleşim fonksiyonu 7 (N=6)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F28	Birleşim fonksiyonu 8 (N=6)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F29	Birleşim fonksiyonu 9 (N=3)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F30	Birleşim fonksiyonu 10 (N=3)	[-100, 100]	30, 50, 100

2.2.2. CEC 2020 Tanıtımı

CEC 2020 test süiti 1'i tek modlu (F1), 3'ü çok modlu (F2-F4), 3'ü hibrit (F5-F7) ve 3'ü birleşik (F8-F10) olmak üzere klasik test fonksiyonlarından türetilmiş 10 fonksiyondan oluşur. Her bir fonksiyon türü, belirli optimizasyon zorluklarını temsil eder ve bu zorluklar, algoritmaların performansını çeşitli açılardan test etmek için kullanılır (Yue vd., 2019).

Tablo 4 bu fonksiyonların her birinin ayrıntılarını ve test süitindeki yerlerini göstermektedir. CEC 2020 test süiti, çeşitli optimizasyon stratejilerini test etmek ve algoritmaların performansını detaylı bir şekilde analiz etmek için kapsamlı bir temel sağlar. Bu test süiti, araştırmacılara algoritmalarının güçlü ve zayıf yönlerini anlamalarına yardımcı olabilecek geniş bir değerlendirme perspektifi sunar.

Tablo 4. CEC 2020 test fonksiyonları

Fonksiyon Türü	No.	Fonksiyon Adı	Arama Mesafesi	Boyut
Tek Modlu	F1	Kaydırılmış ve döndürülmüş bent cigar	[-100, 100]	30, 50, 100
	F2	Kaydırılmış ve döndürülmüş schwefel	[-100, 100]	30, 50, 100
Çok Modlu	F3	Kaydırılmış ve döndürülmüş lunacek bi-rastrigin	[-100, 100]	30, 50, 100
	F4	Genişletilmiş rosenbrock's plus griewangk	[-100, 100]	30, 50, 100
Hibrit	F5	Hibrit fonksiyon 1 (N=3)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F6	Hibrit fonksiyon 2 (N=4)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F7	Hibrit fonksiyon 3 (N=5)	[-100, 100]	30, 50, 100
Birleşik	F8	Birleşik fonksiyon 1 (N=3)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F9	Birleşik fonksiyon 2 (N=4)	[-100, 100]	30, 50, 100
	F10	Birleşik fonksiyon 3 (N=5)	[-100, 100]	30, 50, 100

2.3. Kontrol Sistemleri Problemi

2.3.1. Yük Frekans Kontrolü

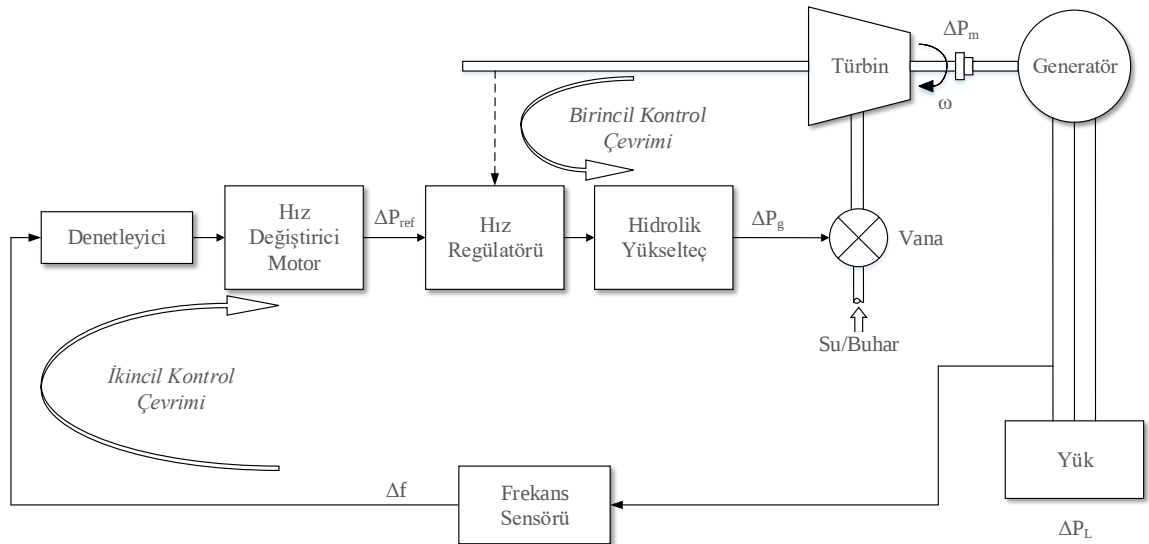
Enterkonnekte güç sistemleri senkronizasyonu sağlanmış üretim merkezlerinin birlikte çalıştırıldığı sistemlerdir. Bu senkronizasyon sistem dinamiklerinin belirlenen nominal çalışma aralığında tutulmasıyla sağlanır. Bunun için üretilen (P_e) ve tüketilen gücün (P_L) eşit olması gerekir. Güç sistemindeki yükler öngörülemez yapıdadır ve ani değişim gösterirler. Ani yük talebi üretim ve tüketim arasında dengesizliğe yol açar (Ram Babu vd., 2023; Shankar vd., 2017). Frekansı etkileyen yükler devreye alındığında veya devreden çıkarıldığında sistem frekansında (f) ve bağlantı hattı gücünde (P_{tie}) dalgalanmalara sebep olur. Bu da güç sisteminde verimin düşmesine, endüstriyel makinelerin zarar görmesine, kabloların ısınmasına ve kısa sürede çözülmezse güç sisteminin çökmesine neden olabilir. Manuel olarak frekans kararlılığının gerçekleştirilmesi mümkün olmayan bu sistemlerde otomatik olarak frekans kontrolü yapılarak sistem kararlılığı sağlanır (Sharma & Yadav, 2019).

Güç sistemlerinde frekans generatörün rotor milinin dönüş hızını ifade eder ve sistemdeki yük ile ters orantılıdır. Türbin-generatör sistemi mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu mekanik enerji bir akışkanın (su/su buharı) türbin çarklarına yüksek basınçlarda çarptırılmasıyla elde edilir. Türbin giriş vanası yardımıyla su veya su buharının debi ve basıncı kontrol edilerek rotor milinin dönüş hızı (ω) dolayısıyla frekans

kontrol edilebilir. Sonuç olarak sistem frekansında bir değişim yaşandığında bir hız regülatörü türbin giriş vanasına müdahale eder ve frekansı nominal değer aralığında tutar. Bu regülasyon işlemi yük frekans kontrolü (YFK) diye ifade edilir ve iki kontrol çevriminden oluşur (Bevrani, 2009);

- Birincil (Primary) Kontrol Çevrimi
- İkincil (Secondary) Kontrol Çevrimi

Birincil kontrol çevrimi sırasında ani yük değişimi sonucunda ortaya çıkan sistem frekansı dalgalanmaları kısa sürede sönümlenerek kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutulur. Frekans değerinde ani bir değişim yaşandığında hız regülatörü saniyeler içerisinde hidrolik yükselteç ile gerekli mekanik gücü üretir ve türbin giriş vanasına müdahale eder. Eğer rotorun dönüş hızında artış söz konusuysa vana kısılır ve türbine gönderilen su veya buharın debisi azaltılarak nominal hız değeri sağlanır. Rotor dönüş hızında azalma ile karşılaşıldığında ise vana açılır ve hız artırılır. Güç sistemindeki tüm üretim merkezleri birincil kontrol çevrimine katılmak zorundadır. Birincil kontrol çevrimi frekans değişimini hızlı bir şekilde sıfırlar ancak frekansı eski (anma) değerine çekemez. Yani kalıcı durum hatası ortaya çıkar. Bu hatayı ortadan kaldırmak için ikincil kontrol çevrimine gerek duyulur. Şekil 2’de basit bir güç sistemi için yük frekans kontrolünün birincil ve ikincil kontrol çevrimleri gösterilmektedir (Bevrani, 2009).



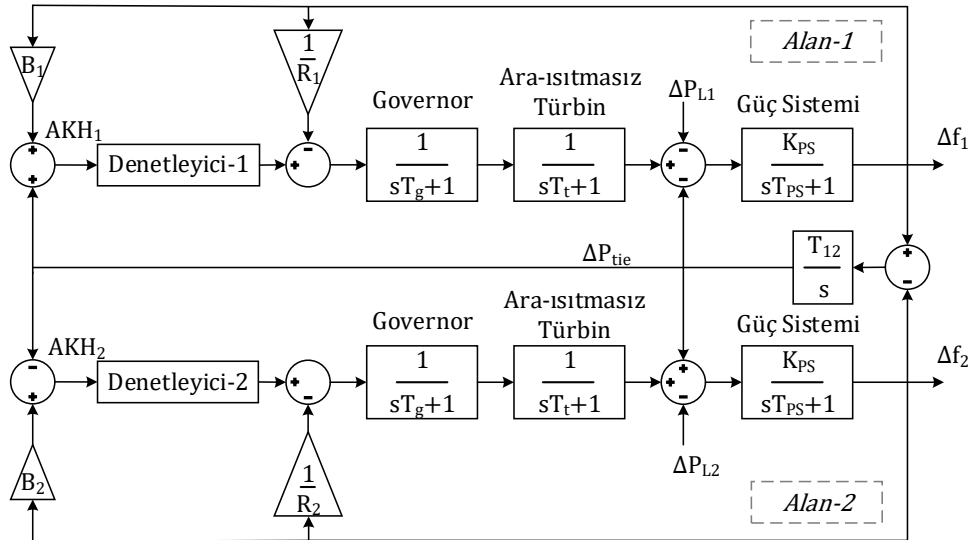
Şekil 2. Yük frekans kontrolünün blok diyagramı

İkincil kontrol çevriminin amacı birincil kontrolden sonra frekans değerinde oluşan kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmak ve frekansı anma değerinde tutmaktır. Bu temelde bir integratör içeren denetleyici ile gerçekleştirilir. Ölçülen sistem frekansı ve hattın gücü referans değerlerle karşılaştırılır. Aradaki fark sinyal olarak denetleyiciye gönderilir.

2.3.2. Sistem Tanıtımı

Dinamik bir sistemi incelemek ve analiz etmek için mevcut sistemin matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Her sistem bileşeni kendi özelliklerini tanımlayan uygun transfer fonksiyonu ile temsil edilir (Gheisarnejad & Khooban, 2019; Sahin, 2020). Bu çalışmada incelenen sistemler literatürde oldukça yaygın kullanılan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi, iki alanlı çok kaynaklı (Termal/Hidro/Gaz) güç sistemi ve FV-termal güç sistemidir. Elde ettiğimiz sonuçların literatürdeki benzer çalışmalarla adil olarak karşılaştırılabilmesi için aynı sistem parametreleri kullanılmıştır.

Şekil 3'te iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi için YFK tasarımının doğrusal modeli gösterilmektedir. Ara-ısıtmasız iki termal güç ünitesine sahip sistemde bölgelerin birbirine eşit olduğu kabul edilmiştir. Sistem için kullanılan parametre değerleri Ek 1'de verilmiştir.



Şekil 3. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin blok diyagramı (Sahin, 2020)

Bu sistemde kullanılan ara-ısıtmasız türbin ara-ısıtmaya sahip bir türbine göre daha basit transfer fonksiyonuna sahiptir:

$$G_T(s) = \frac{1}{sT_t + 1} \quad (16)$$

burada T_t buhar türbini zaman sabitidir ve birimi saniyedir.

Sistemdeki ani güç talebi ile ortaya çıkan frekans sapmasını sabitlemek için hız regülatörü (governor) türbin girişine müdahale eder. Hız regülatörü için transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

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

burada T_g hız regülatörü zaman sabitidir ve birimi saniyedir.

Ayar noktası gücündeki değişiklik (ΔP_{ref}) ile hız regülatörü için çıkış sinyali (ΔP_C) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Delta P_C(s) = \Delta P_{ref} + \frac{1}{R} \Delta f \quad (18)$$

burada R hız regülatörü sabitini (Hz/p.u.) ve Δf frekans değişimini (Hz) ifade etmektedir.

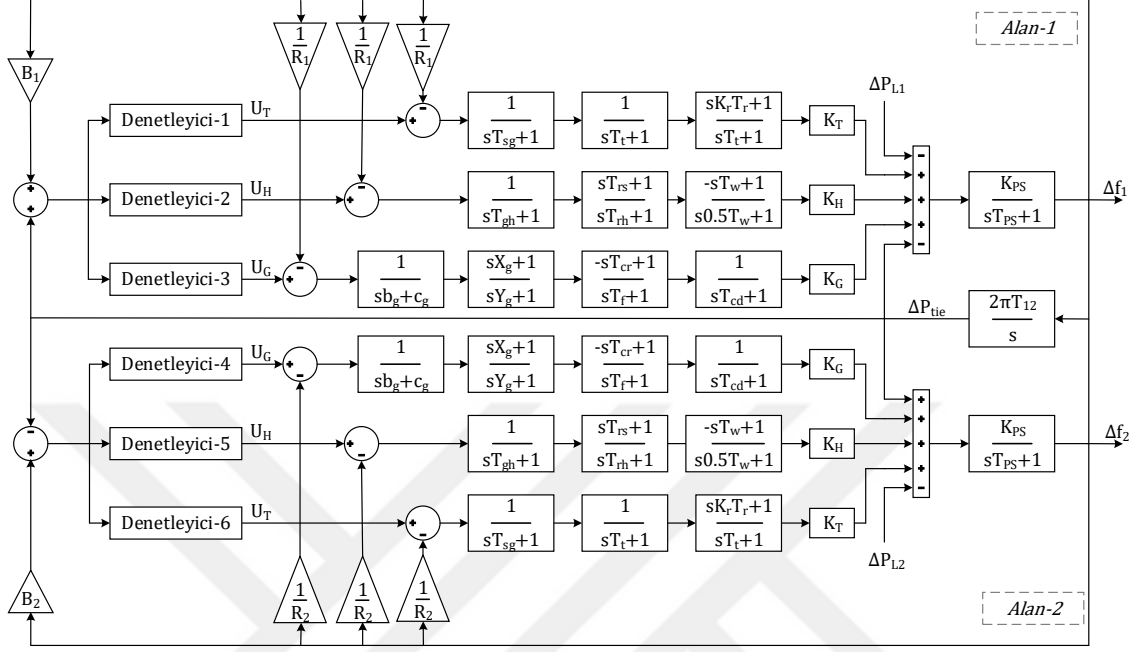
Yük ve generatör dinamiği için genel transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$G_P(s) = \frac{K_{PS}}{sT_{PS} + 1} \quad (19)$$

burada K_{PS} güç sistemi kazanç sabiti ve T_{PS} güç sistemi zaman sabitidir ($K_{PS} = 1/D$, $T_{PS} = 2H/fD$).

Bu çalışmada incelenen ikinci sistem literatürde yaygın olarak kullanılan iki alanlı çok kaynaklı güç sistemidir. Bu sistemde her alan için üç ünite bulunur. Bunlar termal, hidro ve gaz üniteleridir (Çelik, 2021; Mohanty vd., 2014; Sahin, 2020). Her ünitenin toplam üretime katkısını belirleyen katılım faktörü vardır. İncelenen ilk sistemde olduğu gibi bu sistemde de iki alan birbirine eşit kabul edilmiştir. Sistem için YFK tasarımı Şekil

4'te gösterilmiştir ve sistemdeki her ünite için transfer fonksiyonları aşağıda açıklanmıştır. Sistem için kullanılan parametre değerleri Ek 2'de verilmiştir.



Şekil 4. İki alanlı çok kaynaklı (Termal/Hidro/Gaz) güç sisteminin blok diyagramı (Çelik, 2021)

Bu sistemde bulunan termal güç ünitesinin iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde kullanılandan farkı ara-ısıtıcı türbinin bulunmasıdır. Ara-ısıtıcı için transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$Ara - ısıtıcı = \frac{sK_rT_r + 1}{sT_r + 1} \quad (20)$$

burada K_r ara-ısıtma kazanç sabiti ve T_r ara-ısıtma zaman sabitidir.

Hidro güç ünitesi için transfer fonksiyonları aşağıda verilmiştir:

$$Governor = \frac{1}{sT_{gh} + 1} \quad (21)$$

$$Geçici düşüş = \frac{T_{rs} + 1}{sT_{rh} + 1} \quad (22)$$

$$Cebri boru türbini = \frac{-sT_w + 1}{s0,5T_w + 1} \quad (23)$$

burada T_{gh} hidro türbin hız regülatörü zaman sabiti (s), T_{rs} hidro türbin hız regülatörü sıfırlama süresi (s), T_{rh} geçici düşüş zaman sabiti (s) ve T_w cebri borudaki suyun nominal başlama süresidir (s).

Gaz ünitesini oluşturan valf konumlandırıcı, regülatör, yanma reaksiyonu ve kompresör deşarjı için transfer fonksiyonları aşağıdaki gibidir:

$$\text{Valf konumlandırıcı} = \frac{1}{sb_g + c_g} \quad (24)$$

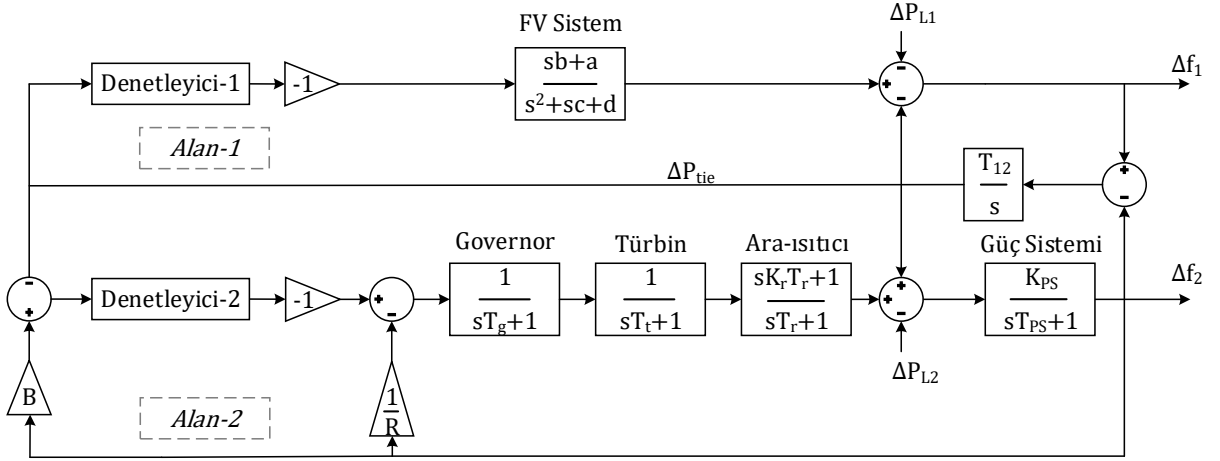
$$\text{Hız regülatörü} = \frac{sX_g + 1}{sY_g + 1} \quad (25)$$

$$\text{Yanma reaksiyonu} = \frac{-sT_{cr} + 1}{sT_f + 1} \quad (26)$$

$$\text{Kompresör deşarjı} = \frac{1}{sT_{cd} + 1} \quad (27)$$

burada b_g valf konumlandırıcısının gaz türbini sabitini, c_g gaz türbini valfi konumlandırıcısını, X_g ve Y_g sırasıyla gaz türbini hız regülatörü sağlama ve gecikme süresi sabitlerini, T_{cr} gaz türbini yanma reaksiyonu gecikme süresini, T_f gaz türbini yakıt zaman sabitini ve T_{cd} kompresör deşarj hacmi zaman sabitini ifade etmektedir.

Bu çalışmada incelenen üçüncü sistem iki bölge FV-termal güç sistemidir. Bu sistemde kullanılan FV güç sistemi santrali, küçük ölçekli ve şebekeden bağımsız yerel FV sistemlerinden farklıdır. FV santralleri şebekeye bağlıdır ve sistem frekansını doğrudan etkiler (Davtalab vd., 2022). Şekil 5'te iki alanlı FV-termal güç sistemi için YFK tasarımının blok diyagramı gösterilmiştir. Sistem için kullanılan parametre değerleri Ek 3'te verilmiştir.



Şekil 5. İki alanlı FV-termal güç sisteminin blok diyagramı (Khadanga vd., 2020b)

Alan-1’de verilen FV santralin transfer fonksiyonu FV panel, maksimum güç noktası takibi (MGNT), evirici ve filtreden oluşur (Davtalab vd., 2022). FV santrali için belirlenen transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$G_{PV}(s) = \frac{a - sb}{s^2 + sc + d} \quad (28)$$

burada a ve b FV paneli için kazanç değerlerini ifade ederken c ve d FV güç sistemi için zaman sabitleridir.

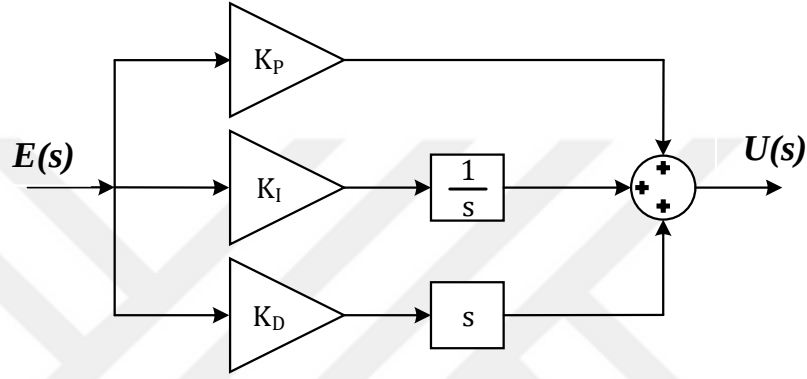
2.3.3. Denetleyici Tanıtımı

Otomatik kontrol sistemleri, karmaşık ve dinamik sistemlerin verimli çalışması amacıyla referans değerlere göre sistemi denetler ve kontrol eder. Bu sistemlerde kullanılan denetleyiciler, hata değerine (gerçek değer ve referans değer arasındaki fark) göre sisteme müdahale ederek yeni giriş sinyalleri üretir. Bu süreç hata değeri kabul edilebilir aralıkta olana kadar devam eder (Hote & Jain, 2018).

Otomatik kontrol endüstrisinde basit ve kararlı yapısından dolayı oransal-integral-türev (Proportional-Integral-Derivative, PID) denetleyicisi en yaygın kullanılan denetleyicilerden biridir (Dhanasekaran vd., 2020; Khadanga vd., 2020a). PID denetleyicisi oransal, integral ve türev olmak üzere üç kontrol eylemine sahiptir. PID denetleyicisinin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (29)$$

burada $U(s)$ ve $E(s)$, sırasıyla s-uzayında çıkış ve giriş (hata) sinyalleridir. K_P oransal kazanç, K_I integral kazancı ve K_D türev kazancıdır. Şekil 6 PID denetleyicisinin blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 6. PID denetleyicisinin blok diyagramı (Padhan vd., 2014)

Kesir hesabı için en sık kullanılan metot Oustaloup yakınsama metodudur. Bant geçiren filtreye dayalı Oustaloup yakınsama metodunun matematiksel denklemi aşağıda gösterildiği gibidir (Xue vd., t.y.):

$$s^\alpha \approx \omega_h^\alpha \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_z}{s + \omega_p}, \quad \text{for } 0 < \alpha < 1 \quad (30)$$

burada N sıfır kutup çiftlerinin sayısıdır ve değeri 5'tir. Analog filtre sırasını belirlemek için N kullanılır. ω_z sıfırları, ω_p kutupları temsil eder.

Geliştirilmiş Oustaloup yakınsama metodunun matematiksel denklemi aşağıdaki gibidir:

$$s^\alpha \approx \left(\frac{d}{b}\omega_h\right)^\alpha \frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1-\alpha)s^2 + b\omega_h s + d\alpha} \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_z}{s + \omega_p}, \quad \text{for } 0 < \alpha < 1 \quad (31)$$

burada genellikle d sabiti 9, b sabiti 10 olarak kabul edilir (Xue vd., 2009). Sıfırlar ve kutuplar aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\omega_p = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1+\alpha)}{2N+1}} \quad (32)$$

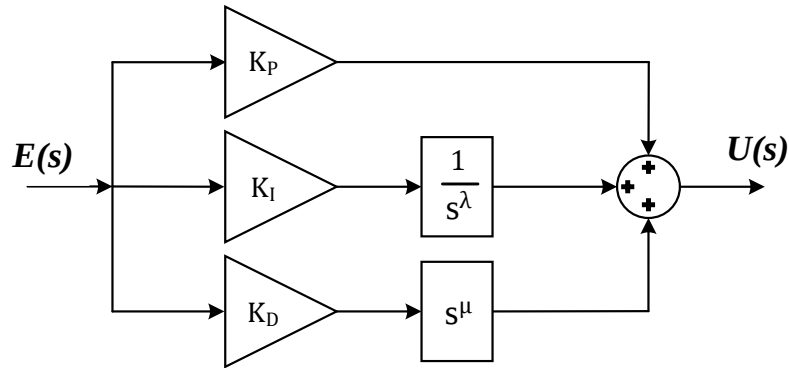
$$\omega_z = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1-\alpha)}{2N+1}} \quad (33)$$

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

Podlubny tarafından önerilen kesir dereceli PID (Fractional order PID, FOPID) denetleyicisi son yıllarda popüleritesini artırmıştır. Bu tür kesir dereceli denetleyicilerin tercih edilmesinin ana sebebi PID gibi geleneksel denetleyicilerden daha iyi performans göstermesidir (Murugesan vd., 2023; Zamani vd., 2016). Ancak FOPID denetleyicisini tasarlamak diğerleri kadar basit değildir. Çünkü bu denetleyici PID denetleyicisine ek olarak iki parametre daha içerir. FOPID denetleyicisinde K_P , K_I , K_D , λ ve μ olmak üzere beş parametre bulunur. FOPID denetleyicisinin transfer fonksiyonu aşağıda gösterilmiştir:

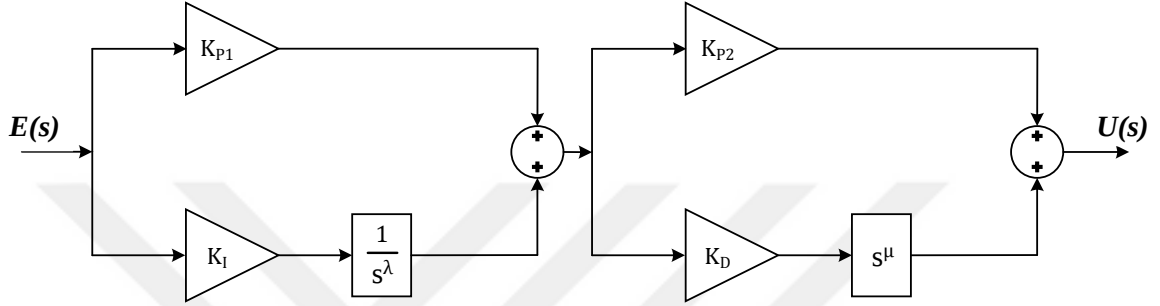
$$G_{FOPID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (34)$$

burada λ ve μ tamsayı olmayan gerçek pozitif sayılardır. Şekil 7 FOPID denetleyicisinin blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 7. FOPID denetleyicisinin blok diyagramı (Murugesan vd., 2023)

Şekil 8’de gösterildiği gibi FOPI ve FOPD denetleyicilerinin artarda eklenmesiyle FOPI-FOPD denetleyicisi oluşturulur. FOPI-FOPD denetleyicisinde K_{P1} , K_{P2} , K_I , K_D , λ ve μ olmak üzere altı parametre bulunur. Yani bu denetleyicinin optimize edilecek parametre sayısı FOPID ve PID denetleyicilerine göre fazladır. Bu yüzden FOPI-FOPD denetleyicisinden YFK için daha iyi performans göstermesi beklenmektedir (Çelik, 2021).



Şekil 8. FOPI-FOPD denetleyicisinin blok diyagramı (Çelik, 2021)

FOPI-FOPD denetleyicisinin transfer fonksiyonu ise aşağıdaki gibidir:

$$G_{FOPID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \left(K_{P1} + \frac{K_I}{s^\lambda} \right) (K_{P2} + K_D s^\mu) \quad (35)$$

2.3.4. Amaç Fonksiyonu Tanıtımı (ITAE)

Amaç fonksiyonları, optimizasyon problemlerinin çözümünde çok önemli bir rol oynamaktadır. Literatürde kontrol tasarımı için genellikle kullanılan amaç fonksiyonları zamanla çarpılan mutlak hatanın integrali (integral time-weighted absolute error, ITAE), mutlak hatanın integrali (integral absolute error, IAE), zamanla çarpılan hatanın karesinin integrali (integral time-weighted squared error, ITSE) ve hatanın karesinin integrali (integral squared error, ISE) fonksiyonlarıdır (Padhan vd., 2014). Optimizasyon probleminin minimize ya da maksimize edilmesi gereken kriterlerine göre kullanılacak amaç fonksiyonu dikkatli seçilmelidir. IAE ve ISE amaç fonksiyonları oturma süresini kısaltmakta yetersiz kalır. ITAE amaç fonksiyonu ise oturma süresini minimize eder. Aynı zamanda ITAE amaç fonksiyonu maksimum aşmayı da doğrudan etkilemektedir (Cavdar vd., 2022; Gheisarnejad, 2018).

Bu çalışmada denetleyici parametrelerinin en uygun şekilde tasarlanması için amaç fonksiyonu olarak ITAE amaç fonksiyonu tercih edilmiştir. ITAE amaç fonksiyonunun matematiksel ifadesi aşağıda gösterildiği gibidir:

$$ITAE = \int_0^{t_{sim}} t \cdot (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|) dt \quad (36)$$

burada Δf_1 ve Δf_2 sırasıyla sistemin birinci ve ikinci alandaki frekans değişimleri, ΔP_{tie} bağlantı hattı gücündeki değişimdir ve t_{sim} simülasyon süresidir.

2.4. Değerlendirme Yöntemleri

2.4.1. İstatistiksel Değerlendirme Yöntemleri

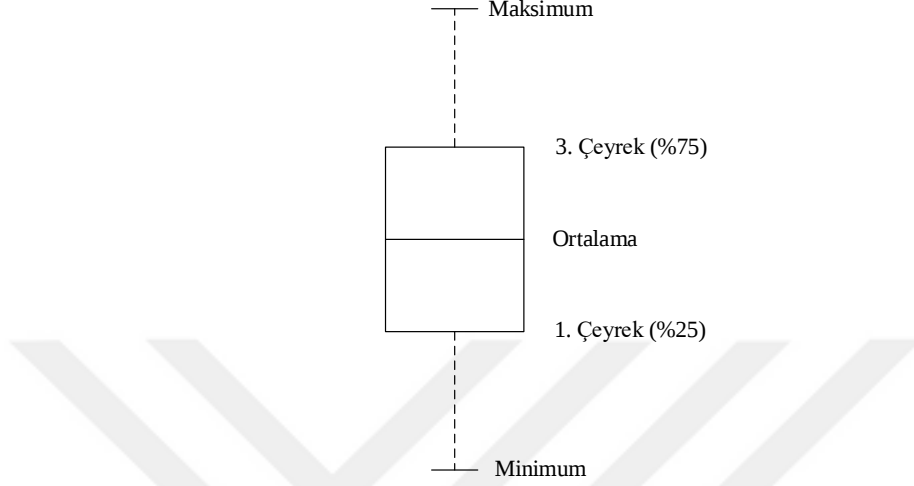
- Ortalama ve Standart Sapma

CEC 2017 ve CEC 2020 gibi kalite testi fonksiyonlarının bir optimizasyon metodu ile optimize edildikten sonra performansının değerlendirilmesi için tipik olarak hata değerlerinin ortalama ve standart sapması belirlenerek yorumlanır. Ortalama ve standart sapma değerleri her bir fonksiyon için ayrı ayrı hesaplanır. Bu değerlerin belirlenebilmesi için parametre ayarlarının aynı tutulduğu birden fazla deneme yapılmalıdır. Ortalama ve standart sapma değerleri bir algoritmanın belirli bir fonksiyonu ne kadar iyi optimize ettiğini anlamak için önemlidir. Örneğin düşük bir ortalama hata değeri iyi performans anlamına gelir ve düşük bir standart sapma değeri algoritmanın istikrarlı çalıştığını gösterir. Bu değerlerin belirlenmesi ile optimizasyon algoritmalarının performansları karşılaştırılabilir.

- Box-Plot

Kutu grafikleri (box-plot) görsel olarak veri dağılımlarının yorumlanabilmesi için sık kullanılan istatistiksel analizlerden biridir. Bir optimizasyon algoritması ile bir fonksiyon için birkaç deneme sonucunda elde edilen hata değeri sonuçları box-plot grafiği ile gösterilebilir. Bir box-plot grafiği elde edilen hatanın ortanca değerini, minimum ve maksimumunu gösterir. Ayrıca Şekil 9'da örnek bir box-plot grafiğinde gösterildiği gibi grafik üzerinde veri aralıklarının çeyreklerine de yer verilir. Şekilde de görüldüğü gibi kutu dışına doğru uzanan çizgiler verinin aykırı değerler hariç uç değerlerini gösterir. Aykırı

değerler çeyrekler arası açıklık (interquartile range, IQR) değerine göre belirlenen sınırlar dışında kalan değerlerdir ve grafikte yıldız veya daire şeklinde gösterilir. IQR 3'cü ve 1'ci çeyrekler arasındaki fark olarak tanımlanır (McGill vd., 1978).



Şekil 9. Box-plot grafiği (McGill vd., 1978)

- Wilcoxon ve Friedman Testleri

Wilcoxon ve Friedman testleri normal olmayan dağılıma sahip parametrik olmayan veri analizlerinde kullanılan karşılaştırma testleridir. Friedman testleri bir veri setindeki gruplar arasında istatistiksel farkın belirlenmesinde kullanılır. Bu tez çalışmasında grup olarak her bir algoritma tarafından optimize edilen benchmark fonksiyonları düşünülebilir. Friedman testi bu gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını belirler. Bu fark her bir grubun diğer gruplardan performans olarak ne derecede iyi ya da kötü olduğunu görmemizi sağlar. Özetle her bir algoritmanın problem süitindeki skorları karşılaştırılarak ortaya bir Friedman puanlaması çıkar. Burada en iyi performans gösteren algoritma puanı en düşük olandır. Wilcoxon testinde ise iki algoritma arasında problem bazında karşılaştırma yapılır. Örneğin CEC 2020 test süitinde bulunan 10 problemden kaçında algoritmalarından birinin diğerini yendiği veya yenildiği Wilcoxon testi ile gözlemlenebilir. Bu test sonucunda eğer bir algoritma diğeriyle karşılaştırıldığında 10 problemden 7'sini kazanmış, 2'sinde berabere kalmış ve 1'inde yenilmişse bu sonuç 7/2/1 olarak gösterilir (Friedman, 1937; López-Vázquez & Hochshtain, 2019). Wilcoxon ve Friedman testlerinin optimizasyon algoritmalarının karşılaştırılmasında kullanımı oldukça yaygındır. Öte yandan istatistiksel analizde birçok parametrik olmayan test

kullanılmaktadır. Bu testlerden hangisinin kullanılacağı veri setinin yapısı, bağımsızlık durumu gibi faktörlere bağlıdır (López-Vázquez & Hochsztain, 2019).

- Yakınsama Eğrisi

Yakınsama eğrisi optimizasyon süresince amaç fonksiyonu değerinin iterasyona göre değişimini gösteren grafikdir. Bir algoritma optimizasyon sırasında belirlenen amaç fonksiyonunu minimize ya da maksimize etmeyi hedefler. Her iterasyon sonunda bir önceki iterasyonda bulunandan daha iyi bir sonuç bulunur ve belirlenen iterasyon sayısı bittikten sonra en iyi çözüm belirlenir. Yakınsama eğrisi ile bu sürecin kaç iterasyonda gerçekleştiği ve ne kadar başarılı olduğu gözlemlenebilir. Ayrıca yakınsama eğrisi ile optimizasyon için belirlenen iterasyon sayısının yeterli olup olmadığı belirlenebilir. Örneğin eğri son iterasyonda bile düşüyor veya dalgalanıyorsa bu algoritmanın daha fazla iterasyona ihtiyacı olduğunu gösterir. Algoritmaların probleme ve parametrelere göre performansı değişebilmektedir. Bu yüzden yakınsama eğrileri dikkatli incelenerek probleme uygun algoritma iterasyon sayısı belirlenir.

2.4.2. Kontrol Sistemi Değerlendirme Yöntemleri

- Zaman Bölgesi Analizi

Yük frekans kontrolü çalışmalarında zaman içerisinde bir güç sisteminin dinamik davranışlarını incelemek ve iyileştirmek için zaman bölgesi analizi yapılır. Zamana göre sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişim eğrileri ani yük girişine karşı sistemin gösterdiği tepkileri ve kararlılığını gözlemlemek için önemli faktörlerden biridir. Sisteme uygulanan ani yük girişi sistem frekansında ve bağlantı hattı güç değişiminde dalgalanmalara sebep olur. Bu dalgalanmaları en kısa sürede sönmölemek için kullanılan optimizasyon algoritmaları ve denetleyici kombinasyonlarından sistem için en uygununun belirlenmesinde zaman bölgesi analizi en sık kullanılan araçlardan biridir. Sonuç olarak zaman bölgesi analizi bir sistemin performansını, kararlılığını ve güvenilirliğini ölçerek değerlendirmemize yardımcı olur.

- Gürbüzlük Analizi

Sistem güvenilirliği ve sağlamlığı açısından yapılan analizlerden biri de gürbüzölük veya dayanıklılık analizidir. Gürbüzlük analizinde güç sisteminin beklenmedik dış etkenlere karşı dayanıklılığı ve istikrarlılığı ölçölür. Gerçek dünya koşullarında sistemlerin karşılaşılabileceğı, sistem frekansını doğrudan etkileyebilecek çevresel değişkenlikler veya

parametre değişikliklerine karşı sistem dirençli olmalıdır. Bu yüzden bilgisayar ortamında ve deneylerde birçok analiz yapılır. Bu sayede sistem performansı ve sağlamlığı gözlemlenerek gerekli ayarlamalarla geliştirme fırsatı doğar.

- Bozucu Yük Analizi

Denetleyici parametrelerinin optimize edildiği algoritmaların farklı senaryolarda performansını ölçmek için sisteme farklı zamanlarda değişken yük sinyali girişı uygulanarak bozucu yük analizi yapılır. Bu analiz tasarlanan denetleyici parametrelerinin sistem kararlılığı ve güvenilirliği için ne derecede ideal olduğunun belirlenmesinde yardımcı olur. Bozucu yük analizi, tasarım aşamasındaki bir sisteminin tasarlanmadan önce yapılması gereken kritik öneme sahip analizlerden biridir.



3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında meta-sezgisel bir algoritma olan AHA algoritmasına yeni bir seçim metodu (FDB) uygulanmış ve gerekli analizler gerçekleştirilerek geliştirilen algoritmanın performansı gözlemlenmiştir.

Bu bölümde matematiksel problemlerin sonuçları ve kontrol sistemleri probleminin sonuçları olmak üzere iki alt başlık bulunmaktadır. İlk alt başlıkta önerilen FDBAHA algoritmasının performansı CEC 2017 ve CEC 2020 matematiksel problemlerinin çözümünde kullanılmış ve istatistiksel değerlendirme analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. İkinci alt başlıkta ise önerilen algoritma YFK kontrol probleminde sınanmış ve yapılan analizlerin sonuçları gözlemlenerek yorumlanmıştır.

3.1. Matematiksel Problemlerin Sonuçları

Bu alt başlık önerilen FDBAHA algoritmasının CEC 2017 ve CEC 2020 problemlerinin çözümünde kullanılarak AHA algoritmasıyla ve son yıllarda geliştirilmiş bazı rakip algoritmalarla performans karşılaştırmalarının yapıldığı analiz sonuçlarını içermektedir.

Önerilen FDBAHA, AHA ve rakip algoritmaların CEC 2017 ve CEC 2020 problemleri için optimizasyon sonuçları 30, 50 ve 100 boyutta her problem için 51 bağımsız çalışma ile elde edilmiştir. Maksimum iterasyon sayısı 10000*Boyut olarak kabul edilmiştir. Çalışma MATLAB programlama ortamında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5'te önerilen FDBAHA ve AHA algoritmalarının CEC 2017 ve CEC 2020 problemleri için 30, 50 ve 100 boyutta Friedman testi sonucunda elde edilen sıralamaları gösterilmiştir. Tablo incelendiğinde önerilen FDBAHA algoritmasının problemlerin çoğunluğunda üstün performans gösterdiği görülebilir. Tablo 6'da ise Wilcoxon testi ile elde edilmiş ikili karşılaştırma sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlardan da önerilen FDBAHA algoritmasının problemlerin çoğunda temel AHA algoritmasını yendiği ve hiçbir problemde yenilmediği görülmüştür. Örneğin 30 boyutta 10 problemten oluşan CEC 2020 problemlerinden 8'inde önerilen FDBAHA algoritması AHA algoritmasından daha başarılı performans göstermiş, 2'sinde ise berabere kalmıştır. Diğer boyutlarda ve problemlerde de önerilen FDBAHA algoritmasının üstün performans gösterdiği görülmüştür. Buradan

FDBAHA algoritmasının gelişimi ve FDB seçim yönteminin ne derecede etkili olduğu görülebilir.

Tablo 5. Friedman testi ile elde edilen sıralamalar

Algoritma	Boyut=30		Boyut=50		Boyut=100		Ortalama sıra
	CEC 2017	CEC 2020	CEC 2017	CEC 2020	CEC 2017	CEC 2020	
FDBAHA	1,28	1,24	1,28	1,24	1,25	1,27	1,26
AHA	1,72	1,76	1,72	1,76	1,75	1,73	1,74

Tablo 6. Wilcoxon testi ile elde edilen ikili karşılaştırma sonuçları

vs. AHA +/-/-	Boyut=30		Boyut=50		Boyut=100	
	CEC 2017	CEC 2020	CEC 2017	CEC 2020	CEC 2017	CEC 2020
FDBAHA	20/9/0	8/2/0	20/9/0	7/3/0	20/9/0	6/4/0

İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda geliştirilen FDBAHA ve temel AHA algoritmalarının CEC 2017 ve CEC 2020 problemlerinde 51 bağımsız çalıştırma sonucunda her problem için bulunan hata değerlerinin ortalama ve standart sapması hesaplanmıştır.

Tablo 7 CEC 2017 problemlerinde AHA ve FDBAHA algoritmalarının 30, 50 ve 100 boyut için hata değerlerinin ortalama ve standart sapmalarını içerir. Tabloda her problem için bulunan en iyi sonuç değeri kalınlaştırılarak gösterilmiştir. Buna göre 30 boyutta CEC 2017 problemlerinde FDBAHA algoritması 29 problemde 25'nde AHA algoritmasından daha iyi sonuç bulmuştur. Tabloda 50 boyutta 4 problem ve 100 boyutta 1 problem dışında bütün problemlerde yine FDBAHA algoritmasının AHA algoritmasından daha iyi sonuç gösterdiği görülebilir. Ayrıca tablolar incelendiğinde genellikle tek ve çok modlu problemlerde FDBAHA algoritmasının AHA algoritmasına göre daha iyi sonuç gösterdiği ancak bazı hibrit ve birleşik problemlerde daha kötü sonuç bulduğu gözlemlenmiştir. Buradan geliştirilen FDBAHA algoritmasının keşif-sömürü dengesinin başarılı olduğu ancak bazı karmaşık problemlerde performansının düştüğü sonucuna varılabilir.

Tablo 7. CEC 2017 için ortalama ve standart sapma değerleri

F.	30		50		100	
	AHA	FDBAHA	AHA	FDBAHA	AHA	FDBAHA
F1	5,93E+03 (6,25E+03)	1,01E+01 (7,20E+01)	4,02E+03 (6,41E+03)	5,34E+03 (7,97E+03)	1,08E+04 (1,18E+04)	7,72E+03 (1,09E+04)
F3	1,71E+00 (4,41E+00)	7,00E-08 (1,82E-07)	3,83E+02 (3,15E+02)	8,55E-03 (1,33E-02)	1,03E+04 (3,60E+03)	1,33E+02 (9,23E+01)
F4	8,38E+01 (3,13E+01)	4,45E+01 (3,81E+01)	1,08E+02 (5,60E+01)	1,03E+02 (5,69E+01)	2,63E+02 (5,55E+01)	2,47E+02 (4,08E+01)
F5	1,27E+02 (3,07E+01)	7,83E+01 (1,95E+01)	3,18E+02 (3,96E+01)	1,95E+02 (3,37E+01)	7,98E+02 (6,75E+01)	5,86E+02 (7,78E+01)
F6	2,37E+00 (4,00E+00)	9,46E-02 (1,77E-01)	6,00E+00 (8,79E+00)	6,23E-01 (6,80E-01)	1,40E+01 (9,94E+00)	1,66E+00 (1,36E+00)
F7	2,25E+02 (7,03E+01)	1,38E+02 (2,47E+01)	6,06E+02 (1,74E+02)	3,37E+02 (8,65E+01)	2,05E+03 (3,37E+02)	1,37E+03 (1,66E+02)
F8	1,22E+02 (2,78E+01)	7,31E+01 (1,90E+01)	3,37E+02 (4,42E+01)	1,98E+02 (3,49E+01)	8,89E+02 (9,33E+01)	5,93E+02 (6,57E+01)
F9	2,39E+03 (9,50E+02)	4,41E+02 (3,24E+02)	8,62E+03 (2,68E+03)	4,76E+03 (1,64E+03)	2,18E+04 (8,31E+02)	1,68E+04 (2,93E+03)
F10	3,29E+03 (5,58E+02)	2,58E+03 (5,16E+02)	5,43E+03 (9,90E+02)	4,83E+03 (6,85E+02)	1,35E+04 (1,06E+03)	1,19E+04 (1,28E+03)
F11	7,69E+01 (2,87E+01)	5,75E+01 (2,83E+01)	1,32E+02 (2,63E+01)	1,12E+02 (3,11E+01)	5,86E+02 (1,09E+02)	4,05E+02 (8,18E+01)
F12	2,15E+05 (1,47E+05)	5,94E+04 (3,99E+04)	1,59E+06 (7,63E+05)	8,26E+05 (4,68E+05)	6,01E+06 (2,53E+06)	2,28E+06 (8,97E+05)
F13	1,58E+04 (1,70E+04)	1,08E+04 (1,38E+04)	4,89E+03 (6,16E+03)	4,97E+03 (6,62E+03)	6,54E+03 (6,34E+03)	5,33E+03 (6,30E+03)
F14	5,05E+03 (4,76E+03)	1,65E+03 (2,13E+03)	4,25E+04 (2,65E+04)	1,60E+04 (1,31E+04)	4,39E+05 (1,38E+05)	1,34E+05 (5,14E+04)
F15	2,60E+03 (2,83E+03)	5,34E+03 (8,11E+03)	9,96E+03 (6,59E+03)	4,58E+03 (4,91E+03)	1,71E+03 (1,94E+03)	3,44E+03 (4,67E+03)
F16	1,02E+03 (2,90E+02)	9,54E+02 (3,03E+02)	1,61E+03 (3,93E+02)	1,70E+03 (4,56E+02)	4,20E+03 (7,06E+02)	4,06E+03 (7,06E+02)
F17	4,65E+02 (2,22E+02)	4,02E+02 (1,77E+02)	1,43E+03 (3,12E+02)	1,21E+03 (2,62E+02)	3,25E+03 (5,61E+02)	3,00E+03 (4,93E+02)
F18	5,76E+04 (4,18E+04)	1,86E+04 (1,48E+04)	2,19E+05 (1,11E+05)	7,11E+04 (3,04E+04)	5,19E+05 (1,95E+05)	2,33E+05 (7,33E+04)
F19	3,72E+03 (4,24E+03)	6,41E+03 (9,03E+03)	1,45E+04 (9,33E+03)	1,17E+04 (8,65E+03)	2,96E+03 (2,93E+03)	2,43E+03 (3,00E+03)
F20	4,53E+02 (1,76E+02)	4,30E+02 (1,67E+02)	1,11E+03 (3,60E+02)	9,71E+02 (3,35E+02)	3,09E+03 (6,77E+02)	2,80E+03 (4,80E+02)
F21	2,94E+02 (2,60E+01)	2,77E+02 (2,00E+01)	4,28E+02 (3,43E+01)	3,79E+02 (3,58E+01)	9,12E+02 (8,41E+01)	7,97E+02 (8,02E+01)
F22	1,01E+02 (1,71E+00)	1,77E+02 (5,47E+02)	6,20E+03 (1,86E+03)	5,50E+03 (1,31E+03)	1,69E+04 (1,62E+03)	1,40E+04 (1,10E+03)
F23	4,75E+02 (3,16E+01)	4,46E+02 (2,64E+01)	7,36E+02 (6,59E+01)	6,56E+02 (3,93E+01)	1,02E+03 (8,09E+01)	9,66E+02 (7,53E+01)
F24	5,76E+02 (4,11E+01)	5,36E+02 (2,89E+01)	8,81E+02 (8,36E+01)	8,13E+02 (6,99E+01)	1,86E+03 (1,70E+02)	1,73E+03 (1,35E+02)
F25	4,00E+02 (1,86E+01)	3,88E+02 (5,19E+00)	5,75E+02 (3,26E+01)	5,55E+02 (3,82E+01)	8,02E+02 (6,66E+01)	7,95E+02 (7,29E+01)
F26	1,22E+03 (1,50E+03)	1,78E+03 (8,53E+02)	2,89E+03 (3,30E+03)	3,87E+03 (1,41E+03)	1,68E+04 (7,90E+03)	1,36E+04 (1,92E+03)
F27	5,57E+02 (1,83E+01)	5,33E+02 (1,43E+01)	9,00E+02 (1,38E+02)	7,42E+02 (9,43E+01)	1,19E+03 (1,35E+02)	9,83E+02 (1,10E+02)
F28	3,95E+02 (3,18E+01)	3,67E+02 (6,61E+01)	5,06E+02 (3,29E+01)	5,00E+02 (2,85E+01)	6,11E+02 (3,71E+01)	5,90E+02 (3,13E+01)
F29	8,97E+02 (2,16E+02)	7,46E+02 (1,85E+02)	1,45E+03 (3,58E+02)	1,19E+03 (2,82E+02)	4,11E+03 (4,80E+02)	3,75E+03 (6,01E+02)

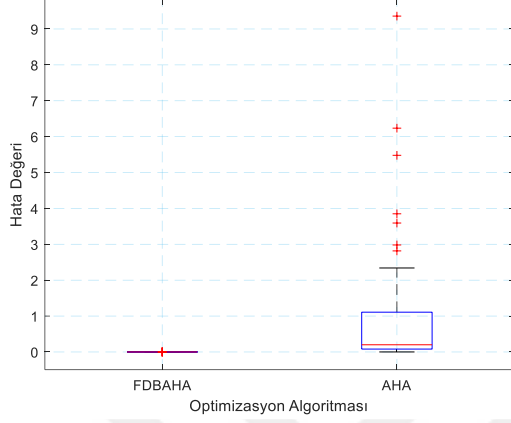
Geliştirilen FDBAHA algoritması ve temel AHA algoritmasının CEC 2020 problemlerindeki hata değerlerinin ortalama ve standart sapması hesaplanarak 30, 50 ve 100 boyut için Tablo 8’de gösterilmiştir. Tablo incelendiğinde FDBAHA algoritmasının 30 ve 100 boyutlarda 10 problemten 1’inde AHA algoritmasından daha kötü ortalama hata değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. 50 boyutta ise FDBAHA algoritması AHA algoritmasından daha kötü sonuç elde ettiği problem bulunmamaktadır. 30 boyutta F8 (birleşik) probleminde ve 100 boyutta F1 (tek modlu) probleminde FDBAHA algoritmasının AHA algoritmasından daha kötü sonuç bulması karmaşık problemlerde FDBAHA algoritmasının biraz daha zayıf performans gösterdiği anlamına gelmektedir. Genellikle çoğu problemde AHA algoritmasından daha iyi ortalamalara sahip olması FDBAHA algoritmasının başarılı bir şekilde geliştirildiğinin kanıtıdır.

Tablo 8. CEC 2020 için ortalama ve standart sapma değerleri

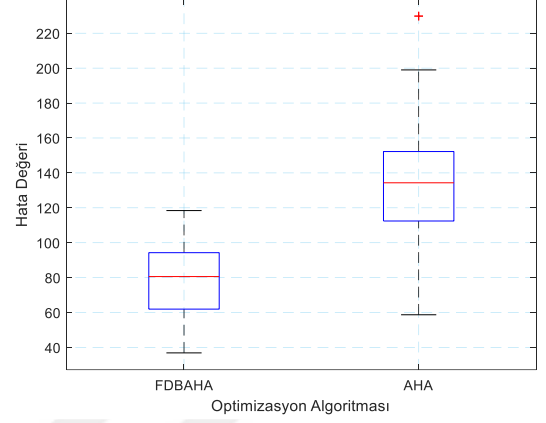
F.	30		50		100	
	AHA	FDBAHA	AHA	FDBAHA	AHA	FDBAHA
F1	4,15E+03 (5,93E+03)	2,97E-04 (2,08E-03)	5,40E+03 (6,45E+03)	5,16E+03 (6,32E+03)	7,57E+03 (7,05E+03)	1,14E+04 (1,44E+04)
F2	2,95E+03 (5,16E+02)	2,46E+03 (5,70E+02)	6,67E+03 (1,13E+03)	4,91E+03 (7,19E+02)	1,37E+04 (1,22E+03)	1,24E+04 (1,23E+03)
F3	2,14E+02 (7,19E+01)	1,42E+02 (3,28E+01)	6,20E+02 (1,92E+02)	3,53E+02 (7,56E+01)	2,01E+03 (3,32E+02)	1,36E+03 (1,85E+02)
F4	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
F5	1,58E+05 (8,94E+04)	3,54E+04 (2,38E+04)	5,40E+05 (2,66E+05)	1,60E+05 (8,16E+04)	2,53E+06 (7,54E+05)	1,34E+06 (4,19E+05)
F6	2,67E+02 (1,49E+02)	1,90E+02 (1,23E+02)	7,52E+02 (2,43E+02)	5,85E+02 (1,90E+02)	2,91E+03 (5,98E+02)	2,42E+03 (5,04E+02)
F7	1,53E+05 (1,35E+05)	3,55E+04 (2,69E+04)	3,74E+05 (1,62E+05)	1,99E+05 (1,10E+05)	2,16E+06 (6,11E+05)	9,92E+05 (4,10E+05)
F8	1,01E+02 (1,75E+00)	2,16E+02 (5,76E+02)	6,64E+03 (1,64E+03)	5,64E+03 (1,11E+03)	1,69E+04 (1,86E+03)	1,38E+04 (1,57E+03)
F9	5,82E+02 (5,32E+01)	5,35E+02 (3,51E+01)	9,14E+02 (8,81E+01)	8,15E+02 (6,89E+01)	1,83E+03 (1,60E+02)	1,68E+03 (1,13E+02)
F10	4,02E+02 (1,92E+01)	3,93E+02 (1,48E+01)	5,79E+02 (2,31E+01)	5,42E+02 (3,70E+01)	7,99E+02 (5,63E+01)	7,82E+02 (6,62E+01)

Şekil 10, 11 ve 12 sırasıyla 30, 50 ve 100 boyutta CEC 2017 problemlerinden seçilmiş tek modlu F3, çok modlu F5, hibrit F18 ve birleşik F27 problemleri için FDBAHA ve AHA algoritmalarının box-plot grafiklerini gösterir. Grafikler incelendiğinde geliştirilen FDBAHA algoritmasının seçilen problemler için tüm boyutlarda temel AHA

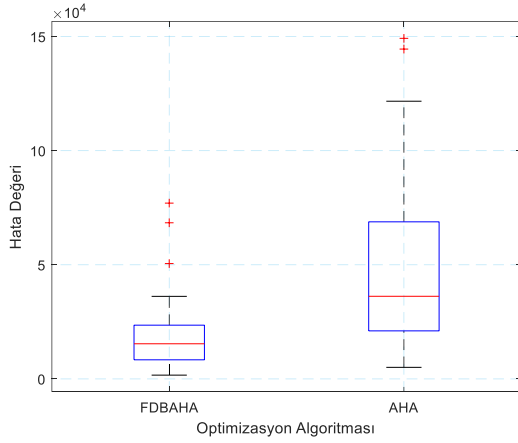
algoritmasından daha düşük ortalamaya sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca FDBAHA algoritmasının maksimum ve minimum değer aralığının her boyutta ve her problemde AHA algoritmasından daha düşük olduğu yine box-plot grafiklerinden gözlemlenmiştir.



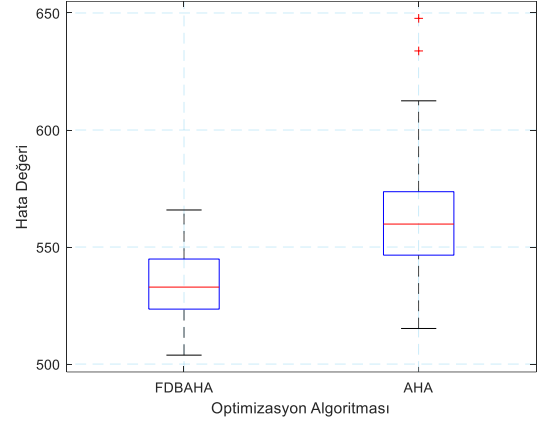
(a) F3 (Tek Modlu)



(b) F5 (Basit Çok Modlu)

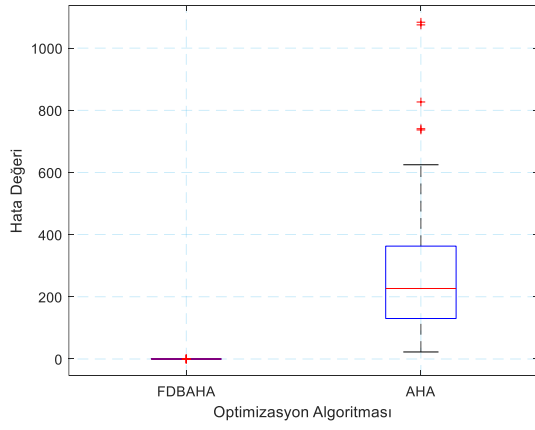


(c) F18 (Hibrit)

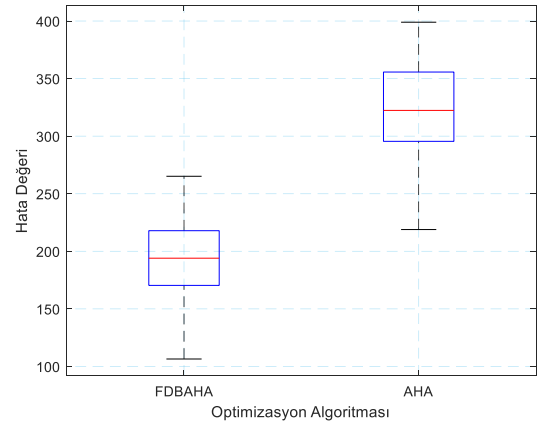


(d) F27 (Birleşik)

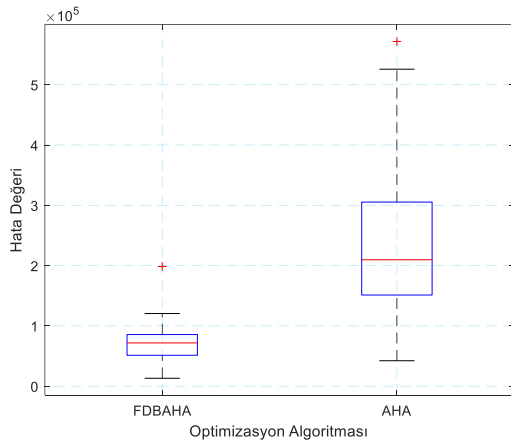
Şekil 10. CEC 2017 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=30)



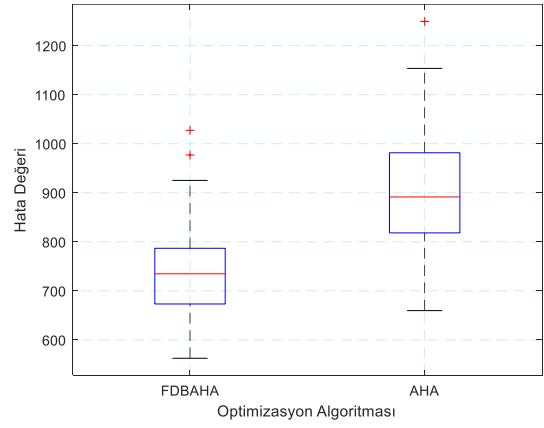
(a) F3 (Tek Modlu)



(b) F5 (Basit Çok Modlu)

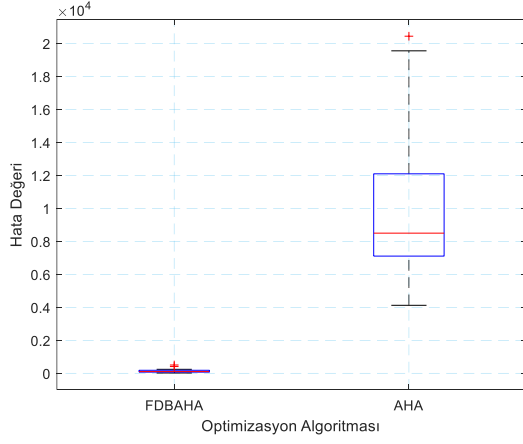


(c) F18 (Hibrit)

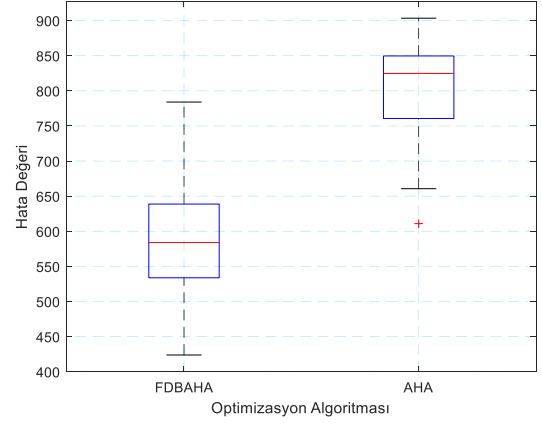


(d) F27 (Birleşik)

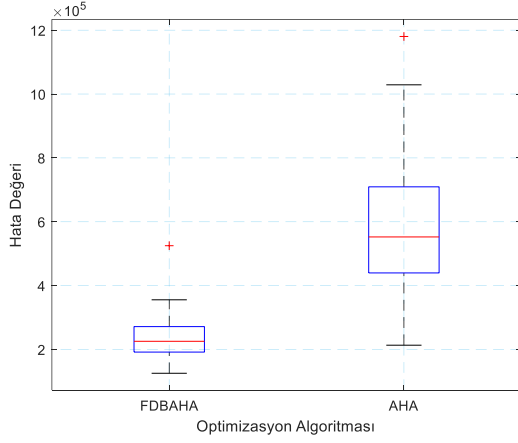
Şekil 11. CEC 2017 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=50)



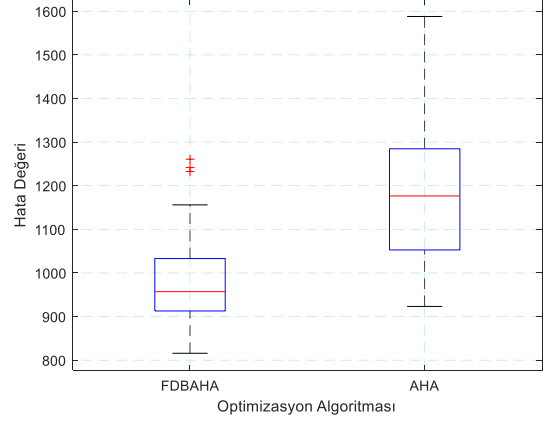
(a) F3 (Tek Modlu)



(b) F5 (Basit Çok Modlu)



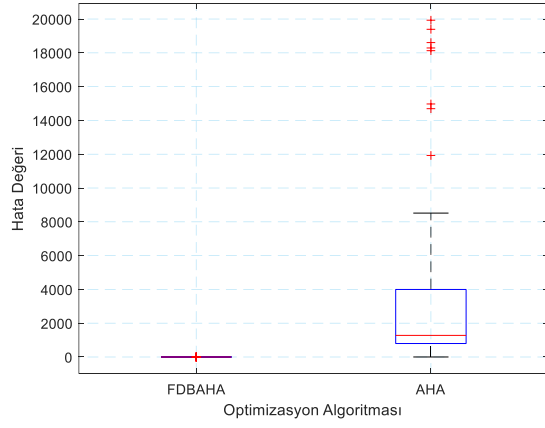
(c) F18 (Hibrit)



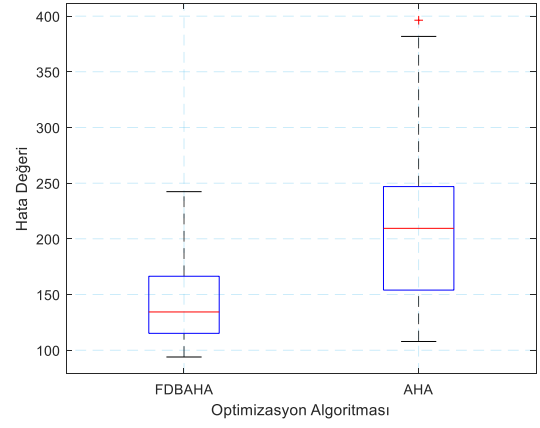
(d) F27 (Birleşik)

Şekil 12. CEC 2017 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=100)

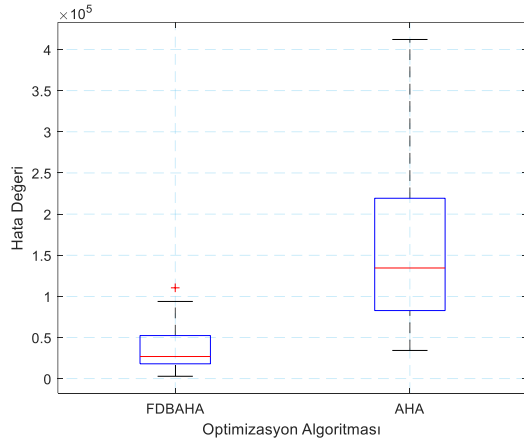
Şekil 13, 14 ve 15 sırasıyla 30, 50 ve 100 boyutta CEC 2020 problemlerinden seçilmiş tek modlu F1, çok modlu F3, hibrit F5 ve birleşik F10 problemleri için FDBAHA ve AHA algoritmalarının box-plot grafiklerini gösterir. Bu grafiklerden geliştirilen FDBAHA algoritmasının genellikle temel AHA algoritmasından başarılı olduğu görülse de boyut değiştikçe algoritmanın daha iyi çözümü bulmakta zorlandığı durumlara da rastlanmıştır.



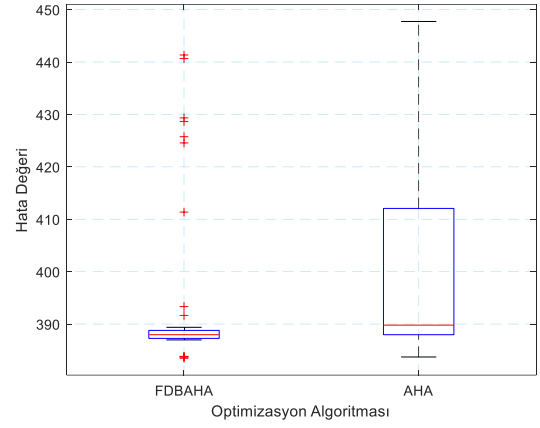
(a) F1 (Tek Modlu)



(b) F3 (Çok Modlu)

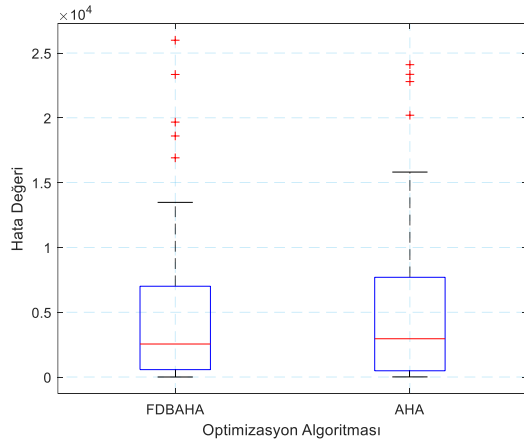


(c) F5 (Hibrit)

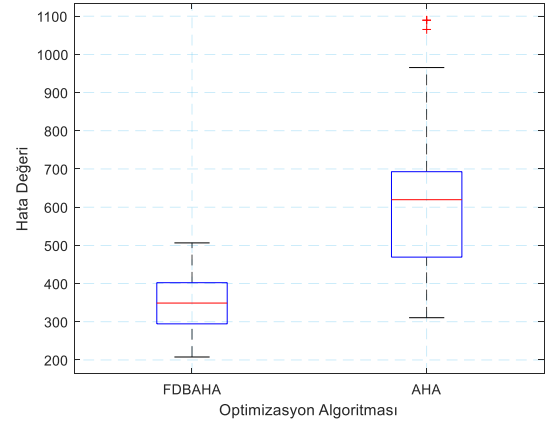


(d) F10 (Birleşik)

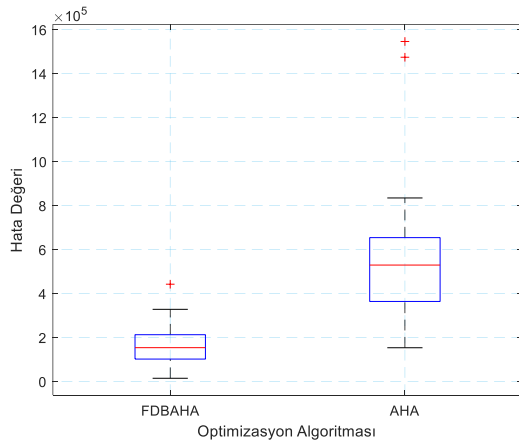
Şekil 13. CEC 2020 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=30)



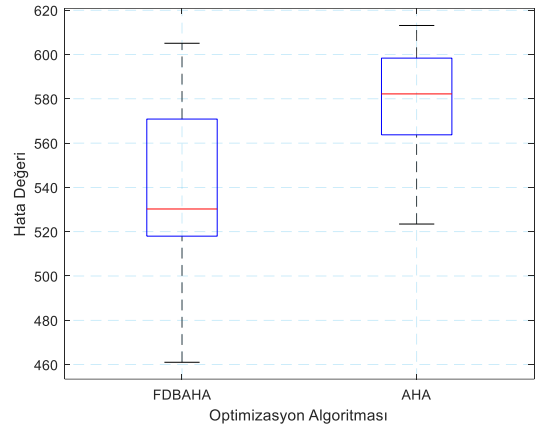
(a) F1 (Tek Modlu)



(b) F3 (Çok Modlu)

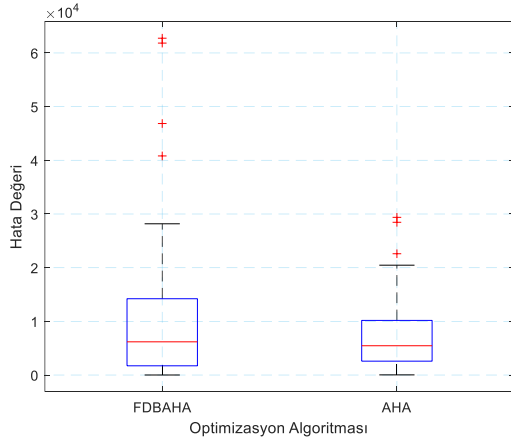


(c) F5 (Hibrit)

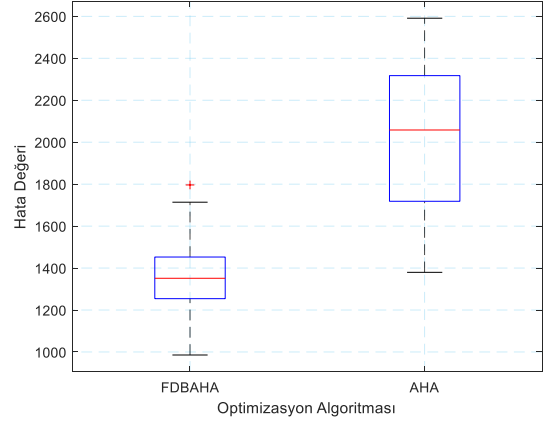


(d) F10 (Birleşik)

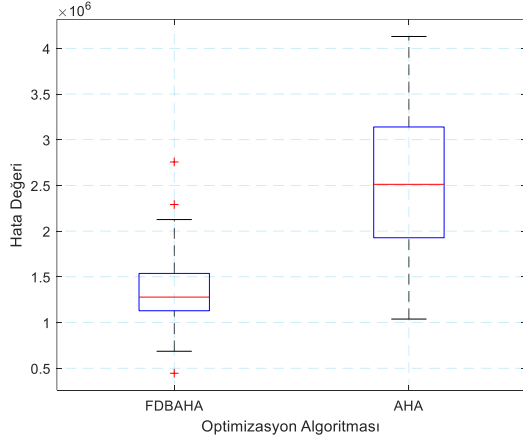
Şekil 14. CEC 2020 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=50)



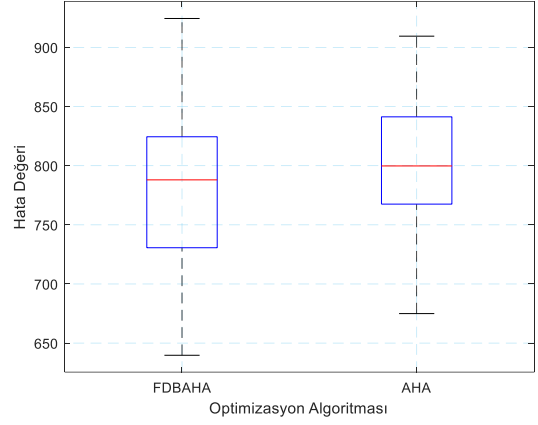
(a) F1 (Tek Modlu)



(b) F3 (Çok Modlu)



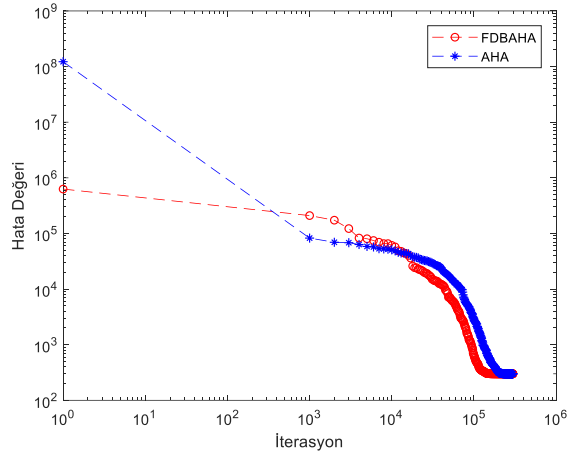
(c) F5 (Hibrit)



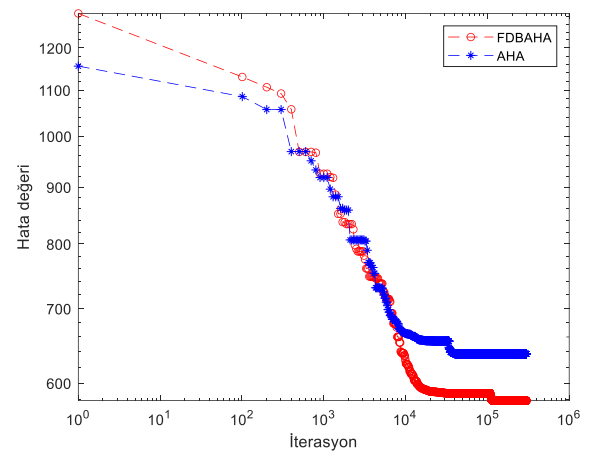
(d) F10 (Birleşik)

Şekil 15. CEC 2020 problemleri için box-plot grafikleri (Boyut=100)

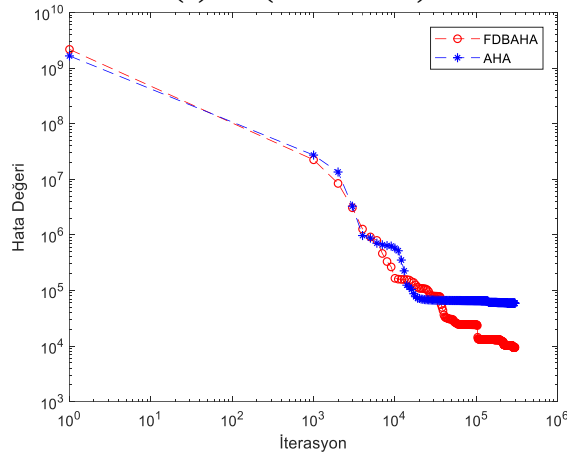
Yakınsama grafikleri optimizasyon süresince algoritmaların en iyi çözüme ne kadar iterasyonda yakınsadığını gösteren grafiklerdir. Bu grafikler sayesinde algoritmaların bir problemi ne kadar az iterasyonda çözdüğünü gözlemleyerek karşılaştırmalar yapılabilir. Yukarıda box-plot grafikleri gösterilen problemlerin çözümünde kullanılan FDBAHA ve AHA algoritmalarının 30, 50 ve 100 boyutta yakınsama grafikleri çizdirilerek Şekil 16, 17 ve 18’de CEC 2017, Şekil 19, 20 ve 21’de ise CEC 2020 problemleri için gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde geliştirilen FDBAHA algoritmasının çoğu problemde ve tüm boyutlarda temel AHA algoritmasından daha erken ve daha iyi yakınsadığı görülmüştür.



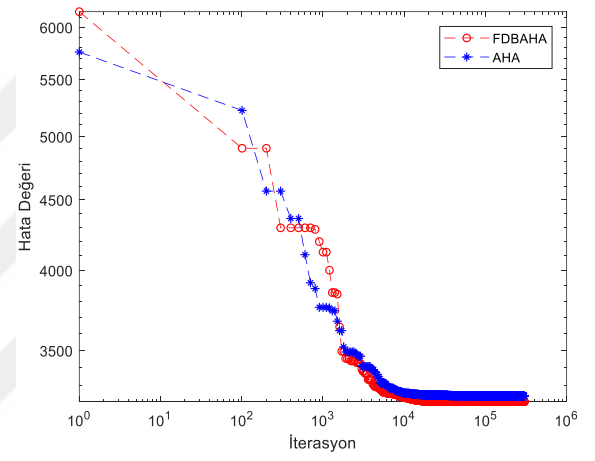
(a) F3 (Tek Modlu)



(b) F5 (Çok Modlu)

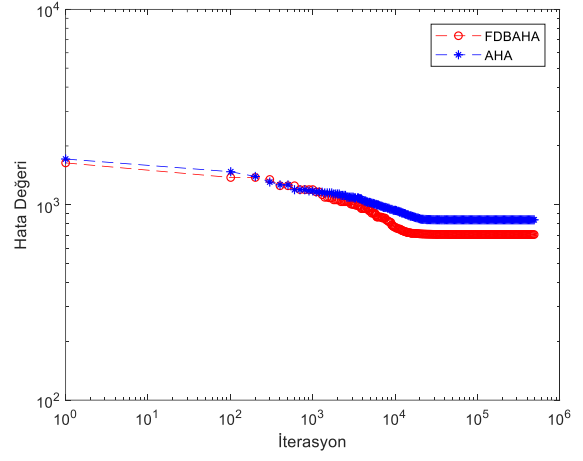
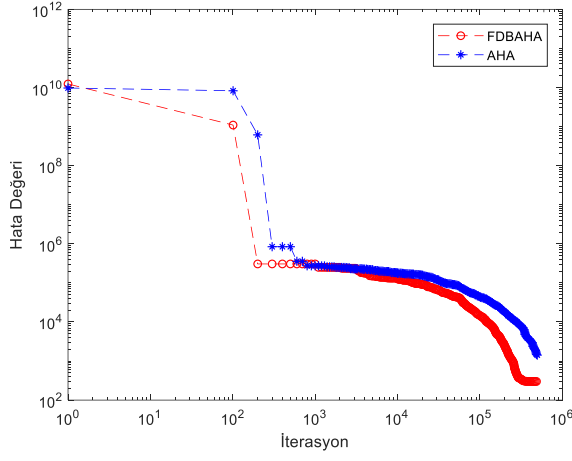


(c) F18 (Hibrit)

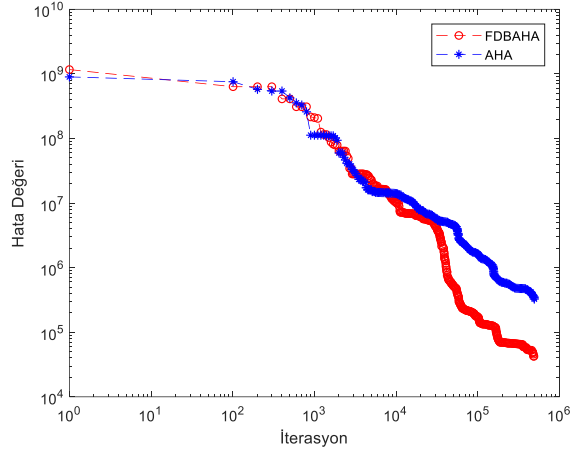


(d) F27 (Birleşik)

Şekil 16. CEC 2017 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=30)

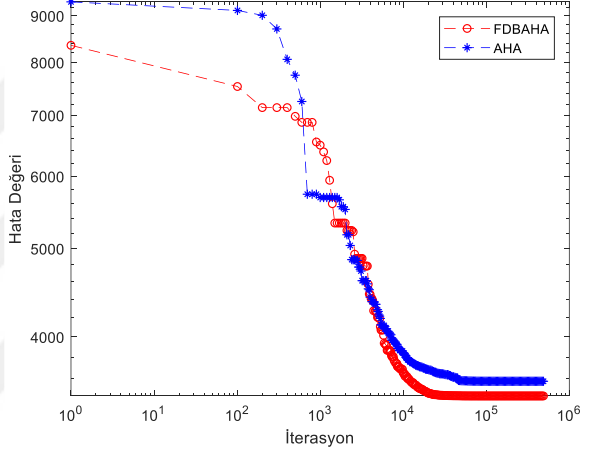


(a) F3 (Tek Modlu)



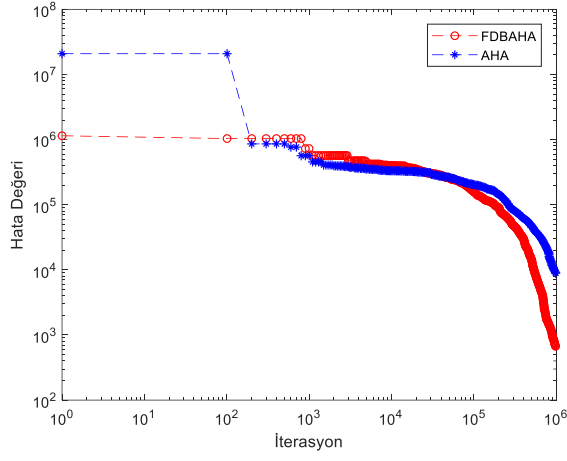
(c) F18 (Hibrit)

(b) F5 (Çok Modlu)

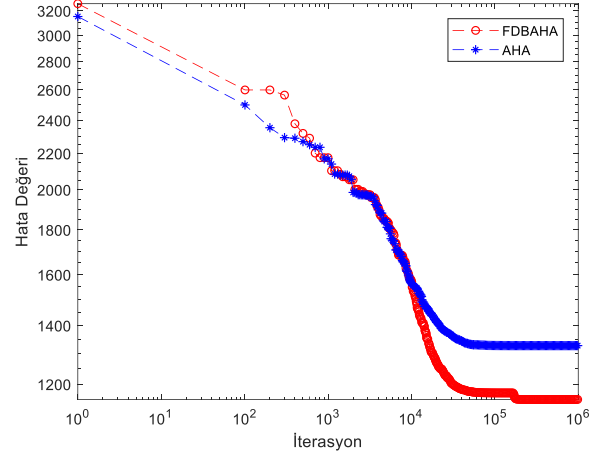


(d) F27 (Birleşik)

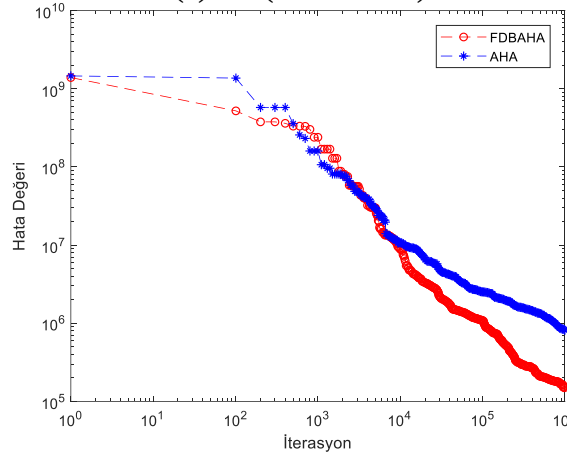
Şekil 17. CEC 2017 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=50)



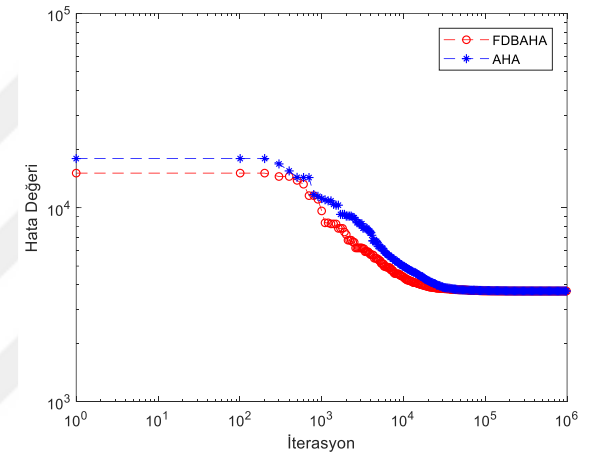
(a) F3 (Tek Modlu)



(b) F5 (Çok Modlu)

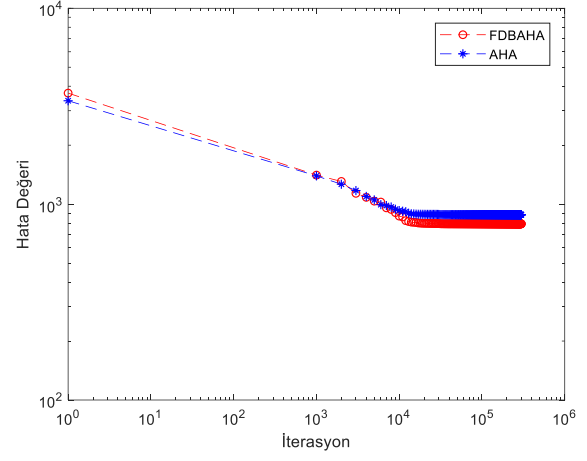
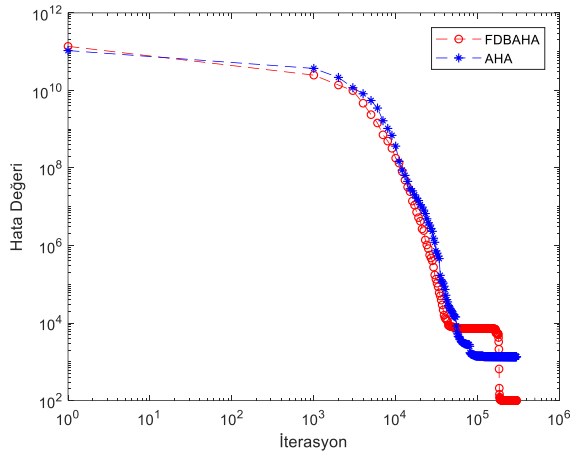


(c) F18 (Hibrit)



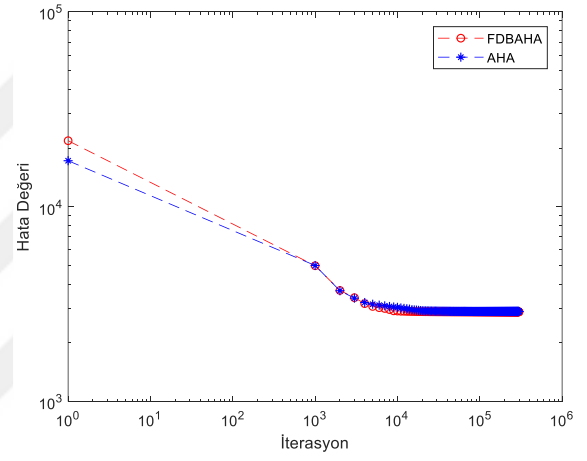
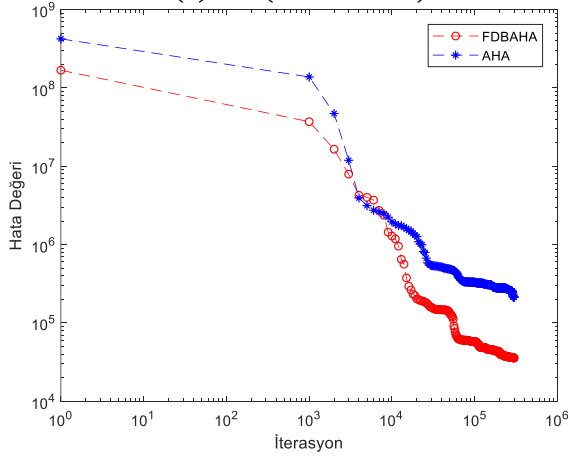
(d) F27 (Birleşik)

Şekil 18. CEC 2017 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=100)



(a) F1 (Tek Modlu)

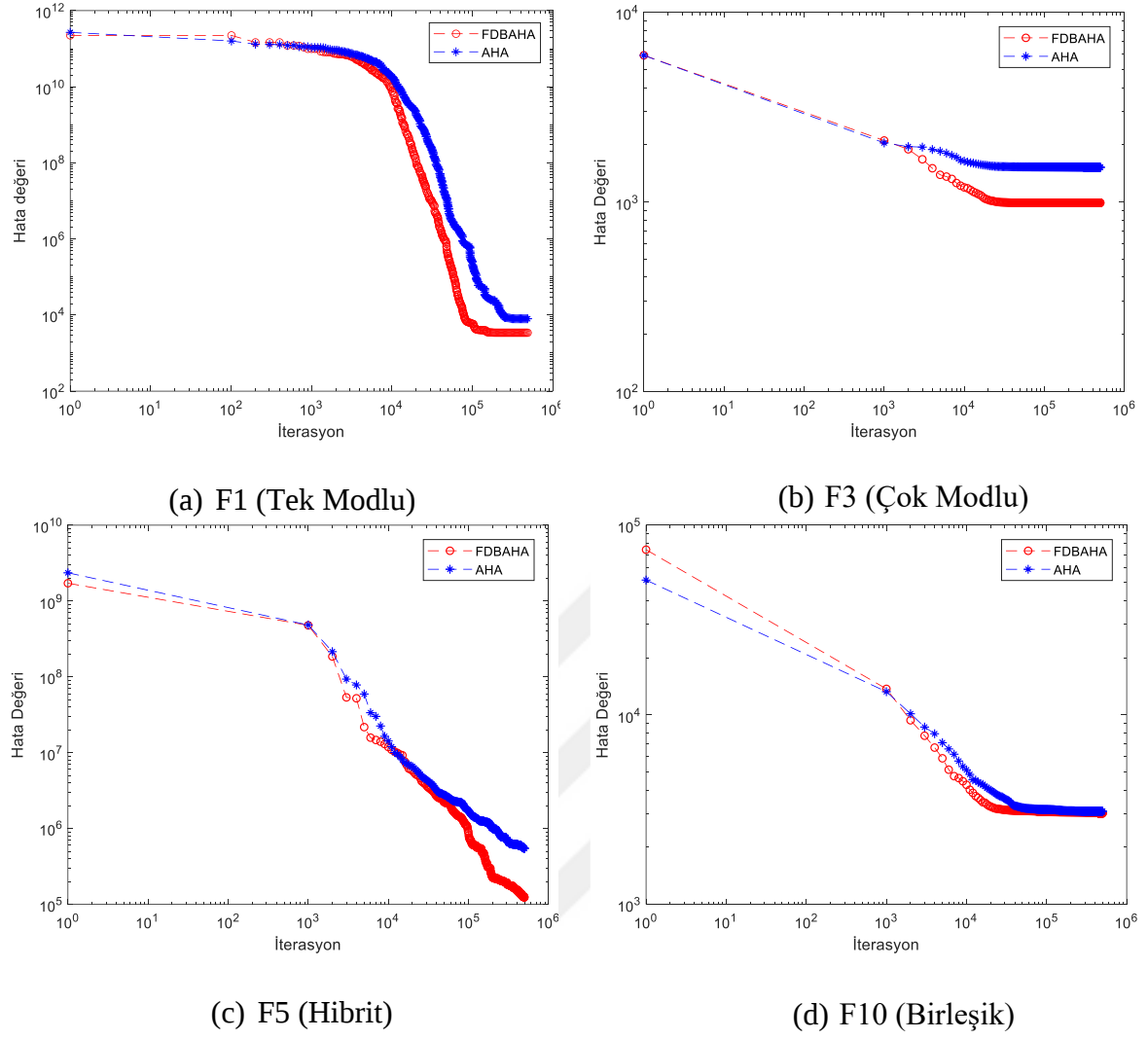
(b) F3 (Çok Modlu)



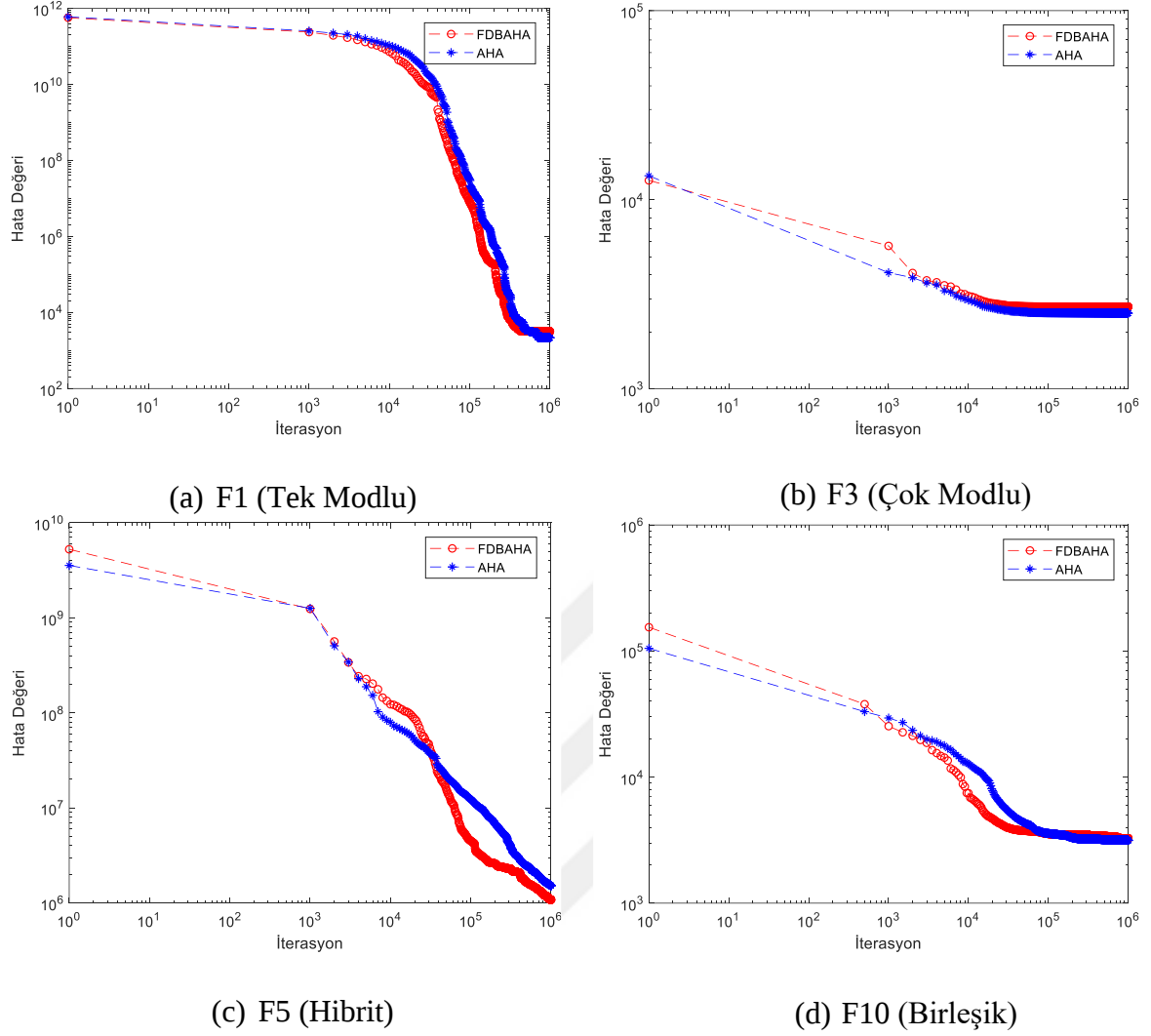
(c) F5 (Hibrit)

(d) F10 (Birleşik)

Şekil 19. CEC 2020 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=30)



Şekil 20. CEC 2020 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=50)



Şekil 21. CEC 2020 problemleri için yakınsama eğrisi grafikleri (Boyut=100)

Son olarak geliştirilen FDBAHA algoritmasının performansı literatürden seçilmiş bazı başarılı algoritmalarla karşılaştırılmıştır. FDBAHA ve rakip olarak seçilen algoritmaların CEC 2017 ve CEC 2020 problemleri için sonuçları 30, 50 ve 100 boyut, eşit iterasyon ve 51 bağımsız çalışma neticesinde elde edilerek Friedman ve Wilcoxon analizleri uygulanmıştır.

Tablo 9 FDBAHA ve rakip olarak seçilen algoritmaların Friedman analizine göre problemlerde tuttuğu sıralamaların ortalama değerlerini gösterir. Tabloda ortalama olarak sıralamada lider olan algoritmaların sıralama değerleri kalınlaştırılarak gösterilmiştir. Buna göre tablo incelendiğinde geliştirilen FDBAHA algoritmasının CEC 2017 ve CEC 2020 problemlerinde biri dışında bütün boyutlarda lider olduğu görülmüştür. CEC 2017 problemlerinde 50 boyutta PO algoritmasının birinci, FDBAHA algoritmasının ise ikinci olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca AHA algoritmasının ortalama sıra değerlerine göre 12

algoritmadan 9'cu olduğu ve FDBAHA versiyonunun 8 algoritmayı geride bırakarak lider olması yapılan geliştirme çalışmasının başarısını ortaya koymuştur.

Tablo 9. FDBAHA ve rakip algoritmalar için Friedman testi ile elde edilen sıralamalar

Algoritma	Boyut=30		Boyut=50		Boyut=100		Ortalama sıra
	CEC 2017	CEC 2020	CEC 2017	CEC 2020	CEC 2017	CEC 2020	
FDBAHA	5,30	4,84	5,20	5,17	4,68	5,09	5,05
HS	5,35	7,37	6,07	8,07	7,68	8,42	7,16
JS	5,51	5,65	5,57	5,60	6,02	6,14	5,75
CGO	5,69	5,05	5,74	5,18	5,72	5,59	5,50
TLBO	5,89	6,41	6,14	5,94	6,74	6,48	6,27
PO	6,06	5,49	5,47	5,15	5,69	5,35	5,54
ARO	6,33	6,02	6,12	5,80	5,78	5,87	5,99
MA	7,18	6,74	7,25	6,46	6,64	5,94	6,70
MRFO	7,19	6,30	7,15	6,48	6,43	6,00	6,59
AHA	7,25	7,05	7,01	7,38	6,64	6,73	7,01
DE	7,61	8,69	8,11	9,02	7,82	7,32	8,10
GWO	8,62	8,39	8,16	7,75	8,15	9,08	8,36

Tablo 10'da FDBAHA ve rakip algoritmaların Wilcoxon analizi sonucunda elde edilen ikili karşılaştırma sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 10. FDBAHA ve rakip algoritmalar için Wilcoxon testi ile elde edilen ikili karşılaştırma sonuçları

vs. FDBAHA +/-/-	Boyut=30		Boyut=50		Boyut=100	
	CEC 2017	CEC 2020	CEC 2017	CEC 2020	CEC 2017	CEC 2020
ARO	1/12/16	0/5/5	2/11/16	1/5/4	0/12/17	0/5/5
CGO	11/6/12	2/5/3	8/11/10	3/4/3	7/7/15	3/3/4
DE	6/5/18	1/2/7	5/3/21	1/2/7	7/5/17	2/3/5
GWO	4/5/20	0/3/7	5/4/20	1/3/6	3/5/21	1/1/8
HS	13/7/9	2/2/6	9/6/14	1/1/8	7/2/20	2/1/7
JS	10/10/9	3/3/4	10/6/13	6/2/2	6/9/14	2/5/3
PO	13/4/12	3/4/3	12/6/11	4/2/4	12/7/10	3/4/3
TLBO	6/13/10	1/4/5	6/9/14	2/7/1	3/9/17	2/4/4
MA	5/6/18	2/2/6	4/6/19	3/1/6	5/7/17	2/3/5
MRFO	2/10/17	1/4/5	3/9/17	1/5/4	4/11/14	2/3/5

Tabloda FDBAHA algoritmasının üstün olduğu sonuçlar kalınlaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre geliştirilen FDBAHA algoritmasının PO algoritması dışında tüm algoritmalarla karşı üstünlüğü gözlemlenmiştir. PO algoritması çok fark olmasa da FDBAHA algoritmasından iyi performans göstermiştir. Örneğin CEC 2020 problemleri için 30 boyutta 3 galibiyet, 4 beraberlik ve 3 yenilgi, 50 boyutta 4 galibiyet, 2 beraberlik ve

4 yenilgi, 100 boyutta ise yine 3 galibiyet, 4 beraberlik ve 3 yenilgi olmakla FDBAHA ve PO algoritması arasında beraberlik gözlemlenmiştir. CEC 2017 problemlerinde ise tüm boyutlarda PO algoritmasının FDBAHA algoritmasına galip geldiği problem sayısı yenildiği problem sayısından bir fazladır.

3.2. Kontrol Sistemleri Probleminin Sonuçları

Bu tez çalışmasında kontrol sistemleri problemi olarak yük frekans kontrolü problemi ele alınmıştır. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi, iki alanlı çok kaynaklı güç sistemi ve FV-Termal güç sistemi olmak üzere üç farklı güç sisteminin yük frekans kontrolü MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Her bir sistem için üç farklı denetleyicinin tasarımı geliştirilen FDBAHA ile optimize edilmiştir.

Aşağıdaki alt başlıklarda incelenen güç sistemleri için tasarlanan denetleyici parametreleri ve yapılan analizlerin sonuçları açıklanmıştır.

3.2.1. İki Alanlı Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi Sonuçları

İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde yük frekans kontrolü için PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerinin parametre değerleri FDBAHA algoritması ile tasarlanmış ve 10 bağımsız çalışma sonucunda en iyi amaç fonksiyonu değerinin bulunduğu denetleyici parametreleri Tablo 11’de verilmiştir. Denetleyici parametreleri $t = 0$ s’de 1. alana %10 yük uygulanarak tasarlanmıştır.

Tablo 11. Alan-1 %10 yük altındayken iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi için tasarlanan en iyi denetleyici parametreleri

Denetleyici tipi	K_{P1}	K_{P2}	K_I	K_D	λ	μ
PID	1,0963	-	1,9999	0,4002	-	-
FOPID	2,2059	-	2,9999	0,5980	0,9999	1,0563
FOPI-FOPD	2,2992	2,9999	2,9999	0,4764	0,9991	1,1990

İncelenen iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde her iki alanın parametre değerleri birbirine eşit kabul edilmiştir. Ayrıca her iki alan için tasarlanan denetleyiciler aynı parametre değerlerine sahiptir. Bu güç sisteminde PID denetleyicisi için K_P , K_I , K_D

parametreleri $[0, 3]$, FOPID denetleyicisi için K_P, K_I, K_D parametreleri $[0, 3]$ ve λ, μ parametreleri $[0, 1,5]$ ve son olarak FOPI-FOPD denetleyicisi için K_{P1}, K_{P2}, K_I, K_D parametreleri $[0, 3]$ ve λ, μ parametreleri $[0, 1,5]$ değer aralığında tasarlanmıştır.

Önerilen FDBAHA algoritması ile iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi için tasarlanan denetleyicilerin performansları zaman bölgesi analizi, gürbüzlük analizi ve bozucu yük analizi yapılarak değerlendirilmiştir.

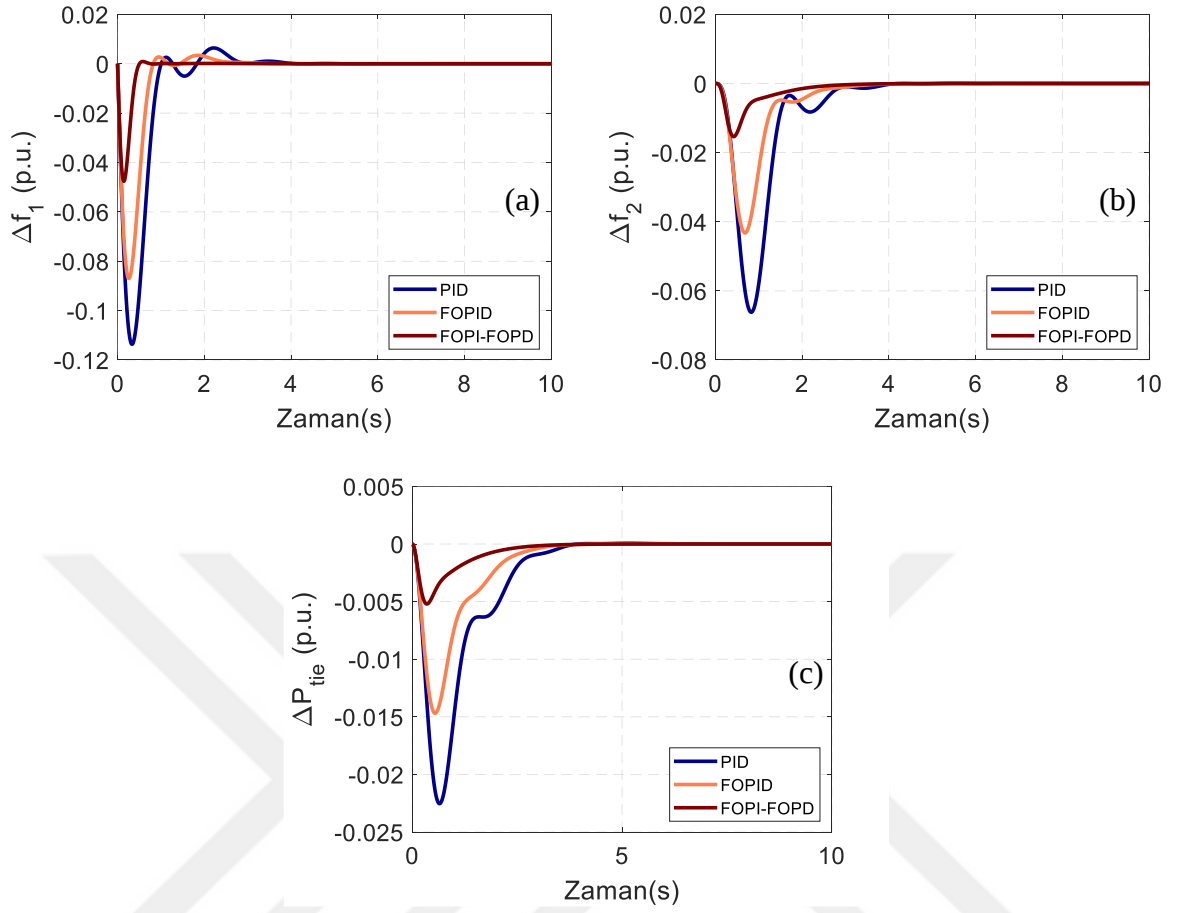
- Zaman Bölgesi Analizi Sonuçları

İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi için önerilen FDBAHA algoritması ile üç ayrı denetleyici tasarlanmış ve zaman bölgesi analizi yapılarak performansları gözlemlenmiştir. Tablo 12’de görüldüğü üzere FOPI-FOPD denetleyicisi bu üç denetleyici arasında en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip denetleyicidir. Ayrıca denetleyicilerin performansı literatürden seçilmiş aynı sistem parametrelerine sahip bazı çalışmalarla karşılaştırılmıştır. FDBAHA algoritması ile tasarlanan FOPI-FOPD denetleyicisinin diğer çalışmalara karşı üstün performansı yine tabloda birinci alan frekans değişimi (Δf_1), ikinci alan frekans değişimi (Δf_2) ve bağlantı hattı güç değişimi (ΔP_{tie}) yerleşme süreleri incelenerek gözlemlenebilir.

Tablo 12. Alan-1 %10 yük altındayken iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi için zaman bölgesi analizi sonuçları

Denetleyici	ITAE	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
HSCOA: PID (Gheisarnejad, 2018)	0,1247	2,36	2,75	2,42
PSO: PID (Kumar Sahu vd., 2016)	0,4854	5,30	6,41	5,03
GA: PID (Kumar Sahu vd., 2016)	0,4967	6,93	6,74	4,87
TLBO: PID (R. K. Sahu vd., 2016)	0,2452	4,84	5,13	3,03
FDBAHA: PID	0,1305	2,65	2,75	2,48
FDBAHA: FOPID	0,0684	2,17	2,42	2,04
FDBAHA: FOPI-FOPD	0,0190	0,45	1,77	1,09

Tasarlanan denetleyicilerin performanslarını daha iyi kıyaslayabilmek için Şekil 22’de zamana göre $\Delta f_1, \Delta f_2$ ve ΔP_{tie} eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 22. Alan-1 %10 yük altındayken iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri

- Gürbüzlük Analizi Sonuçları

Güç sistemlerinde frekans ve bağlantı hattı güç değişimini, sistemdeki ani yük artışının yansira sistem dinamiklerinin değişimi de etkiler. Bu yüzden bir sistemde YFK için tasarlanan denetleyici, sistem kararlılığını etkileyen dış faktörlere veya sistemin parametre değerlerindeki değişime karşı yeterli esnekliğe sahip olmalıdır. Bu çalışmada da iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde YFK için tasarlanan denetleyicilerin sistemdeki ani parametre değişimleri durumunda dayanıklılıklarını ölçmek için gürbüzlük analizi yapılmıştır. Analiz sırasında sistemin T_g , T_t , T_{12} , B ve R parametre değerlerinde $\pm 25\%$ ve $\pm 50\%$ oranında oynama yapılmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Buna göre sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişiminin yerleşme süresi ve alt aşım değerleri PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicileri için sırasıyla Tablo 13, 14 ve 15'te gösterilmiştir. Tablolar incelendiğinde denetleyicilerin performansını en çok etkileyenin, B parametresi

olduğu görülür. Genel olarak değerleri değiştirilen tüm parametreler performansı etkilese de sistem kararsızlığı söz konusu değildir.

Tablo 13. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları

Parametreler	Değişim oranı	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)			Alt aşım (p.u.)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
Nominal	-	2,65	2,75	2,48	-0,1136	-0,0662	-0,0225
T_g	+50%	3,72	3,74	2,38	-0,1241	-0,0756	-0,0247
	+25%	2,6	3,54	2,42	-0,1191	-0,0708	-0,0236
	-25%	2,73	2,84	2,54	-0,1080	-0,0619	-0,0216
	-50%	2,81	2,90	2,58	-0,1022	-0,0581	-0,0208
T_t	+50%	4,85	5,39	2,53	-0,1326	-0,0871	-0,0276
	+25%	3,87	3,87	2,47	-0,1237	-0,0768	-0,0252
	-25%	2,59	2,94	2,60	-0,1019	-0,0553	-0,0198
	-50%	1,74	2,98	2,65	-0,0878	-0,0450	-0,0173
T_{12}	+50%	3,17	3,23	2,13	-0,1075	-0,0780	-0,0271
	+25%	2,42	3,25	2,29	-0,1104	-0,0728	-0,0250
	-25%	3,00	3,15	2,72	-0,1174	-0,0575	-0,0195
	-50%	3,74	3,82	3,11	-0,1217	-0,0458	-0,0155
B	+50%	3,03	2,58	2,79	-0,0955	-0,0418	-0,0184
	+25%	2,85	2,68	2,64	-0,1037	-0,0520	-0,0203
	-25%	3,25	3,84	2,42	-0,1260	-0,0864	-0,0252
	-50%	5,98	5,39	2,95	-0,1416	-0,1163	-0,0286
R	+50%	3,03	2,12	2,53	-0,1171	-0,0751	-0,0238
	+25%	2,88	2,62	2,50	-0,1157	-0,0713	-0,0233
	-25%	2,33	3,54	2,53	-0,1106	-0,0590	-0,0214
	-50%	2,64	4,20	2,87	-0,1054	-0,0480	-0,0195

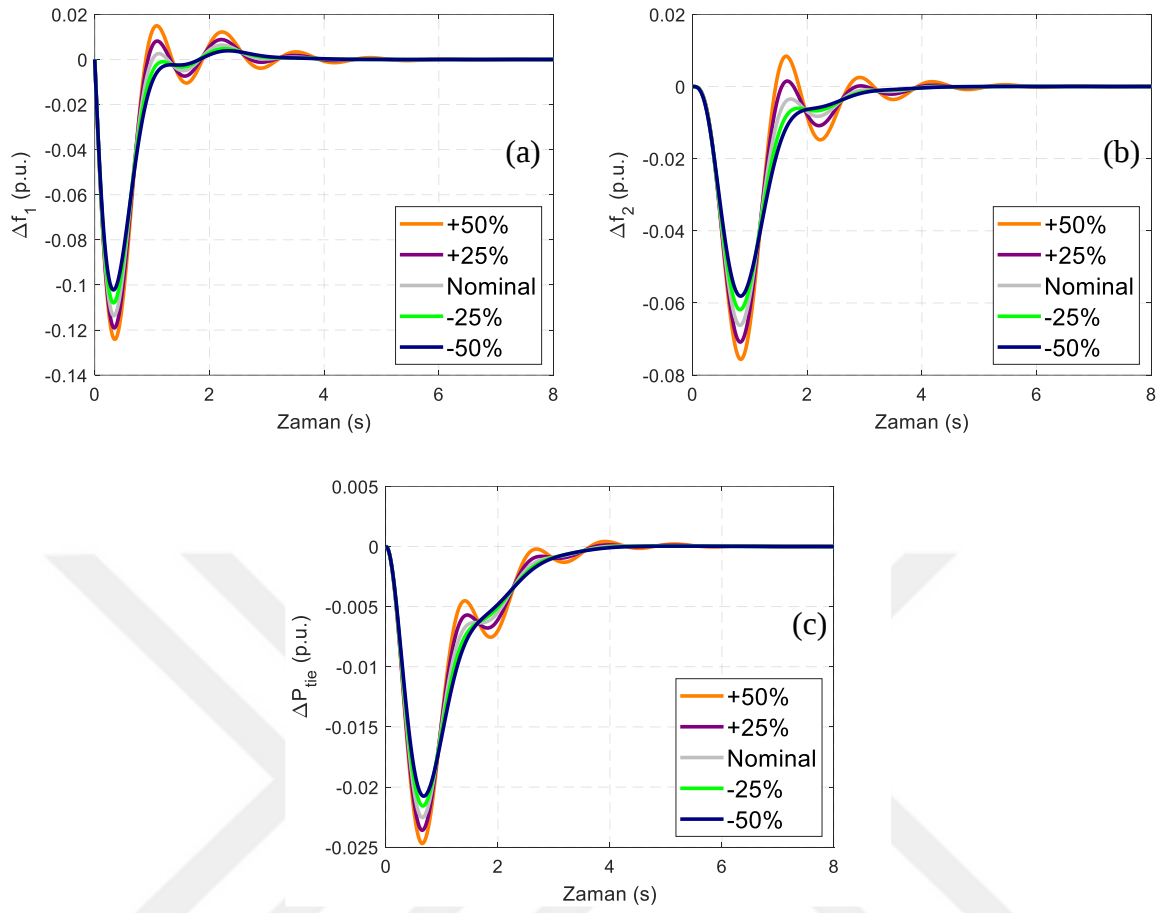
Tablo 14. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları

Parametreler	Değişim oranı	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)			Alt aşım (p.u.)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
Nominal	-	2,17	2,42	2,04	-0,0869	-0,0432	-0,0147
T_g	+50%	2,16	2,97	1,98	-0,0971	-0,0508	-0,0165
	+25%	2,15	2,31	2,00	-0,0922	-0,0470	-0,0156
	-25%	2,19	2,47	2,06	-0,0814	-0,0399	-0,0139
	-50%	2,18	2,49	2,07	-0,0757	-0,0371	-0,0133
T_t	+50%	3,50	3,43	2,13	-0,1039	-0,0589	-0,0188
	+25%	2,3	2,43	2,06	-0,0959	-0,0512	-0,0168
	-25%	1,23	2,52	2,09	-0,0766	-0,0352	-0,0126
	-50%	1,35	2,57	2,14	-0,0643	-0,0280	-0,0108
T_{12}	+50%	1,87	1,99	1,80	-0,0833	-0,0525	-0,0180
	+25%	2,00	2,17	1,91	-0,0850	-0,0483	-0,0165
	-25%	2,46	2,75	2,21	-0,0891	-0,0369	-0,0125
	-50%	3,04	3,26	2,49	-0,0916	-0,0287	-0,0098
B	+50%	2,34	2,31	2,23	-0,0708	-0,0245	-0,0114
	+25%	2,26	2,37	2,13	-0,0779	-0,0320	-0,0128
	-25%	2,21	2,43	2,02	-0,0989	-0,0608	-0,0170
	-50%	4,13	4,61	2,08	-0,1151	-0,0901	-0,0201
R	+50%	2,44	1,50	2,01	-0,0884	-0,0470	-0,0152
	+25%	2,33	2,24	2,02	-0,0878	-0,0454	-0,0150
	-25%	1,93	2,80	2,07	-0,0856	-0,0400	-0,0142
	-50%	1,44	3,13	2,23	-0,0832	-0,0347	-0,0132

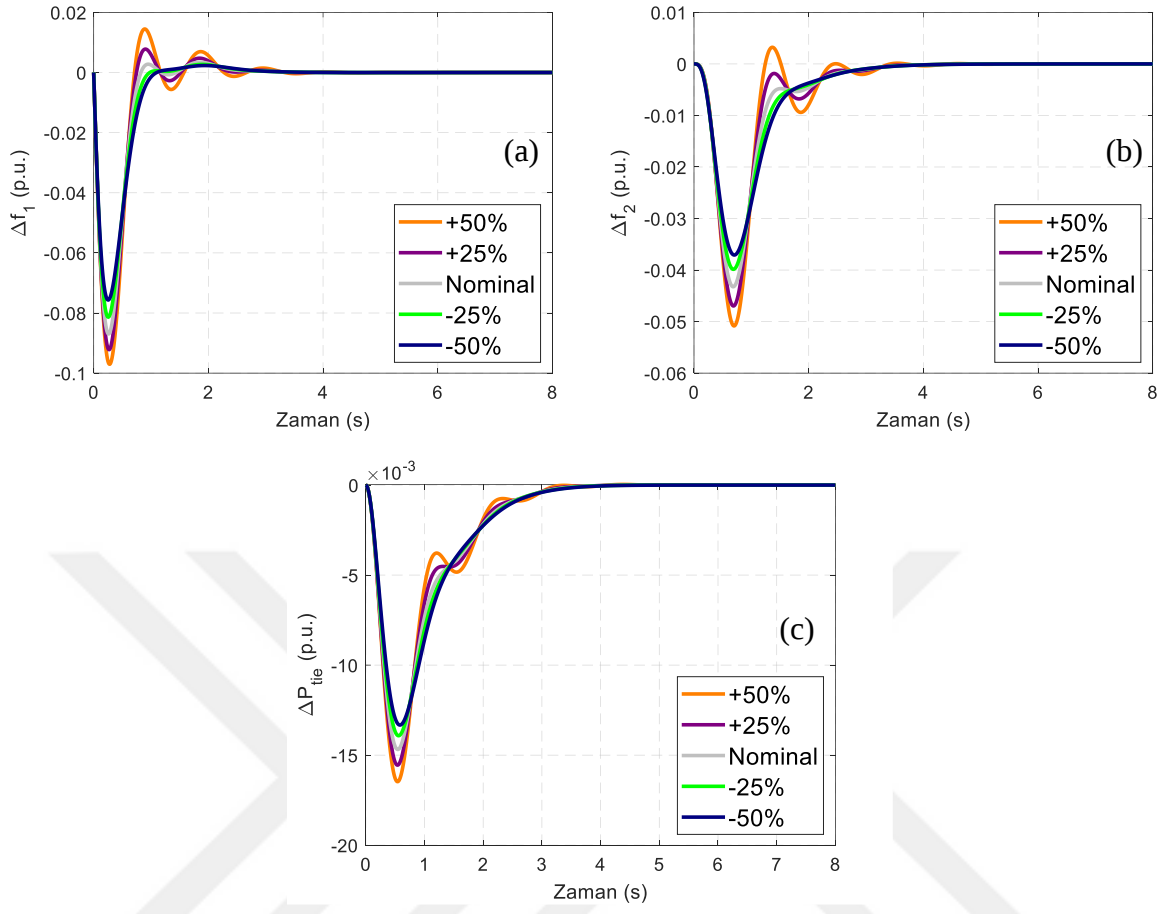
Tablo 15. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları

Parametreler	Değişim oranı	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)			Alt aşım (p.u.)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
Nominal	-	0,45	1,77	1,09	-0,0476	-0,0154	-0,0052
T_g	+50%	0,98	1,53	1,14	-0,0556	-0,0195	-0,0062
	+25%	0,66	1,76	1,10	-0,0518	-0,0174	-0,0057
	-25%	0,56	1,79	1,10	-0,0430	-0,0136	-0,0048
	-50%	0,62	1,80	1,12	-0,0379	-0,0124	-0,0046
T_t	+50%	0,89	1,68	0,76	-0,0590	-0,0224	-0,0072
	+25%	0,81	1,68	0,98	-0,0536	-0,0189	-0,0062
	-25%	0,73	1,85	1,17	-0,0409	-0,0119	-0,0042
	-50%	0,91	1,94	1,25	-0,0330	-0,0091	-0,0037
T_{12}	+50%	0,78	1,59	1,02	-0,0465	-0,0199	-0,0067
	+25%	0,42	1,66	1,05	-0,0471	-0,0178	-0,0060
	-25%	0,50	1,93	1,16	-0,0482	-0,0126	-0,0043
	-50%	0,58	2,20	1,19	-0,0489	-0,0093	-0,0032
B	+50%	0,58	1,58	1,17	-0,0375	-0,0074	-0,0037
	+25%	0,51	1,68	1,14	-0,0418	-0,0104	-0,0043
	-25%	1,05	1,85	0,92	-0,0559	-0,0245	-0,0065
	-50%	2,06	2,46	1,36	-0,0686	-0,0435	-0,0083
R	+50%	0,47	1,71	1,06	-0,0478	-0,0158	-0,0053
	+25%	0,46	1,74	1,08	-0,0477	-0,0156	-0,0052
	-25%	0,44	1,82	1,12	-0,0474	-0,0150	-0,0051
	-50%	0,42	1,92	1,16	-0,0471	-0,0142	-0,0050

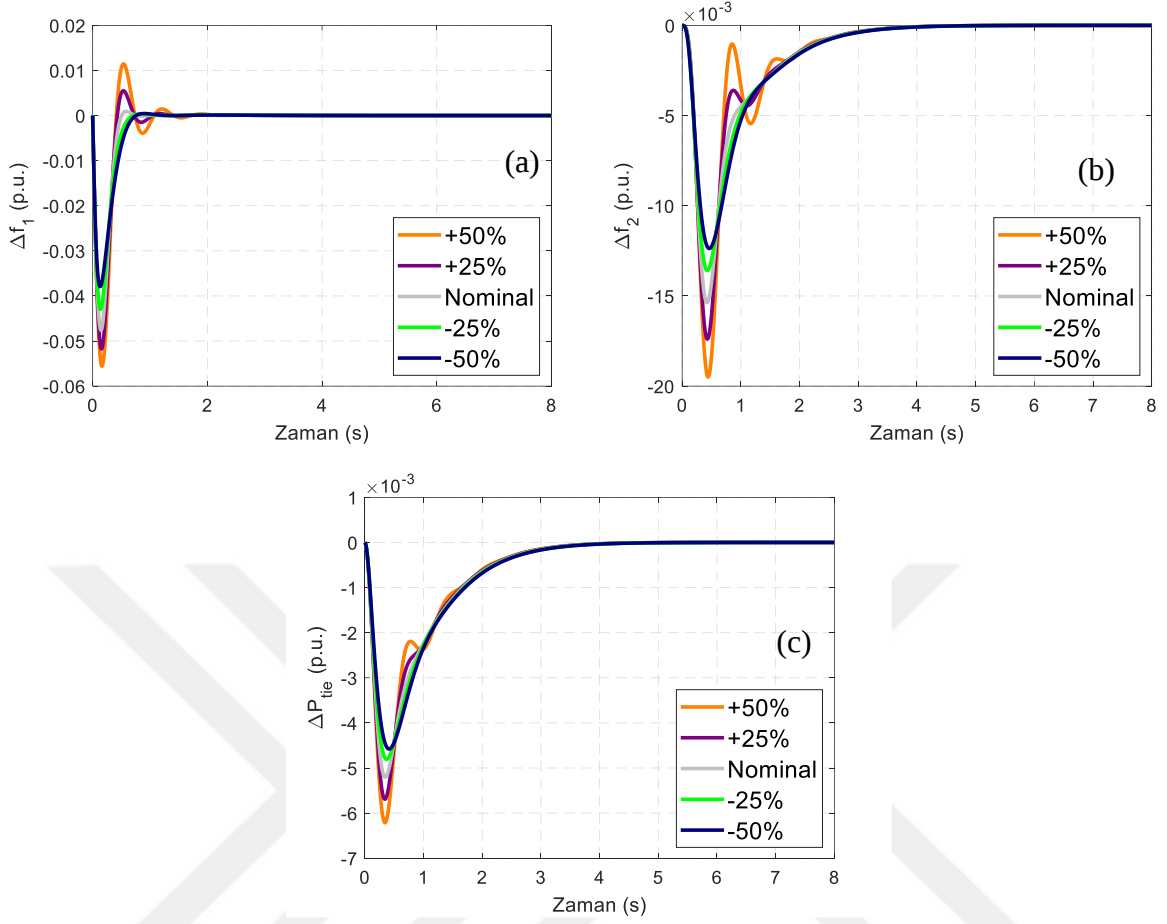
Şekil 23, 24 ve 25 sırasıyla PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerinin iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde T_g parametresinin farklı oranlardaki değişimi ile elde edilen Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} eğrilerini göstermektedir. Şekiller incelendiğinde FDBAHA algoritması ile tasarlanan denetleyicilerin her birinin sistemdeki dinamik farklılıklar karşısında son derece iyi sonuç verdikleri görülmüştür.



Şekil 23. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin T_g parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri



Şekil 24. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin T_g parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri

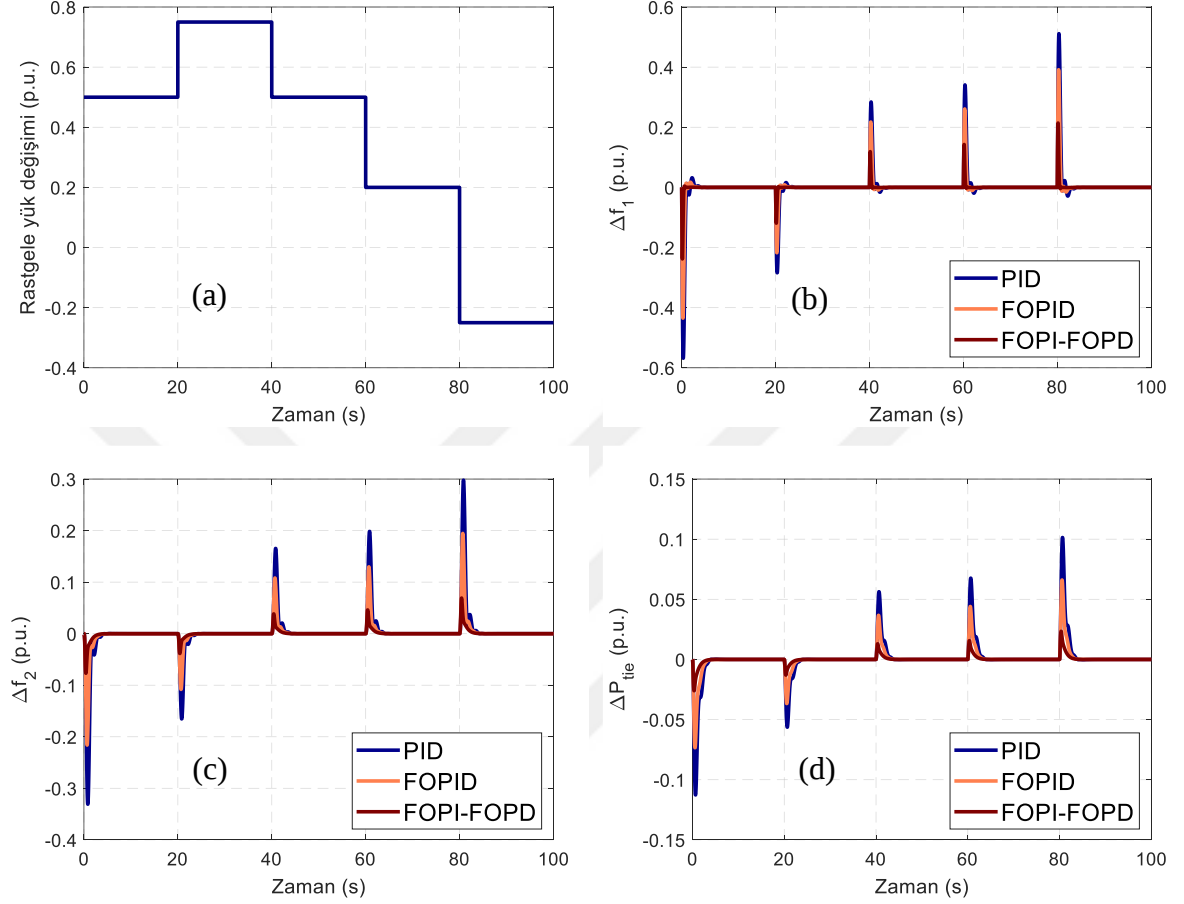


Şekil 25. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminin T_g parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri

- Bozucu Yük Analizi Sonuçları

İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde YFK için, geliştirilen FDBAHA algoritması ile tasarlanan denetleyicilerin dayanıklılığı ve sürekliliği son olarak bozucu yük analizi ile test edilmiştir. Buna göre sisteme Şekil 26 (a)'da gösterilen bozucu yük sinyali uygulanmış ve sistem tepkileri gözlemlenmiştir. Uygulanan farklı oranlardaki bozucu yük sonucunda güç sisteminin birinci alandaki frekansı, ikinci alandaki frekansı ve bağlantı hattı güç değişimleri her bir denetleyici için sırasıyla Şekil 26 (b), (c) ve (d)'de gösterilmiştir. Geliştirilen FDBAHA algoritması ile tasarlanan PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerinin uygulanan farklı değerlerdeki bozucu yük karşısında sistem kararlılığını korudukları ve FDBAHA algoritmasının başarılı bir optimizasyon gerçekleştirdiği bu analiz sonucunda da gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı bozucu yük

değerleri uygulandığında FOPI-FOPD denetleyicisinin PID ve FOPID denetleyicilerine göre daha az aşım ve yerleşme zamanına sahip olduğu şekilden anlaşılmaktadır.



Şekil 26. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemine uygulanan (a) rastgele yük değişimi ve bu yük sonucunda elde edilen (b) Δf_1 , (c) Δf_2 ve (d) ΔP_{tie} eğrileri

3.2.2. İki Alanlı Çok Kaynaklı Güç Sistemi Sonuçları

İki alanlı çok kaynaklı güç sisteminde yük frekans kontrolü için PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerinin parametre değerleri FDBAHA algoritması ile tasarlanmış ve 10 bağımsız çalışma sonucunda en iyi amaç fonksiyonu değerinin bulunduğu denetleyici parametreleri Tablo 16'da verilmiştir. Denetleyici parametreleri $t = 0$ s'de 1. alana %1 yük uygulanarak tasarlanmıştır.

İki alanlı çok kaynaklı güç sisteminde her alanda termal, hidro ve gaz olmak üzere üç kaynak bulunur. Her bir güç kaynağı için farklı denetleyici tasarımı yapılmıştır ve sistemde

iki alan birbirine eşit kabul edilmiştir. Bu güç sisteminde PID denetleyicisi için K_P , K_I , K_D parametreleri $[-2, 2]$, FOPID denetleyicisi için K_P , K_I , K_D parametreleri $[-2, 2]$ ve λ , μ parametreleri $[0, 1,5]$ ve son olarak FOPI-FOPD denetleyicisi için K_{P1} , K_{P2} , K_I , K_D parametreleri $[-2, 2]$ ve λ , μ parametreleri $[0, 1,5]$ değer aralığında tasarlanmıştır.

Tablo 16. Alan-1 %1 yük altındayken iki alanlı çok kaynaklı güç sistemi için tasarlanan ideal denetleyici parametreleri

Denetleyici tipi	Güç kaynağı	K_{P1}	K_{P2}	K_I	K_D	λ	μ
PID	Termal	1,9999	-	0,4906	0,8370	-	-
	Hidro	1,9999	-	-0,1509	0,0992	-	-
	Gaz	1,7587	-	1,9999	1,9898	-	-
FOPID	Termal	1,9862	-	1,9992	1,9838	0,5966	0,0028
	Hidro	-0,1838	-	1,7499	-1,7899	0,9272	0,2356
	Gaz	1,9941	-	1,9991	1,9624	0,9965	1,1321
FOPI-FOPD	Termal	-1,9997	-1,9972	-1,9975	-1,9572	0,6413	0,6620
	Hidro	1,2403	-1,9237	-1,8164	0,4744	0,9481	1,4776
	Gaz	-1,3845	-1,9999	-1,9989	-1,9669	0,9496	0,0342

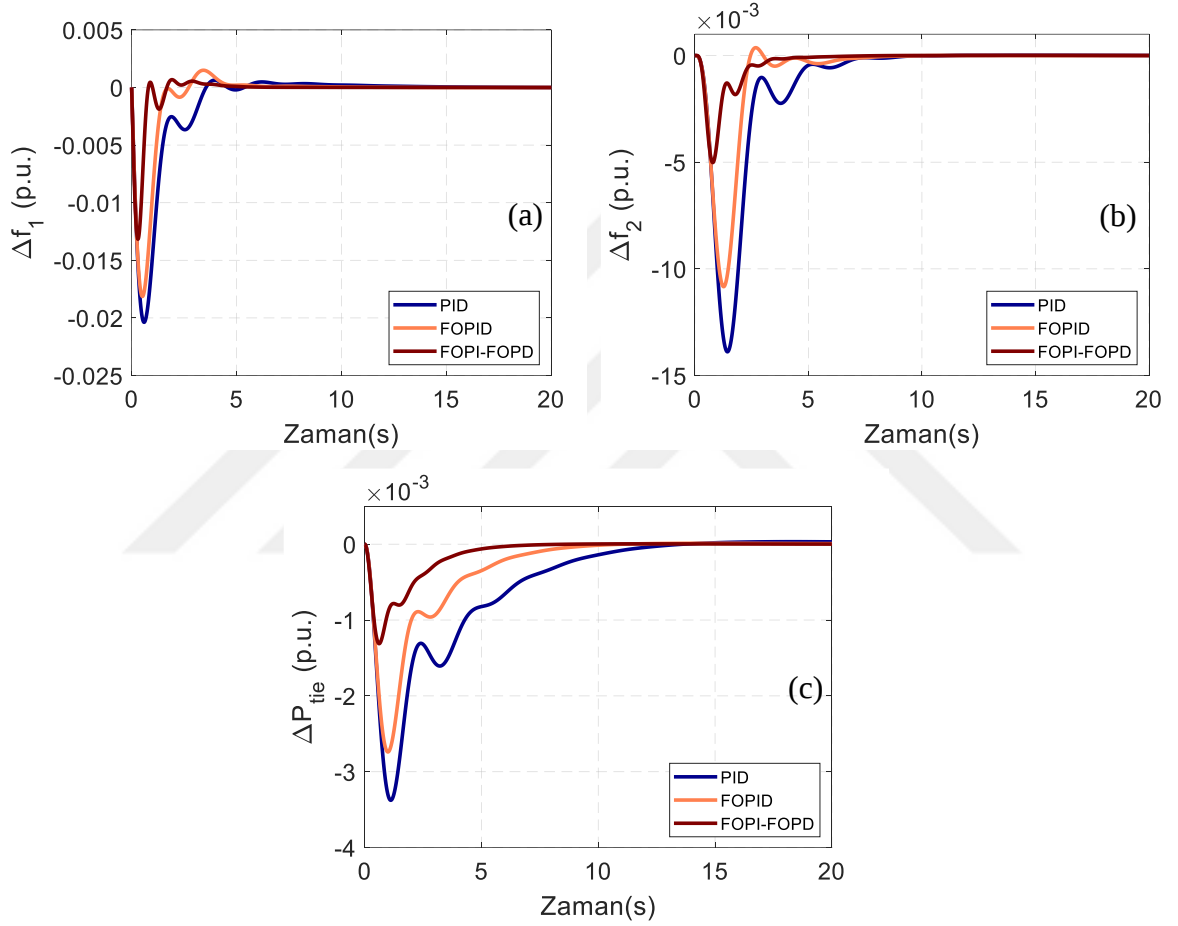
- Zaman Bölgesi Analizi Sonuçları

Tablo 17 iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin, alan-1 %1 yük altındayken zaman bölgesi analizi sonucunda elde edilen ITAE değerlerini ve $\pm 0,002$ bant aralığında belirlenen Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} için yerleşme sürelerini içermektedir. Ayrıca her bir denetleyici için Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} eğrileri Şekil 27’de gösterilmiştir.

Tablo 17. Alan-1 %1 yük altındayken iki alanlı çok kaynaklı güç sistemi için zaman bölgesi analizi sonuçları

Denetleyici	ITAE	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
LUS-TLBO: PID (B. K. Sahu vd., 2016)	0,2130	2,27	2,81	1,94
DE: PID (Mohanty vd., 2014)	0,5283	6,74	4,61	4,32
PID	0,1471	3,09	4,06	1,81
FOPID	0,0630	1,36	2,14	1,45
FOPI-FOPD	0,0206	0,68	1,20	0

Kullanılan ilk güç sisteminde olduğu gibi iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminde de parametreleri FDBAHA algoritması tarafından optimize edilen denetleyicilerden en iyi amaç fonksiyonu ve yerleşme sürelerine sahip denetleyicinin FOPI-FOPD olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca literatürden seçilen, son yıllarda yapılmış çalışmalarla karşılaştırıldığında, FDBAHA algoritması ile tasarlanan PID denetleyicinin diğer yöntemlerle tasarlanmış PID denetleyicilerinden performansının üstün olduğu görülmüştür.



Şekil 27. Alan-1 %1 yük altındayken iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri

- Gürbüzlük Analizi Sonuçları

İki alanlı çok kaynaklı güç sistemi için FDBAHA algoritması ile tasarlanan PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerin performansları gürbüzlük analizi ile test edilerek elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 18, 19 ve 20’de verilmiştir. İncelenen ilk sistemde olduğu gibi bu sistemde de T_g , T_t , T_{12} , B ve R parametre değerlerinde $\pm 25\%$ ve $\pm 50\%$ oranında değişiklik yapılarak denetleyicilerin dayanıklılığı test edilmiştir. Ayrıca T_g

parametresinin değişimine göre, tasarlanan PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerinin performanslarını kıyaslamak amacıyla Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} eğrileri çizdirilmiş ve sırasıyla Şekil 28, 29 ve 30’da gösterilmiştir.

Tablo 18. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları

Parametreler	Değişim oranı	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)			Alt aşım (p.u.)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
Nominal	-	3,09	4,06	1,81	-0,0203	-0,0139	-0,0033
T_g	+50%	3,07	4,11	1,77	-0,0211	-0,0145	-0,0035
	+25%	3,08	4,09	1,79	-0,0207	-0,0142	-0,0034
	-25%	3,11	4,01	1,84	-0,0200	-0,0136	-0,0033
	-50%	3,12	2,7	1,86	-0,0197	-0,0134	-0,0033
T_t	+50%	3,12	4,3	1,76	-0,0220	-0,0157	-0,0036
	+25%	3,1	4,2	1,78	-0,0213	-0,0148	-0,0035
	-25%	3,1	2,83	1,88	-0,0193	-0,0130	-0,0032
	-50%	3,14	3,06	1,97	-0,0181	-0,0122	-0,0031
T_{12}	+50%	2,82	3,66	2,9	-0,0190	-0,0158	-0,0039
	+25%	2,95	3,86	1,67	-0,0197	-0,0150	-0,0037
	-25%	3,09	2,83	1,98	-0,0212	-0,0124	-0,0030
	-50%	1,99	3,21	2,11	-0,0223	-0,0102	-0,0025
B	+50%	1,75	2,54	1,78	-0,0171	-0,0088	-0,0028
	+25%	2,73	2,56	1,8	-0,0186	-0,0109	-0,0031
	-25%	3,35	4,47	1,83	-0,0226	-0,0181	-0,0038
	-50%	5,71	6,86	3,78	-0,0254	-0,0243	-0,0042
R	+50%	3,18	2,74	1,87	-0,0206	-0,0149	-0,0035
	+25%	3,14	2,68	1,85	-0,0205	-0,0145	-0,0034
	-25%	3,02	4,15	1,76	-0,0202	-0,0130	-0,0033
	-50%	2,91	4,07	1,64	-0,0198	-0,0116	-0,0031

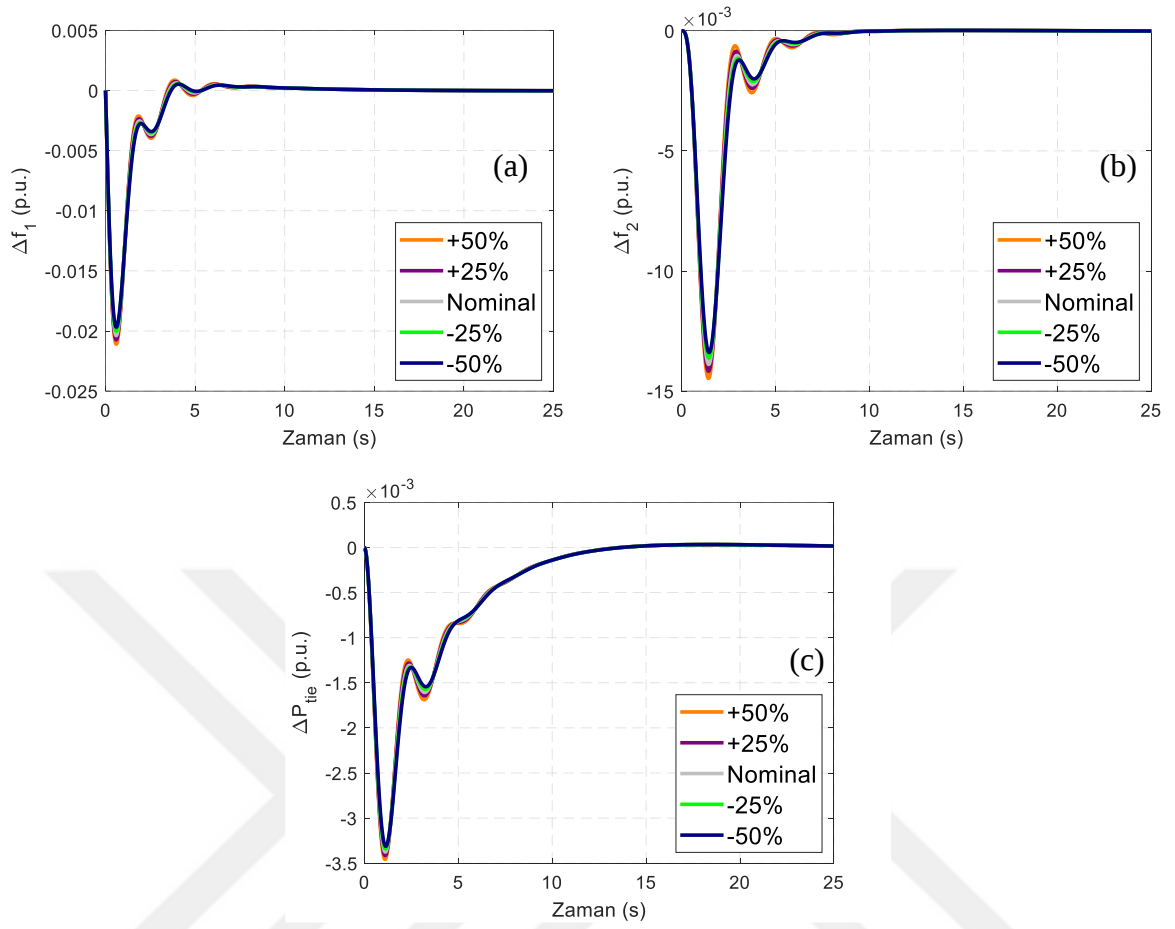
Tablo 19. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları

Parametreler	Değişim oranı	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)			Alt aşım (p.u.)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
Nominal	-	1,36	2,14	1,45	-0,0181	-0,0108	-0,0027
T_g	+50%	1,33	2,1	1,46	-0,0187	-0,0115	-0,0029
	+25%	1,34	2,11	1,46	-0,0185	-0,0112	-0,0028
	-25%	1,39	2,18	1,45	-0,0178	-0,0105	-0,0027
	-50%	1,43	2,22	1,44	-0,0174	-0,0102	-0,0026
T_t	+50%	3,77	3,14	1,54	-0,0193	-0,0124	-0,0030
	+25%	1,37	2,13	1,5	-0,0188	-0,0116	-0,0029
	-25%	1,42	2,24	1,4	-0,0174	-0,0099	-0,0026
	-50%	1,95	2,55	1,36	-0,0164	-0,0089	-0,0024
T_{12}	+50%	3,1	1,89	1,3	-0,0172	-0,0128	-0,0033
	+25%	2,2	2	1,37	-0,0176	-0,0119	-0,0030
	-25%	1,45	2,32	1,49	-0,0187	-0,0094	-0,0024
	-50%	1,57	2,56		-0,0194	-0,0075	-0,0019
B	+50%	1,23	1,98	1,19	-0,0152	-0,0064	-0,0022
	+25%	1,29	2,06	1,34	-0,0165	-0,0082	-0,0024
	-25%	3,92	2,25	1,53	-0,0203	-0,0148	-0,0031
	-50%	5,18	6,28	1,6	-0,0232	-0,0210	-0,0036
R	+50%	1,44	2,23	1,5	-0,0183	-0,0114	-0,0028
	+25%	1,41	2,2	1,48	-0,0182	-0,0112	-0,0028
	-25%	1,29	2,05	1,4	-0,0180	-0,0103	-0,0027
	-50%	1,18	3,24	1,31	-0,0178	-0,0095	-0,0026

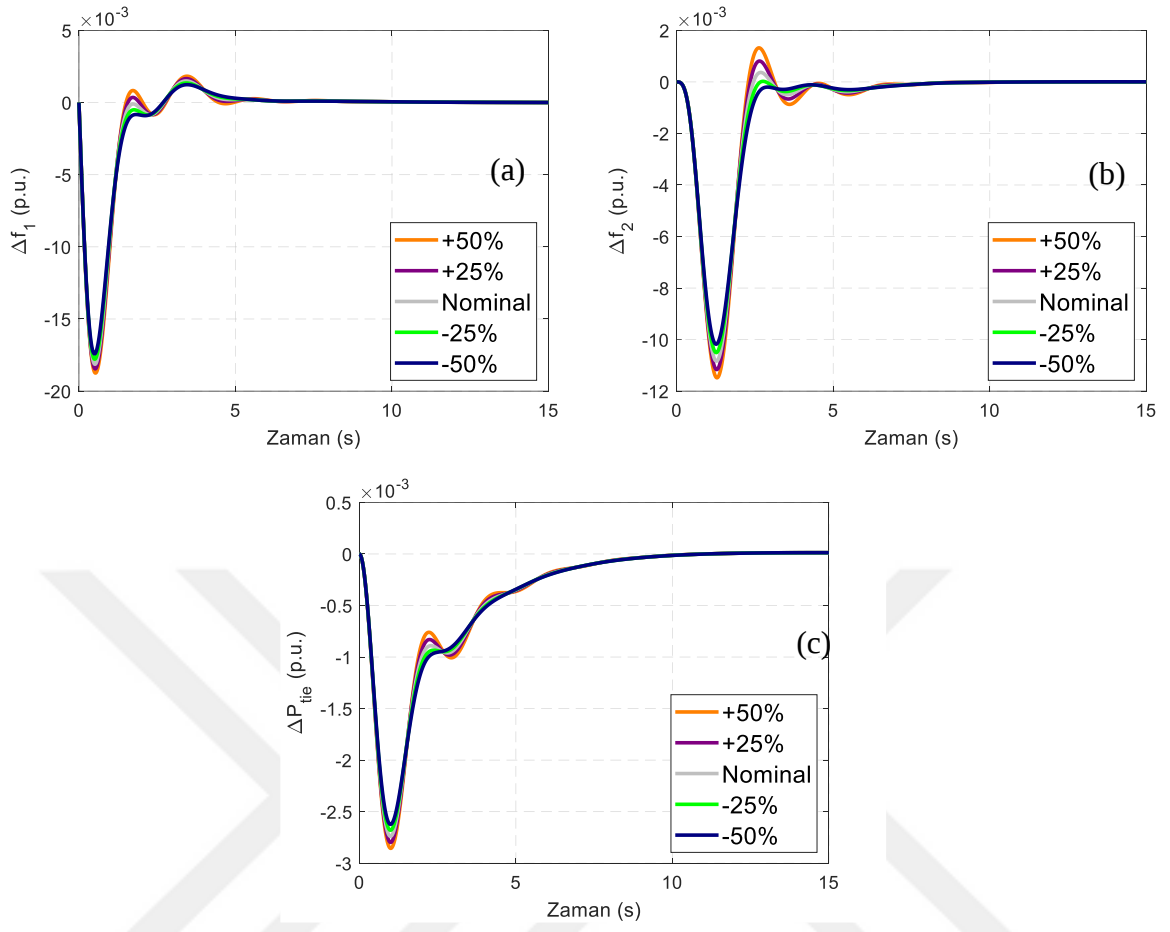
Tablo 20. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları

Parametreler	Değişim oranı	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)			Alt aşım (p.u.)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
Nominal	-	0,68	1,2	0	-0,0131	-0,0050	-0,0013
T_g	+50%	1,55	2,05	0	-0,0142	-0,0057	-0,0014
	+25%	1,45	1,87	0	-0,0137	-0,0054	-0,0014
	-25%	0,7	1,26	0	-0,0126	-0,0047	-0,0013
	-50%	0,75	1,43	0	-0,0119	-0,0043	-0,0012
T_t	+50%	1,18	1,26	0	-0,0148	-0,0064	-0,0016
	+25%	0,71	1,23	0	-0,0141	-0,0057	-0,0015
	-25%	1,26	1,72	0	-0,0121	-0,0042	-0,0012
	-50%	1,18	1,71	0	-0,0107	-0,0034	-0,0010
T_{12}	+50%	1,45	1,91	0	-0,0129	-0,0066	-0,0017
	+25%	1,42	1,86	0	-0,0130	-0,0059	-0,0015
	-25%	0,73	1,26	0	-0,0133	-0,0040	-0,0011
	-50%	0,8	1,25	0	-0,0135	-0,0029	-0,0008
B	+50%	1,12	0,77	0	-0,0115	-0,0027	-0,0009
	+25%	1,21	0,97	0	-0,0122	-0,0036	-0,0011
	-25%	1,66	1,41	0	-0,0147	-0,0076	-0,0016
	-50%	2,96	3,56	0,84	-0,0171	-0,0126	-0,0021
R	+50%	0,7	1,24	0	-0,0132	-0,0051	-0,0013
	+25%	0,69	1,23	0	-0,0132	-0,0051	-0,0013
	-25%	1,32	1,16	0	-0,0132	-0,0050	-0,0013
	-50%	1,42	1,86	0	-0,0132	-0,0048	-0,0013

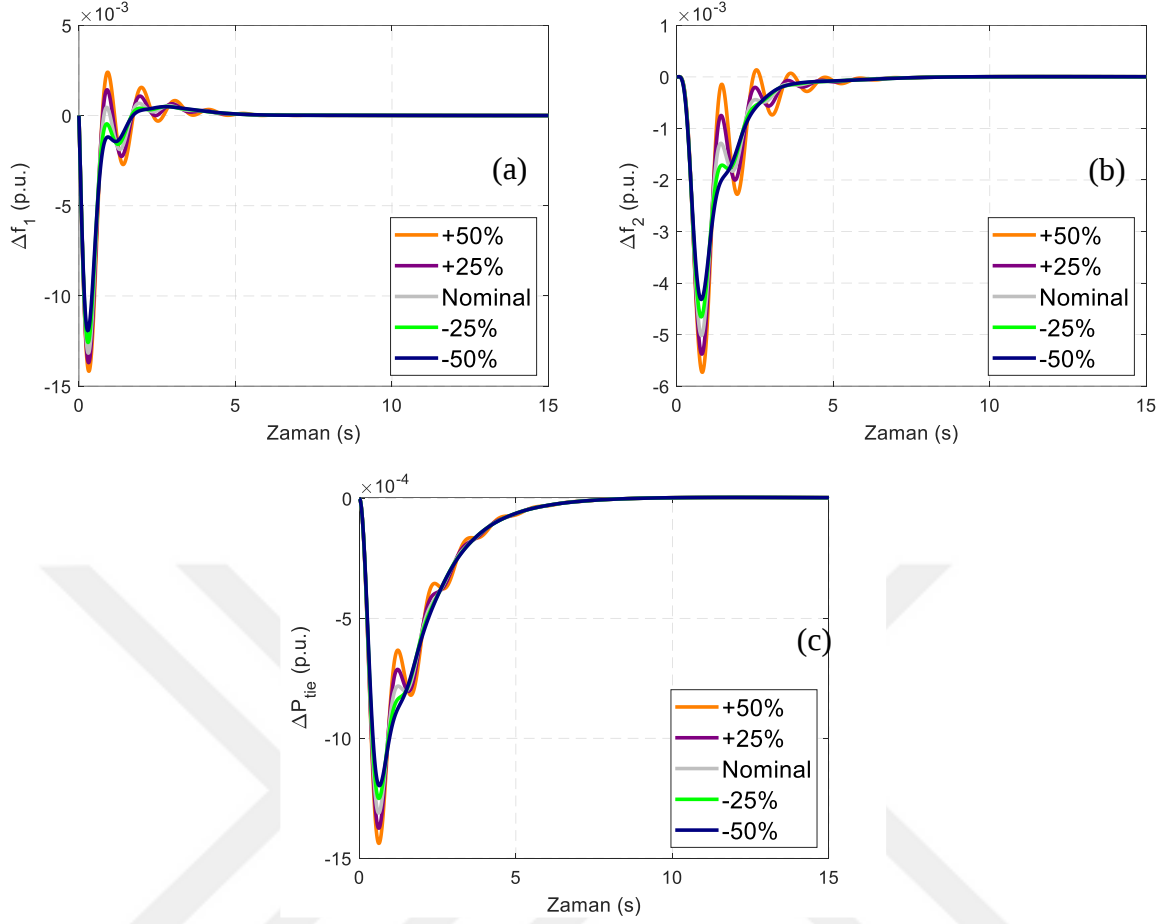
İki alanlı çok kaynaklı güç sistemi için yapılan gürbüzlük analizi sonuçları incelendiğinde geliştirilen FDBAHA algoritmasının bu sistem için denetleyici tasarımında son derece başarılı olduğu görülebilir. Tasarlanan denetleyiciler sistem parametrelerinin değişiminden çok az etkilense de kararlılığını sürdürmüş ve başarılı bir YFK çözümü sunmuştur.



Şekil 28. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin T_g parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri



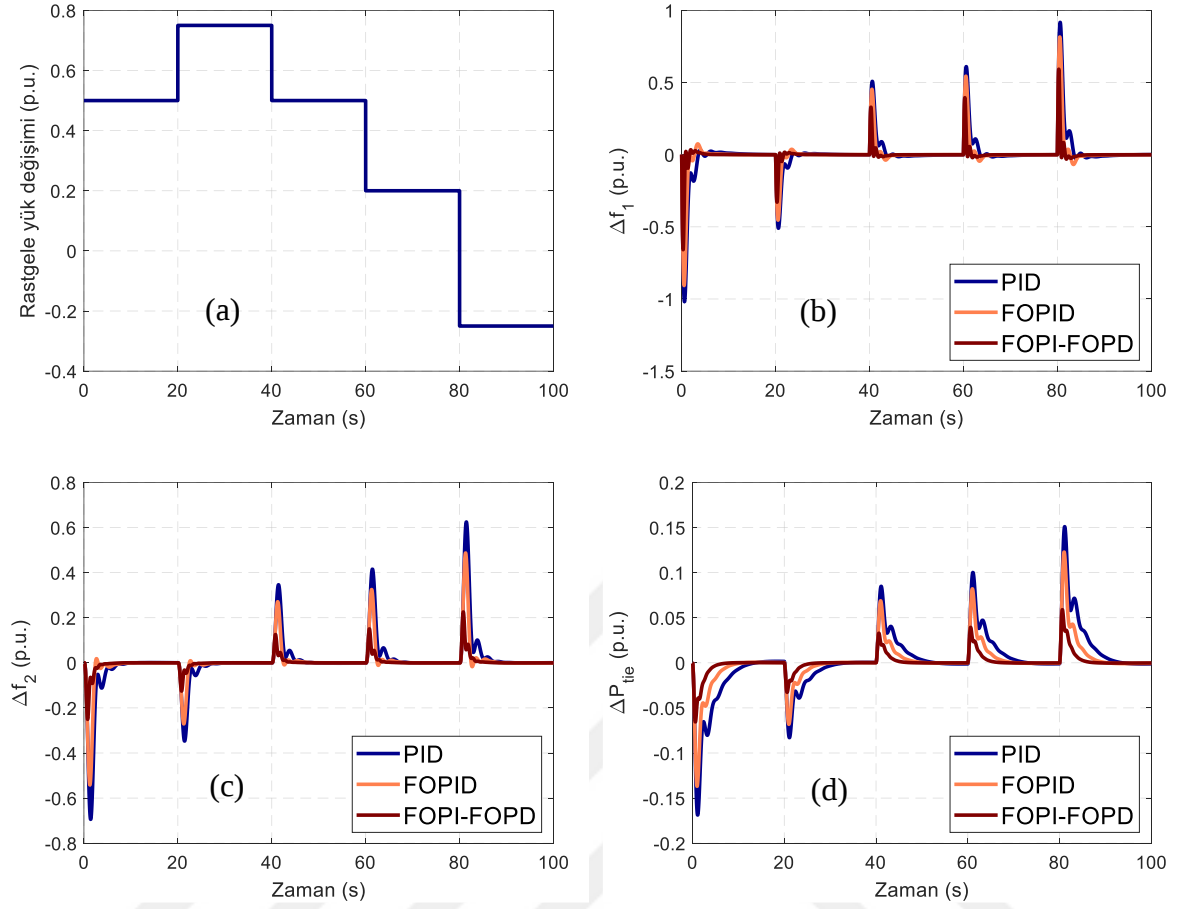
Şekil 29. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin T_g parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri



Şekil 30. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı çok kaynaklı güç sisteminin T_g parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri

- Bozucu Yük Analizi Sonuçları

İki alanlı çok kaynaklı güç sistemi için, geliştirilen FDBAHA algoritması ile tasarlanmış PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerinin dayanıklılığını ölçmek amacıyla sistemin birinci alanına Şekil 31 (a)'da gösterildiği gibi rastgele yük sinyali uygulanarak bozucu yük analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda sistemin her bir denetleyicisi için elde edilen Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} eğrileri sırasıyla Şekil 31 (b), (c) ve (d)'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde rastgele büyüklükteki yük değeri karşısında denetleyicilerin istikrarlı performans sergiledikleri ve sistem kararlılığını başarılı bir şekilde sağladıkları gözlemlenmiştir.



Şekil 31. İki alanlı çok kaynaklı güç sistemine uygulanan (a) rastgele yük değişimi ve bu yük sonucunda elde edilen (b) Δf_1 , (c) Δf_2 ve (d) ΔP_{tie} eğrileri

3.2.3. İki Alanlı FV-Termal Güç Sistemi Sonuçları

İki alanlı FV-thermal güç sisteminde yük frekans kontrolü için PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerinin parametre değerleri FDBAHA algoritması ile tasarlanmış ve 10 bağımsız çalışma sonucunda en iyi amaç fonksiyonu değerinin bulunduğu denetleyici parametreleri Tablo 21’de verilmiştir. Denetleyici parametreleri $t = 0$ s’de termal alana %10 yük uygulanarak tasarlanmıştır.

İncelenen iki alanlı FV-thermal güç sisteminde her iki alan için tasarlanan denetleyiciler farklı parametre değerlerine sahiptir. Bu güç sisteminde PID denetleyicisi için K_P , K_I , K_D parametreleri [0, 2], FOPID denetleyicisi için K_P , K_I , K_D parametreleri [0, 2] ve λ , μ parametreleri [0, 1,5] ve son olarak FOPI-FOPD denetleyicisi için K_{P1} , K_{P2} , K_I , K_D parametreleri [0, 2] ve λ , μ parametreleri [0, 1,5] değer aralığında tasarlanmıştır.

Tablo 21. Termal alan %10 yük altındayken iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi için tasarlanan ideal denetleyici parametreleri

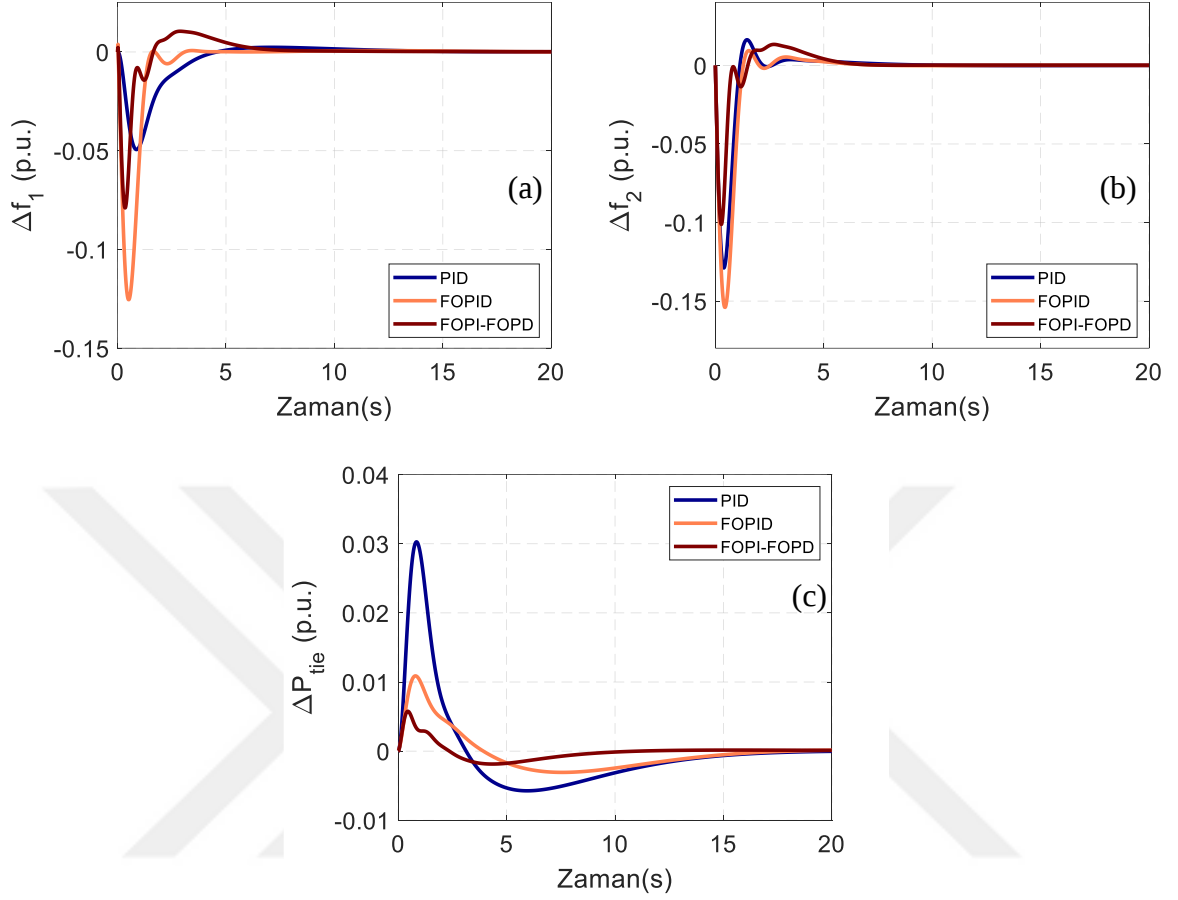
Denetleyici tipi	Güç Kaynağı	K_{P1}	K_{P2}	K_I	K_D	λ	μ
PID	FV	0,0406	-	0,0129	0,0654	-	-
	Termal	1,9999	-	1,9999	0,5629	-	-
FOPID	FV	0,3203	-	0,0214	1,1113	1,3042	1,4656
	Termal	1,9329	-	1,9414	0,5658	0,8823	0,8232
FOPI-FOPD	FV	0,6207	0,1439	0,1799	1,7302	1,3568	1,3601
	Termal	1,9999	1,9999	2	0,8903	1,3015	0,6920

- Zaman Bölgesi Analizi Sonuçları

İki alanlı FV-termal güç sistemi için önerilen FDBAHA algoritması ile üç ayrı denetleyici tasarlanmış ve zaman bölgesi analizi yapılarak performansları gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda her bir denetleyici için elde edilen ITAE değerleri ile Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} yerleşme süreleri Tablo 22’de verilmiştir. Ayrıca çalışmaların performansını literatürle karşılaştırmak adına bazı çalışmaların sonuçları tabloya eklenmiştir. Tablo incelendiğinde FDBAHA ile tasarlanan FOPI-FOPD denetleyicisinin diğer denetleyicilerden daha iyi ITAE değerine sahip olduğu görülür. Ancak yerleşme süreleri incelendiğinde, özellikle Δf_1 için en iyi sonuç FOPID denetleyicisi ile elde edilmiştir. Şekil 32’de de görüldüğü gibi FOPI-FOPD denetleyicisi bağlantı hattı güç değişiminin sıfırlanmasında ise açık ara en iyi performansa sahiptir.

Tablo 22. Termal alan %10 yük altındayken iki alanlı FV-termal güç sistemi için zaman bölgesi analizi sonuçları

Denetleyici	ITAE	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
MA: PID (Cavdar vd., 2023)	0,7577	8,76	5,97	11,66
MA: PI-PD (Cavdar vd., 2023)	0,3379	3,79	1	8,64
FDBAHA: PID	0,7577	8,75	5,96	11,60
FDBAHA: FOPID	0,5945	2,82	5,29	11,02
FDBAHA: FOPI-FOPD	0,2413	6,22	5,76	1,58



Şekil 32. Termal alan %10 yük altındayken iki alanlı FV-termal güç sisteminin (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri

- Gürbüzlük Analizi Sonuçları

İki alanlı FV-termal güç sistemi için FDBAHA algoritması ile tasarlanan PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerin performansları gürbüzlük analizi ile test edilerek elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 23, 24 ve 25’te verilmiştir. Sistemin termal kaynağının T_g , T_t , T_{12} , B ve R parametre değerlerinde $\pm 25\%$ ve $\pm 50\%$ oranında değişiklik yapılarak denetleyicilerin dayanıklılığı test edilmiştir. Ayrıca T_g parametresinin değişimine göre, tasarlanan PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerinin performanslarını kıyaslamak amacıyla Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} eğrileri çizdirilmiş ve sırasıyla Şekil 33, 34 ve 35’te gösterilmiştir.

Gerçekleştirilen gürbüzlük analizi sonucunda incelenen ilk iki güç sisteminde olduğu gibi FDBAHA algoritması ile tasarlanan denetleyicilerin FV-termal güç sisteminde de

bozucu dış faktörlere karşı dayanıklı oldukları ve sistem kararlılığını sağlamakta başarılı performans sergiledikleri görülmüştür.

Tablo 23. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları

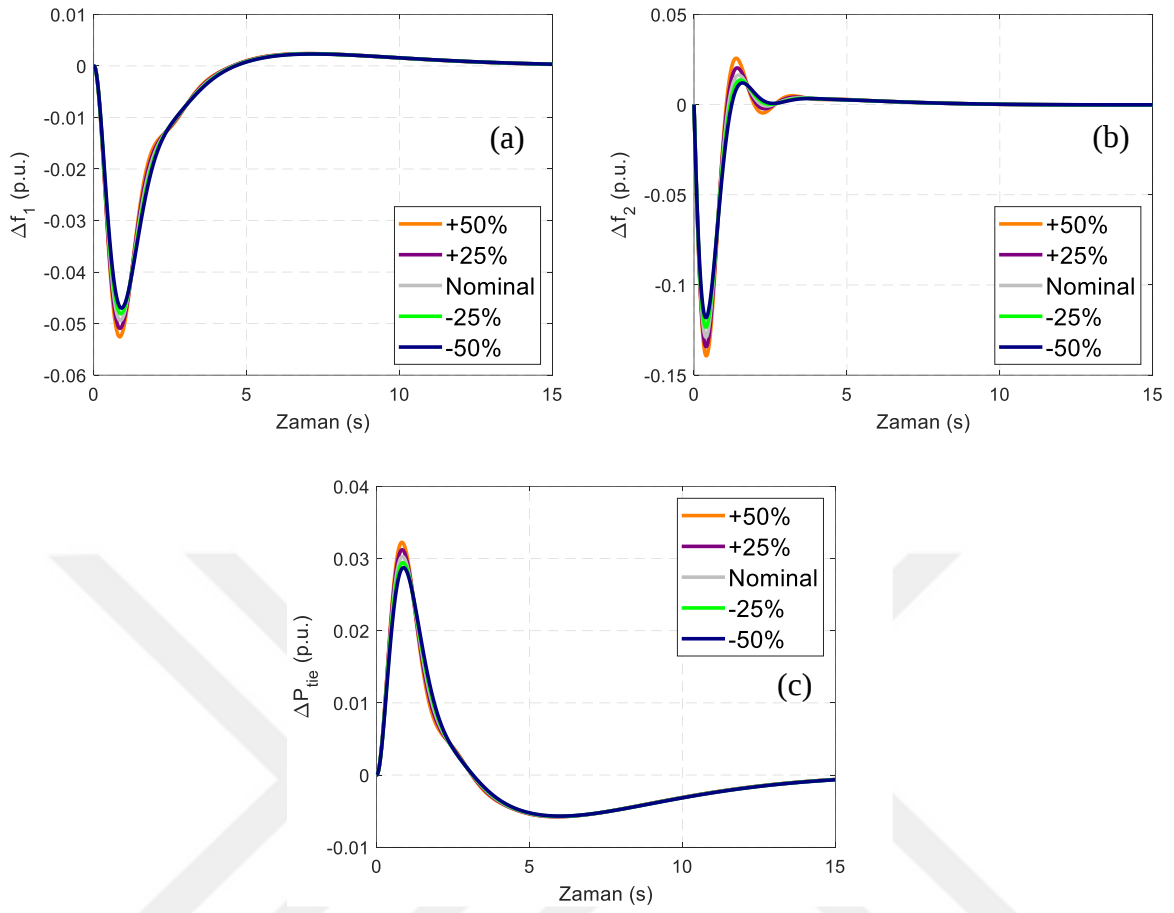
Parametreler	Değişim oranı	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)			Alt aşım (p.u.)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
Nominal	-	8,75	5,96	11,66	-0,0494	-0,1289	-0,0057
T_g	+50%	8,76	5,94	11,61	-0,0526	-0,1393	-0,0058
	+25%	8,75	5,96	11,64	-0,0509	-0,1342	-0,0058
	-25%	8,74	5,96	11,69	-0,0481	-0,1235	-0,0057
	-50%	8,74	5,95	11,71	-0,0470	-0,1181	-0,0057
T_t	+50%	8,79	6,03	11,46	-0,0588	-0,1492	-0,0060
	+25%	8,78	5,98	11,56	-0,0541	-0,1397	-0,0059
	-25%	8,70	5,91	11,76	-0,0449	-0,1163	-0,0056
	-50%	8,64	5,86	11,85	-0,0413	-0,1015	-0,0055
T_{12}	+50%	8,65	6,45	11,23	-0,0574	-0,1221	-0,0061
	+25%	8,72	6,18	11,40	-0,0539	-0,1253	-0,0060
	-25%	8,25	5,90	12,08	-0,0435	-0,1331	-0,0054
	-50%	5,06	6,17	12,87	-0,0353	-0,1381	-0,0047
B	+50%	8,87	6,07	10,74	-0,0369	-0,1056	-0,0048
	+25%	8,94	6,08	11,17	-0,0424	-0,1159	-0,0052
	-25%	7,66	5,72	12,22	-0,0588	-0,1457	-0,0063
	-50%	4,44	4,44	12,85	-0,0719	-0,1685	-0,0070
R	+50%	8,78	5,98	11,62	-0,0509	-0,1306	-0,0058
	+25%	8,77	5,97	11,64	-0,0503	-0,1299	-0,0058
	-25%	8,71	5,94	11,70	-0,0480	-0,1273	-0,0057
	-50%	8,59	5,89	11,77	-0,0454	-0,1243	-0,0055

Tablo 24. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları

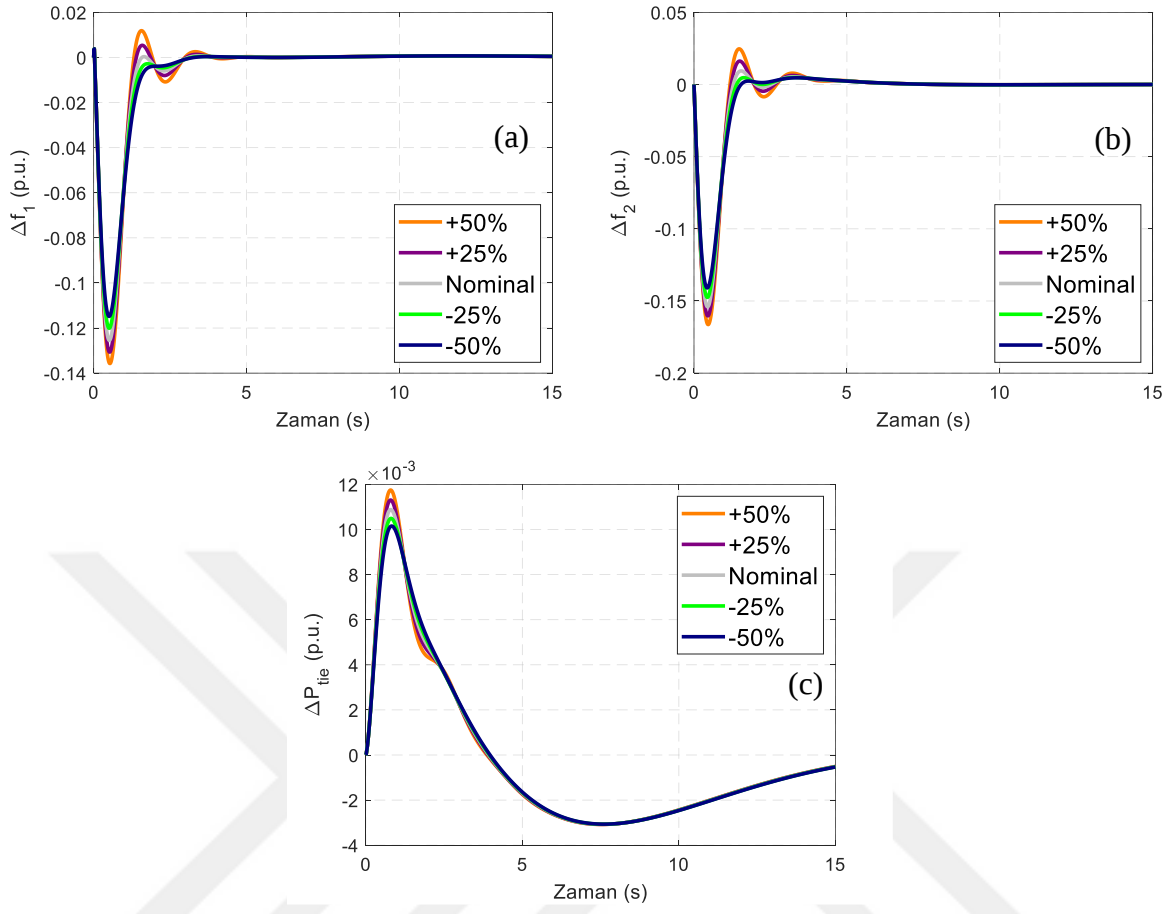
Parametreler	Değişim oranı	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)			Alt aşım (p.u.)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
Nominal	-	2,82	5,29	11,02	-0,1255	-0,1540	-0,0031
T_g	+50%	3,52	5,37	10,99	-0,1358	-0,1663	-0,0031
	+25%	2,84	5,32	11,01	-0,1307	-0,1603	-0,0031
	-25%	2,78	5,28	11,04	-0,1201	-0,1475	-0,0031
	-50%	2,73	5,29	11,06	-0,1148	-0,1409	-0,0031
T_t	+50%	4,87	6,02	10,90	-0,1466	-0,1785	-0,0031
	+25%	3,81	5,47	10,96	-0,1366	-0,1669	-0,0031
	-25%	2,65	5,31	11,09	-0,1129	-0,1393	-0,0031
	-50%	2,70	5,37	11,15	-0,0984	-0,1220	-0,0030
T_{12}	+50%	2,68	5,10	10,84	-0,1329	-0,1526	-0,0031
	+25%	2,74	5,18	10,92	-0,1299	-0,1532	-0,0031
	-25%	2,96	5,46	11,20	-0,1185	-0,1551	-0,0030
	-50%	3,40	5,76	11,52	-0,1063	-0,1569	-0,0029
B	+50%	2,40	5,36	9,40	-0,1015	-0,1268	-0,0023
	+25%	2,58	5,37	10,22	-0,1119	-0,1386	-0,0026
	-25%	3,20	4,90	11,90	-0,1442	-0,1752	-0,0037
	-50%	9,77	12,39	12,99	-0,1720	-0,2064	-0,0045
R	+50%	2,76	5,26	11,01	-0,1279	-0,1567	-0,0031
	+25%	2,79	5,28	11,01	-0,1269	-0,1556	-0,0031
	-25%	2,83	5,28	11,04	-0,1231	-0,1515	-0,0030
	-50%	2,86	5,13	11,06	-0,1189	-0,1468	-0,0029

Tablo 25. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin gürbüzlük analizi sonuçları

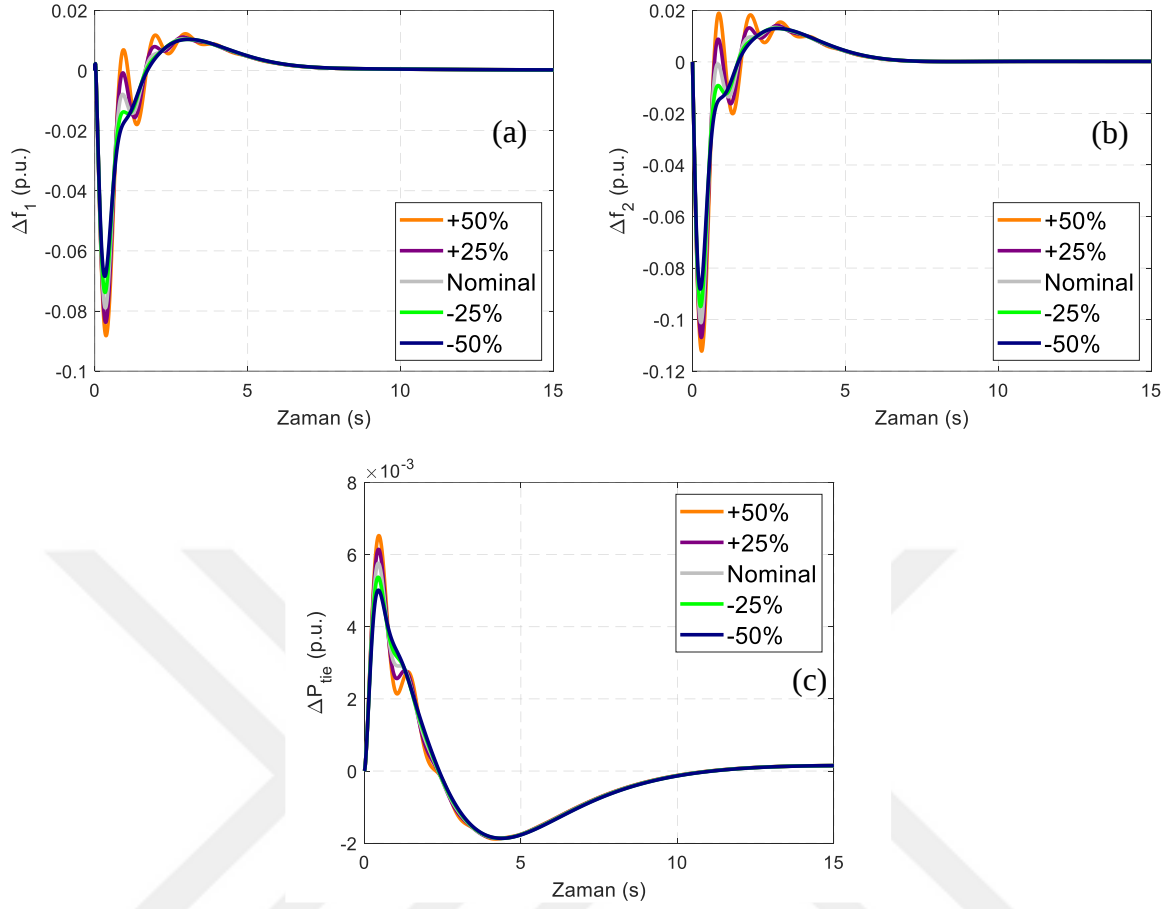
Parametreler	Değişim oranı	Yerleşme süreleri (s) ($\pm 0,002$ bant)			Alt aşım (p.u.)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}	Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
Nominal	-	6,22	5,76	1,58	-0,0790	-0,1012	-0,0019
T_g	+50%	6,20	5,72	1,64	-0,0882	-0,1123	-0,0019
	+25%	6,20	5,75	1,60	-0,0838	-0,1069	-0,0019
	-25%	6,25	5,79	1,57	-0,0738	-0,0949	-0,0019
	-50%	6,27	5,81	1,59	-0,0685	-0,0881	-0,0019
T_t	+50%	6,04	5,56	1,08	-0,0947	-0,1193	-0,0019
	+25%	6,13	5,67	1,58	-0,0872	-0,1107	-0,0019
	-25%	6,32	5,86	1,59	-0,0696	-0,0903	-0,0019
	-50%	6,40	5,95	1,69	-0,0587	-0,0773	-0,0018
T_{12}	+50%	6,10	5,79	1,55	-0,0853	-0,1003	-0,0019
	+25%	6,15	5,78	1,56	-0,0827	-0,1007	-0,0019
	-25%	6,34	5,75	1,60	-0,0731	-0,1019	-0,0018
	-50%	6,55	5,73	1,64	-0,0632	-0,1028	-0,0017
B	+50%	5,82	5,48	1,26	-0,0633	-0,0833	-0,0013
	+25%	6,02	5,62	1,41	-0,0700	-0,0909	-0,0015
	-25%	6,42	5,89	5,48	-0,0920	-0,1159	-0,0024
	-50%	6,54	5,97	6,39	-0,1130	-0,1392	-0,0032
R	+50%	6,13	5,68	1,57	-0,0796	-0,1018	-0,0019
	+25%	6,17	5,71	1,58	-0,0793	-0,1016	-0,0019
	-25%	6,32	5,85	1,57	-0,0784	-0,1006	-0,0018
	-50%	6,49	6,01	1,57	-0,0774	-0,0995	-0,0018



Şekil 33. PID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin T_g parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri



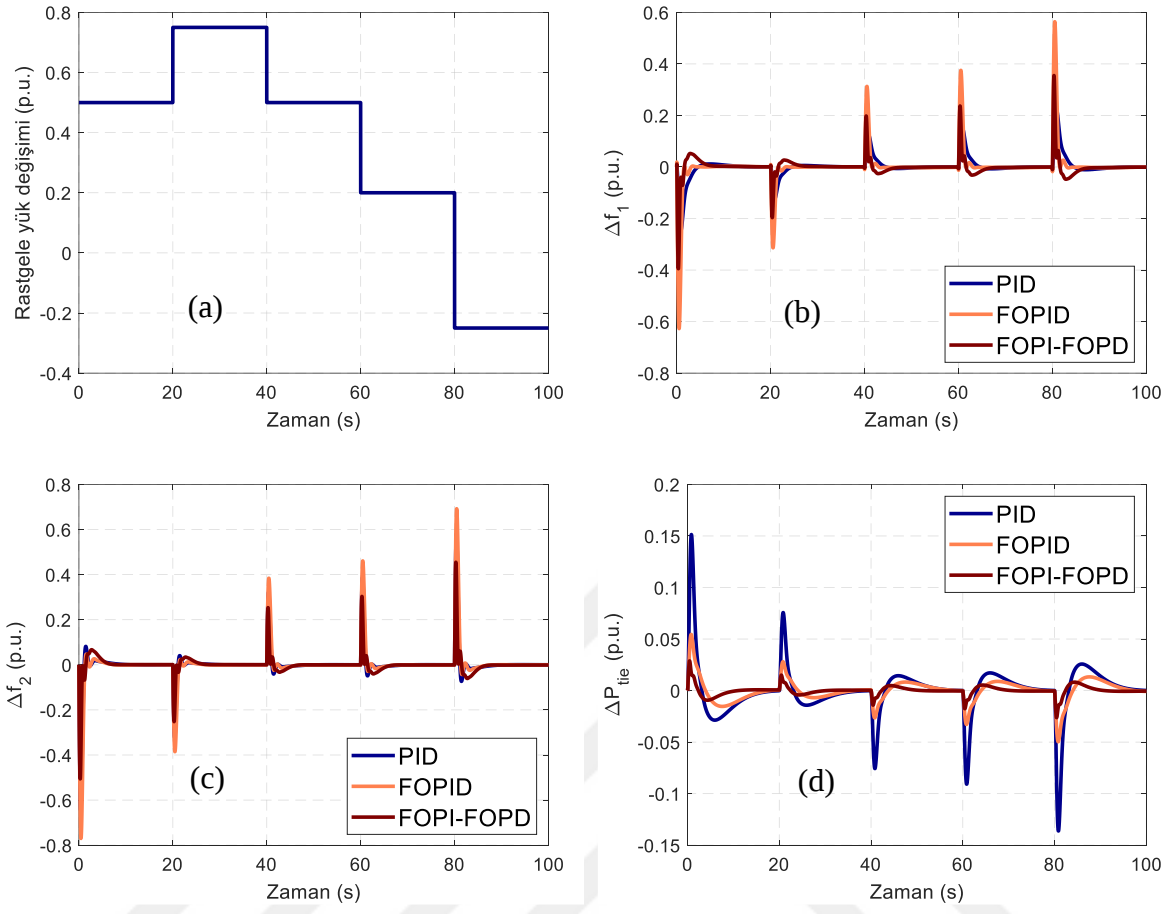
Şekil 34. FOPID denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin T_g parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri



Şekil 35. FOPI-FOPD denetleyicisi ile tasarlanan iki alanlı FV-termal güç sisteminin T_g parametresi değişimi ile elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 ve (c) ΔP_{tie} eğrileri

- Bozucu Yük Analizi Sonuçları

İki alanlı FV-termal güç sistemi için, geliştirilen FDBAHA algoritması ile tasarlanmış PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerinin dayanıklılığını ölçmek amacıyla sistemin termal alanına Şekil 36 (a)'da gösterildiği gibi rastgele yük sinyali uygulanarak bozucu yük analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda sistemin her bir denetleyicisi için elde edilen Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} eğrileri sırasıyla Şekil 36 (b), (c) ve (d)'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde zaman bölgesi analizinde olduğu gibi bozucu yük analizinde de birinci alan (FV) frekans değişiminin sönümlenmesinde denetleyicilerden en başarılısının PID denetleyicisi olduğu görülür. İkinci alan frekansı ve bağlantı hattı güç değişimi eğrilerinden ise FOPI-FOPD denetleyicisinin en iyi performansı sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 36. FV-termal güç sistemine uygulanan (a) rastgele yük değişimi ve bu yük sonucunda elde edilen (b) Δf_1 , (c) Δf_2 ve (d) ΔP_{tie} eğrileri

4. SONUÇLAR

AHA algoritması, doğadaki sinek kuşlarının beslenme stratejilerinden esinlenen bir MSA algoritmasıdır. Bu algoritma, sinek kuşlarının çeşitli uçuş yeteneklerini, hedef besin kaynağını seçme hafızasını ve üç farklı beslenme davranışını taklit ederek en iyi sonuca ulaşmayı amaçlar. AHA algoritması üzerinde gerçekleştirilen testler, keşif ve sömürü özelliklerinin dengeli olmadığını ve algoritmanın yerel çözümlerde sıkışıp kaldığını göstermiştir. Bu zayıflıkları iyileştirmek için temel arama operatörlerine FDB seçim yöntemi uygulanmıştır.

FDB seçim yönteminin, AHA algoritmasının arama performansını artırmadaki üstünlüğünü göstermek amacıyla MATLAB programlama ortamında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, AHA ve FDBAHA algoritmalarının performansları CEC 2017 ve CEC 2020 test sütleri kapsamında değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, algoritmalar tek modlu, çok modlu, hibrit ve kompozit fonksiyonlar gibi çeşitli fonksiyonlar üzerinde 30, 50 ve 100 boyutlarında test edilmiştir. Testlerin sonuçlarına göre, FDBAHA'nın AHA'ya karşı belirgin üstünlüğü, Tablo 7 ve Tablo 8'de sunulan verilerle kanıtlanmıştır. Sonrasında, AHA ve FDBAHA'nın performansları, Friedman ve Wilcoxon testleri ile birbirleriyle ve literatürdeki 10 tanınmış MSA algoritmasıyla karşılaştırılmıştır. Bu testler, FDBAHA'nın sadece AHA'ya değil, aynı zamanda mevcut MSA algoritmalarına karşı da etkinliğini açıkça ortaya koymuştur. Ek olarak, sayısal sonuçlar, önerilen algoritmanın yakınsama hızı ve performansını, maksimum, minimum ve ortalama değerleri göstermek amacıyla yakınsama grafikleri ve box-plot grafikleri ile desteklenmiştir. Son bölümde, geliştirilen FDBAHA algoritması popüler bir mühendislik problemi olan YFK problemine uygulanmıştır. Bu bölümde, üç farklı denetleyici yapısı (PID, FOPID ve FOPI-FOPD) ile üç farklı güç sistemi (Termal/Termal, Termal/Hidro/Gaz ve PV/Termal) ele alınmıştır. Algoritma, ITAE olarak bilinen bir amaç fonksiyonunu minimize etmek için optimum denetleyici parametrelerini belirlemek üzere kullanılmıştır. YFK optimizasyon sonuçları, FDBAHA'nın üstün çözümler bulma ve rakip optimize edicilerden daha etkili performans gösterme kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Yukarıda belirtilen kanıtlara dayanarak, önerilen FDBAHA'nın basit bir tasarım ve istenen sonuçlara ulaşmada etkili bir optimize edici olduğu ve hem kısıtsız kıyaslama hem de kısıtlı mühendislik tasarım problemlerini çözmede güçlü bir yöntem olarak kullanılabileceği ileri sürülebilir.

5. ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında son yıllarda literatüre sunulan AHA algoritmasının, FDB seçim yöntemi ile başarılı bir şekilde geliştirilmesi ve FDBAHA algoritması ile YFK gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. İlerleyen zamanlarda bu konu ile ilgili çalışma yapmak isteyen araştırmacılar aşağıda verilmiş önerileri göz önünde bulundurabilirler:

- FDB seçim yöntemi MSA algoritmalarının keşif ve sömürü dengesinin daha sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Bu yöntem, çözüm adaylarının uygunluk değerlerini ve en iyi çözüm ile arasındaki mesafe değerini kullanır. Bu yüzden bir algoritmaya FDB uygulanabilmesi için o algoritmanın popülasyon tabanlı yani birden fazla çözüm adayına sahip olması gerekir. Eğer bir algordtmada keşif ve sömürü arasında dengesizlik ve yerel optimuma sıkışma eğilimi varsa bu algoritmaya FDB seçim yönteminin uygulanması son derece mantıklıdır.
- YFK için tasarlanan karmaşık yapılarıdaki denetleyiciler, optimize edilecek parametre değerlerinin fazla olmasından dolayı daha çok zaman ve çaba gerektirir. Ancak bu denetleyiciler ile basit yapıli denetleyicilere göre daha kaliteli frekans kontrolü gerçekleştirilebilir. Bu yüzden farklı ve daha karmaşık yapılarda denetleyiciler YFK problemi için güç sistemlerine uygulanabilir.
- Amaç fonksiyonu, bir problemin çözümünü optimize etmek için kullanılan matematiksel bir fonksiyondur. Optimizasyon sürecinin başarısı, bu fonksiyonun doğru tanımlanmasına ve uygulanmasına bağlıdır. Literatürdeki belirli amaç fonksiyonları veya bunlardan oluşturulan farklı yapıdaki fonksiyonlar, güç sistemlerinde YFK için denetleyicilerin optimizasyonunda kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdel-Basset, M., Abdel-Fatah, L., & Sangaiah, A. K. (2018). Metaheuristic algorithms: A comprehensive review. *İçinde Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications* (ss. 185-231). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813314-9.00010-4>
- Aras, S., Gedikli, E., & Kahraman, H. T. (2021). A novel stochastic fractal search algorithm with fitness-Distance balance for global numerical optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100821>
- Askari, Q., Younas, I., & Saeed, M. (2020). Political Optimizer: A novel socio-inspired meta-heuristic for global optimization. *Knowledge-Based Systems*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2020.105709>
- Aslanov, T., Çavdar, B., Öztürk, Ö., & Başlık, Ş. (2023). *İki Alanlı Termal Güç Sisteminde AHA Tabanlı PID, FOPID ve FOPI-FOPD Denetleyicilerin Siber Saldırı Analizi*. <https://www.researchgate.net/publication/374113862>
- Awad, N. H., Ali, M. Z., Suganthan, P. N., Liang, J. J., & Qu, B. Y. (2016). *Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2017 Special Session and Competition on Single Objective Real-Parameter Numerical Optimization*. http://www.ntu.edu.sg/home/EPNSugan/index_files/CEC2017
- Bakır, H. (2022). *Uygunluk Mesafe Dengesi Tabanlı Sezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Güç Sistemi Problemlerine Uygulanması*. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Düzce.
- Bakır, H., Guvenc, U., Tolga Kahraman, H., & Duman, S. (2022). Improved Lévy flight distribution algorithm with FDB-based guiding mechanism for AVR system optimal design. *Computers and Industrial Engineering*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108032>
- Başlık, Ş., Çavdar, B., Öztürk, Ö., & Aslanov, T. (2023). *AVR Sistemi için ARO Tabanlı PID ve FOPID Denetleyici Tasarımı*. <https://www.researchgate.net/publication/374113855>
- Bevrani, Hassan. (2009). *Robust power system frequency control*. Springer.
- Cavdar, B., Sahin, E., & Nuroglu, F. (2022). SSA-based Fractional Order PI-PD Cascade Controller Design for DC Motor Speed Control. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1139517>

- 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), 4339-4360. <https://doi.org/10.1007/s00202-023-01943-y>
- Chen, G., Li, Z., Zhang, Z., & Li, S. (2020). An Improved ACO Algorithm Optimized Fuzzy PID Controller for Load Frequency Control in Multi Area Interconnected Power Systems. *IEEE Access*, 8, 6429-6447. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2960380>
- Chou, J. S., & Truong, D. N. (2021). A novel metaheuristic optimizer inspired by behavior of jellyfish in ocean. *Applied Mathematics and Computation*, 389. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125535>
- Cui, M., Zhao, Y., Cao, P., Tang, Y., & Lu, Y. (2023). Load frequency control of interconnected hydrothermal power system based on FOPI + FOPD controller. *International Journal of Dynamics and Control*. <https://doi.org/10.1007/s40435-023-01212-7>
- Çelik, E. (2021). Design of new fractional order PI–fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems. *Soft Computing*, 25(2), 1193-1217. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05215-w>
- Dahiya, P., & Saha, A. K. (2022). Frequency Regulation of Interconnected Power System Using Black Widow Optimization. *IEEE Access*, 10, 25219-25236. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3155201>
- Daraz, A., Malik, S. A., Basit, A., Aslam, S., & Zhang, G. (2023). Modified FOPID Controller for Frequency Regulation of a Hybrid Interconnected System of Conventional and Renewable Energy Sources. *Fractal and Fractional*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/fractalfract7010089>
- Davtalab, S., Tousi, B., & Nazarpour, D. (2022). Optimized Intelligent Coordinator for Load Frequency Control in a Two-Area System with PV Plant and Thermal Generator. *IETE Journal of Research*, 68(5), 3876-3886. <https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1782777>
- 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>
- 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>

- Elgerd, O. I., & Fosha, C. E. (1970). Optimum Megawatt-Frequency Control of Multiarea Electric Energy Systems. İçinde *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (Sayı 4).
- Enes, K. (2023). *Güç Sistemleri Denetleyici Parametrelerinin Uygunluk Mesafe Dengesi Tabanlı Sosyal Ağ Arama Algoritması Kullanılarak Belirlenmesi*. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Düzce.
- Fathy, A. (2022). A novel artificial hummingbird algorithm for integrating renewable based biomass distributed generators in radial distribution systems. *Applied Energy*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119605>
- Fister, I., Yang, X.-S., Fister, I., Brest, J., & Fister, D. (2013). *A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization*. <http://arxiv.org/abs/1307.4186>
- Friedman, M. (1937). The Use of Ranks to Avoid the Assumption of Normality Implicit in the Analysis of Variance. *Journal of the American Statistical Association*, 32(200), 675-701. <https://doi.org/10.1080/01621459.1937.10503522>
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *Simulation*, 76(2). <https://doi.org/10.1177/003754970107600201>
- Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2005). Metaheuristics in Combinatorial Optimization. İçinde *Annals of Operations Research* (C. 140).
- Gheisarnejad, M. (2018). An effective hybrid harmony search and cuckoo optimization algorithm based fuzzy PID controller for load frequency control. *Applied Soft Computing Journal*, 65, 121-138. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.01.007>
- Gheisarnejad, M., & Khooban, M. H. (2019). Design an optimal fuzzy fractional proportional integral derivative controller with derivative filter for load frequency control in power systems. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(9), 2563-2581. <https://doi.org/10.1177/0142331218804309>
- Glover, F. (1986). Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. İçinde *Cmpur. & 0~s. Res* (C. 13, Sayı 5).
- Gong, X., Yang, K., Dong, X., Jiang, X., Liu, D., & Luo, Z. (2023). Fractional Order PID Optimal Control Method of Regional Load Frequency Containing Pumped Storage Plants. *Energies*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/en16041703>
- Guha, D., Roy, P., & Banerjee, S. (2017). Quasi-oppositional symbiotic organism search algorithm applied to load frequency control. *Swarm and Evolutionary Computation*, 33, 46-67. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.10.001>

- Hasanien, H. M., & El-Fergany, A. A. (2019). Salp swarm algorithm-based optimal load frequency control of hybrid renewable power systems with communication delay and excitation cross-coupling effect. *Electric Power Systems Research*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105938>
- Hashim, F. A., Hussain, K., Houssein, E. H., Mabrouk, M. S., & Al-Atabany, W. (2021). Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Applied Intelligence*, 51(3), 1531-1551. <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z>
- Hote, Y. V., & Jain, S. (2018). PID controller design for load frequency control: Past, Present and future challenges. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 604-609. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.162>
- Hussain, K., Mohd Salleh, M. N., Cheng, S., & Shi, Y. (2019). Metaheuristic research: a comprehensive survey. *Artificial Intelligence Review*, 52(4), 2191-2233. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9605-z>
- I.H. Osman. (2003). Focused issue on applied meta-heuristics. *Computers & Industrial Engineering*.
- Kahraman, H. T., Aras, S., & Gedikli, E. (2020). *Fitness-distance balance (FDB): A new selection method for meta-heuristic search algorithms* ☆. 190, 105169. <https://doi.org/10.1016/j.knosys>
- Khadanga, R. K., Kumar, A., & Panda, S. (2020a). A hybrid shuffled frog-leaping and pattern search algorithm for load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 33(1). <https://doi.org/10.1002/jnm.2694>
- Khadanga, R. K., Kumar, A., & Panda, S. (2020b). A novel modified whale optimization algorithm for load frequency controller design of a two-area power system composing of PV grid and thermal generator. *Neural Computing and Applications*, 32(12), 8205-8216. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04321-7>
- Khadanga, R. K., Kumar, A., & Panda, S. (2022). A modified Grey Wolf Optimization with Cuckoo Search Algorithm for load frequency controller design of hybrid power system. *Applied Soft Computing*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109011>
- Kumar Sahu, R., Panda, S., Biswal, A., & Chandra Sekhar, G. T. (2016). Design and analysis of tilt integral derivative controller with filter for load frequency control of multi-area interconnected power systems. *ISA Transactions*, 61, 251-264. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.12.001>

- 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*. http://www.ntu.edu.sg/home/EPNSugan/index_files/CEC2014
- Liang, J., Suganthan, P. N., Yue, C. T., 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*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31746.02247>
- López-Vázquez, C., & Hochsztain, E. (2019). Extended and updated tables for the Friedman rank test. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 48(2), 268-281. <https://doi.org/10.1080/03610926.2017.1408829>
- McGill, R., Tukey, J. W., & Larsen, W. A. (1978). Variations of box plots. *American Statistician*, 32(1), 12-16. <https://doi.org/10.1080/00031305.1978.10479236>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Mohanty, B., Panda, S., & Hota, P. K. (2014). Controller parameters tuning of differential evolution algorithm and its application to load frequency control of multi-source power system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 54, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.029>
- Murugesan, D., Jagatheesan, K., Shah, P., & Sekhar, R. (2023). Fractional order PI λ D μ controller for microgrid power system using cohort intelligence optimization. *Results in Control and Optimization*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2023.100218>
- Padhan, S., Sahu, R. K., & Panda, S. (2014). Application of firefly algorithm for load frequency control of multi-area interconnected power system. *Electric Power Components and Systems*, 42(13), 1419-1430. <https://doi.org/10.1080/15325008.2014.933372>
- Padhy, S., & Panda, S. (2017). A hybrid stochastic fractal search and pattern search technique based cascade PI-PD controller for automatic generation control of multi-source power systems in presence of plug in electric vehicles. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 2(1), 12-25. <https://doi.org/10.1016/j.trit.2017.01.002>
- Padhy, S., Panda, S., & Mahapatra, S. (2017). A modified GWO technique based cascade PI-PD controller for AGC of power systems in presence of Plug in Electric Vehicles. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(2), 427-442. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.03.004>

- Ram Babu, N., Bhagat, S. K., Saikia, L. C., Chiranjeevi, T., Devarapalli, R., & García Márquez, F. P. (2023). A Comprehensive Review of Recent Strategies on Automatic Generation Control/Load Frequency Control in Power Systems. *Archives of Computational Methods in Engineering* (C. 30, Sayı 1, ss. 543-572). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09810-y>
- Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *CAD Computer Aided Design*, 43(3). <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.015>
- Sahin, E. (2020). Design of an Optimized Fractional High Order Differential Feedback Controller for Load Frequency Control of a Multi-Area Multi-Source Power System with Nonlinearity. *IEEE Access*, 8, 12327-12342. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2966261>
- Sahu, B. K., Pati, T. K., Nayak, J. R., Panda, S., & Kar, S. K. (2016). A novel hybrid LUS-TLBO optimized fuzzy-PID controller for load frequency control of multi-source power system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 74, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.07.020>
- Sahu, R. K., Panda, S., Rout, U. K., & Sahoo, D. K. (2016). Teaching learning based optimization algorithm for automatic generation control of power system using 2-DOF PID controller. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 77, 287-301. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.082>
- Shadman Abid, M., Apon, H. J., Morshed, K. A., & Ahmed, A. (2022). Optimal Planning of Multiple Renewable Energy-Integrated Distribution System With Uncertainties Using Artificial Hummingbird Algorithm. *IEEE Access*, 10, 40716-40730. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3167395>
- Shankar, R., Pradhan, S. R., Chatterjee, K., & Mandal, R. (2017). A comprehensive state of the art literature survey on LFC mechanism for power system. İçinde *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 76, ss. 1185-1207). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.064>
- Sharma, D., & Yadav, N. K. (2019). Lion Algorithm with Levy Update: Load frequency controlling scheme for two-area interconnected multi-source power system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(14), 4084-4099. <https://doi.org/10.1177/0142331219848033>
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Talatahari, S., & Azizi, M. (2021). Chaos Game Optimization: a novel metaheuristic algorithm. *Artificial Intelligence Review*, 54(2). <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09867-w>

- Wang, L., Cao, Q., Zhang, Z., Mirjalili, S., & Zhao, W. (2022). Artificial rabbits optimization: A new bio-inspired meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105082>
- Wu, G., Mallipeddi, R., & Suganthan, P. N. (2016). *Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2017 Competition and Special Session on Constrained Single Objective Real-Parameter Optimization*. <https://www.researchgate.net/publication/317228117>
- Xue, D., Chen, Y., Atherton, D. P., & Gu, G. (2009). Linear Feedback Control—Analysis and Design with Matlab. İçinde *IEEE Control Systems* (C. 29, Sayı 1). <https://doi.org/10.1109/MCS.2008.930839>
- Xue, D., Zhao, C., & Chen, Y. (2006). *A Modified Approximation Method of Fractional Order System*.
- Yue, C. T., Price, K. V, Suganthan, P. N., Liang, J. J., Ali, M. Z., Qu, B. Y., Awad, N. H., & Biswas, P. P. (2019). *Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2020 Special Session and Competition on Single Objective Bound Constrained Numerical Optimization*. <https://github.com/P-N-Suganthan>
- Zamani, A., Barakati, S. M., & Yousofi-Darmian, S. (2016). Design of a fractional order PID controller using GBMO algorithm for load–frequency control with governor saturation consideration. *ISA Transactions*, 64, 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.04.021>
- Zervoudakis, K., & Tsafarakis, S. (2020). A mayfly optimization algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106559>
- Zhao, W., Wang, L., & Mirjalili, S. (2022). Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 388. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.114194>
- Zhao, W., Zhang, Z., & Wang, L. (2020). Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103300>

7. EKLER

Ek 1: İki Alanlı Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi

İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi için kullanılan parametre değerleri aşağıdaki gibidir (Sahin, 2020):

$P_R=2000$ MW, $P_L=1000$ MW, $f=60$ Hz, $B_1=B_2=0.425$ p.u MW/Hz, $R_1=R_2=2.4$ Hz/pu, $T_g=0.08$ s, $T_t=0.3$ s, $K_{PS}=120$ Hz/pu, $T_{ps}=20$ s, $T_{12}=0.545$ pu.

Ek 2: İki Alanlı Çok Kaynaklı Güç Sistemi

İki alanlı çok kaynaklı güç sistemi için kullanılan parametre değerleri aşağıdaki gibidir (Çelik, 2021):

$B_1=B_2=0.4312$ pu MW/Hz, $R_1=R_2=2.4$ Hz/pu, $T_{sg}=0.08$ s, $K_r=0.3$ s, $T_r=10$ s, $T_t=0.3$ s, $T_{gh}=0.2$ s, $T_{RS}=5$ s, $T_{rh}=28.75$ s, $T_w=1$ s, $b_g=0.05$ s, $c_g=1$, $X_c=0.6$ s, $Y_c=1$ s, $T_{cr}=0.01$ s, $T_f=0.23$ s, $T_{cd}=0.2$ s, $K_T=0.543478$, $K_H=0.326084$, $K_G=0.130438$, $K_{ps}=68.9566$ Hz/pu, $T_{ps}=11.49$ s, $T_{12}=0.0433$ pu.

Ek 3: İki Alanlı FV-Termal Güç Sistemi

İki alanlı FV-termal güç sistemi için kullanılan parametre değerleri aşağıdaki gibidir (Cavdar vd., 2023):

$B=0.8$ pu MW/Hz, $R=2.5$ Hz/pu, $T_g=0.08$ s, $T_t=0.3$ s, $K_{ps}=120$ Hz/pu, $T_{ps}=20$ s, $T_{12}=0.545$ pu, $T_r=10$ s, $K_r=0.33$ s, $a=900$, $b=-18$, $c=100$, $d=50$ s.

ÖZGEÇMİŞ

Tural ASLAN, Burada liseyi 2015 yılında bitirdikten sonra 2016-2017 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2021 yılında bu bölümden mezun olduktan sonra aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. Orta-iyi derece İngilizce bilmektedir.

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