

**GÜÇ SİSTEMLERİ DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN
UYGUNLUK MESAFE DENGESİ TABANLI SOSYAL AĞ ARAMA
ALGORİTMASI KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

ENES KAYMAZ

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. UĞUR GÜVENÇ**

DÜZCE, 2023

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİ DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN
UYGUNLUK MESAFE DENGESİ TABANLI SOSYAL AĞ ARAMA
ALGORİTMASI KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Enes KAYMAZ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

Düzce Üniversitesi

Eş Danışman

Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Serhat DUMAN

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi

Doç. Dr. Emre ÇELİK

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DURSUN

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Muhsin Uğur DOĞAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 04/08/2023

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

4 Ağustos 2023

Enes KAYMAZ

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen eş danışmanım Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Değerli zamanlarını ayırarak tez çalışmasının kalitesini artırmaya yönelik katkıları, yapıcı yorumları ve süreç boyunca desteklerinden dolayı Doç. Dr. Serhat DUMAN ve Doç. Dr. Emre ÇELİK'e en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım. Doktora süreci boyunca desteklerini hissettiren Arş. Gör. Yunus HINISLIOĞLU'na en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2022.06.03.1281 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

4 Ağustos 2023

Enes KAYMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
EXTENDED ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ	1
2. YÖNTEM	9
2.1. META-SEZGİSEL ARAMA SÜRECİNE GENEL BAKIŞ.....	9
2.2. SOSYAL AĞ ARAMA ALGORİTMASI	11
2.3. UYGUNLUK-MESAFE DENGESİ SEÇİM YÖNTEMİ	15
2.4. ÖNERİLEN YÖNTEM: UYGUNLUK MESAFE DENGESİ TABANLI SOSYAL AĞ ARAMA ALGORİTMASI	16
3. ÖNERİLEN YÖNTEM İLE GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISI PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ.....	20
3.1. GENERATÖR VE UYARTIM SİSTEMLERİ	24
3.2. GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISI	25
3.3. DOĞRUSAL GÜÇ SİSTEMİ MODELİ	26
3.4. PROBLEMİN AMAÇ FONKSİYONU.....	27
4. ÖNERİLEN YÖNTEM İLE TCSC TABANLI DENETLEYİCİLERİN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ 29	
4.1. SMIB GÜÇ SİSTEMİNDE TCSC'NİN MODELLENMESİ	36
4.2. TCSC TABANLI DENETLEYİCİ YAPILARININ MODELLENMESİ.....	38
4.3. PROBLEMİN AMAÇ FONKSİYONU.....	40
5. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI.....	42
5.1. ÖNERİLEN ALGORİTMANIN CEC 2014 VE CEC 2017 KIYASLAMA PROBLEMLERİ İÇİN TEST EDİLMESİ.....	42
5.2. ÖNERİLEN ALGORİTMANIN EN UYGUN PSS PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ PROBLEMİ İÇİN TEST EDİLMESİ	48
5.2.1. Test Sistemi 1: WSCC 3-Makineli 9-Baralı Test Sistemi	50
5.2.1.1. Arızalı hattın hat açması:	50
5.2.1.2. Arızalı hattın düzeltilme durumu (hat açma olmadan):	51
5.2.2. Test Sistemi 2: New England 10-Makineli 39-Baralı Test Sistemi	54
5.2.2.1. Arızalı hattın hat açması:	55
5.2.2.2. Arızalı hattın düzeltilme durumu (hat açma olmadan):	55
5.2.3. Test Sistemi 1 ve Test Sistemi 2 için İstatistiksel Analiz Sonuçları	59

5.2.4. Test Sistemleri için Elde Edilen Sistem Yanıtları	62
5.2.4.1. Test Sistemi 1 için Sistem Yanıtları:.....	62
5.2.4.2. Test Sistemi 2 için Sistem Yanıtları:.....	74
5.2.4.3. Performans İndeksleri ve Sağlamlık Analizi:.....	85
5.3. ÖNERİLEN ALGORİTMANIN TCSC TABANLI DENETLEYİCİLERİN EN UYGUN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ PROBLEMİ İÇİN TEST EDİLMESİ	88
5.3.1. Durum 1: TCSC Tabanlı LL Denetleyicisi (Nominal Yüklenme Koşulu)	90
5.3.2. Durum 2: TCSC Tabanlı PID Denetleyicisi (Nominal Yüklenme Koşulu)	95
5.3.3. Durum 3: TCSC Tabanlı LL Denetleyicisi (Farklı Yüklenme Koşulları)	100
5.3.4. Durum 4: TCSC Tabanlı PID Denetleyicisi (Farklı Yüklenme Koşulları)	108
6. SONUÇ	118
7. KAYNAKLAR.....	120
8. EKLER	129
8.1. EK 1: K_1 - K_6 SABİTLERİNİN DENKLEMLERİ	129
8.2. EK 2: IEEE CEC 2014 KIYASLAMA PROBLEMLERİ.....	130
8.3. EK 3:IEEE CEC2017 KIYASLAMA PROBLEMLERİ	131
ÖZGEÇMİŞ.....	133

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Sosyal ağ yapısının genel biçimi.	11
Şekil 2.2. Taklit aşaması genel süreci.	12
Şekil 2.3. Sohbet aşaması genel süreci.	13
Şekil 2.4. Tartışma aşaması genel süreci.	13
Şekil 2.5. Yenilik (İnovasyon) aşaması genel süreci.	14
Şekil 2.6. FDBSNS algoritmasının akış diyagramı.	19
Şekil 3.1. Çok makineli güç sisteminde Heffron -Philips modeli.	24
Şekil 3.2. IEEE Type-ST1 uyarım sistemi entegreli PSS'nin blok şeması.	26
Şekil 3.3. FDBSNS algoritması kullanılarak en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi adımları.	28
Şekil 4.1. TCSC entegreli SMIB güç sistemi.	36
Şekil 4.2. TCSC tabanlı LL denetleyici yapısı.	39
Şekil 4.3. TCSC tabanlı PID denetleyici yapısı.	39
Şekil 5.1. WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi.	50
Şekil 5.2. Test Sistemi 1 için amaç fonksiyonunun (J) yakınsama eğrisi.	52
Şekil 5.3. New England 10-Makineli 39-Baralı test sistemi.	54
Şekil 5.4. Test sistemi 2 için amaç fonksiyonunun (J) yakınsama eğrisi.	57
Şekil 5.5. Test Sistemi 1 (a) ve Test Sistemi 2 (b) için kutu grafikleri.	61
Şekil 5.6. Senaryo 1: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta 2- \delta 1$, (b) $\delta 3- \delta 1$, (c) $\omega 2- \omega 1$ (d) $\omega 3- \omega 1$	66
Şekil 5.7. Senaryo 1: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $Pe1$, (b) $Pe2$, (c) $Pe3$	67
Şekil 5.8. Senaryo 2: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta 2- \delta 1$, (b) $\delta 3- \delta 1$, (c) $\omega 2- \omega 1$ (d) $\omega 3- \omega 1$	68
Şekil 5.9. Senaryo 2: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $Pe1$, (b) $Pe2$, (c) $Pe3$	69
Şekil 5.10. Senaryo 3: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta 2- \delta 1$, (b) $\delta 3- \delta 1$, (c) $\omega 2- \omega 1$ (d) $\omega 3- \omega 1$	70
Şekil 5.11. Senaryo 3: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $Pe1$, (b) $Pe2$, (c) $Pe3$	71
Şekil 5.12. Senaryo 4: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta 2- \delta 1$, (b) $\delta 3- \delta 1$, (c) $\omega 2- \omega 1$ (d) $\omega 3- \omega 1$	72
Şekil 5.13. Senaryo 4: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $Pe1$, (b) $Pe2$, (c) $Pe3$	73
Şekil 5.14. Senaryo 1: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta 6- \delta 1$, (b) $\delta 7- \delta 1$, (c) $\omega 6- \omega 1$ (d) $\omega 7- \omega 1$	77
Şekil 5.15. Senaryo 1: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $Pe6$ ve (b) $Pe7$	78
Şekil 5.16. Senaryo 2: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta 6- \delta 1$, (b) $\delta 7- \delta 1$, (c) $\omega 6- \omega 1$ (d) $\omega 7- \omega 1$	79
Şekil 5.17. Senaryo 2: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $Pe6$ ve (b) $Pe7$	80
Şekil 5.18. Senaryo 3: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta 8- \delta 1$, (b) $\delta 10- \delta 1$, (c) $\omega 8- \omega 1$ (d) $\omega 10- \omega 1$	81
Şekil 5.19. Senaryo3: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $Pe8$ ve (b) $Pe10$	82

Şekil 5.20. Senaryo 4: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi zaman yanıtları (a) $\delta 8- \delta 1$, (b) $\delta 10- \delta 1$, (c) $\omega 8- \omega 1$ (d) $\omega 10- \omega 1$	83
Şekil 5.21. Senaryo 4: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $Pe 8$ ve (b) $Pe 10$	84
Şekil 5.22. Durum 1 için uygunluk değerinin yakınsama eğrisi.	91
Şekil 5.23. Durum 1 için kutu grafikleri.	93
Şekil 5.24. Durum 1 için güç açısı (δ) yanıtı (a) ve X_{TCSC} grafiği (b).	94
Şekil 5.25. Durum 2 için uygunluk değerinin yakınsama eğrisi.	95
Şekil 5.26. Durum 2 için kutu grafikleri	97
Şekil 5.27. Durum 2 için güç açısı (δ) yanıtı (a) ve X_{TCSC} grafiği (b).	99
Şekil 5.28. Durum 3 için uygunluk değeri yakınsama eğrisi.	101
Şekil 5.29. Durum 3 için kutu grafikleri	103
Şekil 5.30. Durum 3 - Senaryo 1 için güç açısı (δ) yanıtı.	104
Şekil 5.31. Durum 3 - Senaryo 2 için güç açısı (δ) yanıtı	105
Şekil 5.32. Durum 3 - Senaryo 3 için güç açısı (δ) yanıtı	105
Şekil 5.33. Durum 3 - Senaryo 1 için X_{TCSC} grafiği.	106
Şekil 5.34. Durum 3 - Senaryo 2 için X_{TCSC} grafiği	107
Şekil 5.35. Durum 3 - Senaryo 3 için X_{TCSC} grafiği.	107
Şekil 5.36. Durum 4 için uygunluk değeri yakınsama eğrisi.	109
Şekil 5.37. Durum 4 için kutu grafikleri.	111
Şekil 5.38. Durum 4 - Senaryo 1 için güç açısı (δ) yanıtı.	112
Şekil 5.39. Durum 4 - Senaryo 2 için güç açısı (δ) yanıtı.	112
Şekil 5.40. Durum 4 - Senaryo 3 için güç açısı (δ) yanıtı.	113
Şekil 5.41. Durum 4 - Senaryo 1 için X_{TCSC} grafiği.	114
Şekil 5.42. Durum 4 - Senaryo 2 için X_{TCSC} grafiği	114
Şekil 5.43. Durum 4 - Senaryo 3 için X_{TCSC} grafiği.	115

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. MSA algoritmalarında arama sürecinin genel adımları.....	10
Çizelge 5.1. CEC 2014 için FDBSNS ve SNS'nin karşılaştırmalı sonuçları.	43
Çizelge 5.2. CEC 2017 için FDBSNS ve SNS'nin karşılaştırmalı sonuçları.	44
Çizelge 5.3. FDBSNS ve SNS algoritmalarının CEC 2014 ve CEC 2017 için Wilcoxon İstatistiksel Analizi ile karşılaştırılması.	45
Çizelge 5.4. Test sistemleri için Heffron - Philips parametreleri [47],[89].	49
Çizelge 5.5. Test sistemi 1 için elde edilen en uygun PSS parametreleri.	51
Çizelge 5.6. Test sistemi 2 için elde edilen en uygun PSS parametreleri.	56
Çizelge 5.7. Test sistemi 1 ve Test sistemi 2 için tüm MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri.	59
Çizelge 5.8. FDBSNS ve rakip MSA algoritmaları için Friedman puanları.	60
Çizelge 5.9. Test sistemi 1 için zaman alanı analizinde minimum hata sinyalinin türev değerleri.....	64
Çizelge 5.10. Test sistemi 2 için zaman alanı analizinde minimum hata sinyalinin türev değerleri.	76
Çizelge 5.11. Test sistemi 1'deki tüm algoritmalar için performans indeksi değerleri.	86
Çizelge 5.12. Test sistemi 2'deki tüm algoritmalar için performans indeksi değerleri.	87
Çizelge 5.13. SMIB güç sistemi verileri [91].	89
Çizelge 5.14. Deneysel çalışmada kullanılan farklı yüklenme koşulları.	90
Çizelge 5.15. Durum 1 için optimum parametrelere bağlı olarak hesaplanan uygunluk değerleri.....	91
Çizelge 5.16. Durum 2 için optimum parametrelere bağlı olarak hesaplanan uygunluk değerleri.....	96
Çizelge 5.17. Durum 3 için optimum parametrelere bağlı olarak hesaplanan uygunluk değerleri.....	101
Çizelge 5.18. Durum 4 için optimum parametrelere bağlı olarak hesaplanan uygunluk değerleri.....	109
Çizelge 5.19. Dört farklı test çalışması için Friedman İstatistiksel Analizi sonuçları. .	117
Çizelge 5.20. Dört farklı test çalışması için Wilcoxon İstatistiksel Analizi sonuçları. .	117
Çizelge 8.1. CEC 2014 test fonksiyonları.....	130
Çizelge 8.2. CEC 2017 test fonksiyonları.....	131

KISALTMALAR

ABC	Artificial Bee Colony
ACO	Ant Colony Optimization
AGDE	Adaptive Guided Differential Evolution Algorithm
AGSK	Adaptive Gaining-Sharing Knowledge
AGWO	Amended Grey Wolf Optimization
APGSK	Gaining-Sharing Knowledge-Based Algorithm with Adaptive Parameters
APGSK-IMODE	Gaining-Sharing Knowledge-Based Algorithm with Adaptive Parameters Hybrid with Improving Multi-Objective Differential Evolutionary
AVR	Automatic Voltage Regulator
BA	Bat Algorithm
BBO	Biogeography-Based Optimization
BF	Bacterial Foraging
BSO	Bacterial Swarm Optimization
CEC	Congress on Evolutionary Computation
CS	Cuckoo Search
CO	Chaotic Optimizaiton
COA	Coyote Optimization Algorithm
CPSS	Conventional Power System Stabilizer
CSOA	Chaotic Sunflower Optimization
CTLA	Chaotic Teaching-Learning Algorithm
DE	Differential Evolution
ES	Evolution Strategy
EFO	Electromagnetic Field Optimization
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
FDB	Fitness-Distance Balance
FDBSNS	Fitness-Distance Balance-Based Social Network Search
FFA	Farmland Fertility Algorithm
GA	Genetic Algorithm
GSA	Gravitational Search Algorithm
GWO	Grey Wolf Optimization
HBMO	Honey Bee Mating Optimization
IMODE	Improving Multi-Objective Differential Evolutionary
IAE	The Integral of the Absolute magnitude of the Error
IHSA	Improved Harmony Search Algorithm
ITAE	The Integral of Time multiplied by Absolute Error
ISE	The Integral of Square of the Error
ISTSE	The Integral of Squared Time multiplied by Squared Error
ITSE	The Integral of Time multiplied by the Squarred Error
IWOA	Improved Whale Optimization
LFO	Low-Frequency Oscillations
LL	Lead-Lag
LSHADE	Linear Population Size Reduction Success History Based Adaptive Differential Evolution
LQR	Linear Quadratic Regulator
MSA	Meta-Sezgisel Arama
MFO	Moth Flame Optimization
NSGA II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II
OIO	Optics Inspired Optimization

SNS	Social Network Search
SVC	Static Var Compensator
PSS	Power System Stabilizer
PID	Proportional-Integral- Derivative
PSO	Particle Swarm Optimization
RBBF	Rule-Based Bacteria Foraging
RSA	Reptile Search Algorithm
SA	Simulated Annealing
SCA	Sine-Cos Algorithm
SFS	Stochastic Fractal Search
SMIB	Single Machine Infinite Bus
SOS	Symbiotic Organism Search
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
TG	Turbine Governor
TS	Tabu Search
TLBO	Teaching Learning Based Optimization
TLABC	Teaching Learning Based Artificial Bee Colony
UPFC	Unified Power Flow Controller
VURPSO	Velocity Update Relaxation Particle Swarm Optimization

SİMGELER

AF	Kabul Faktörü
D_i	i Makinesinin Sönümleme Katsayısı
D_p	Popülasyonun Mesafe Vektörü
D	Kullanıcıların Konumları (Görüşleri) Arasındaki Fark
e	Hata Sinyali
E_{fd}	Uyartım Sistemi Gerilimi
E'_q	q -Ekseni İç Gerilimi
f_v	Çözüm Adaylarının Uygunluk Değerleri
$g(x)$	Eşitlik Kısıtlaması
$h(x)$	Eşitsizlik Kısıtlaması
i_{di}	d -Ekseni Armatür Akımı
J	Amaç Fonksiyonu
k	Kompanzasyon Oranı
K_{Ai}	Uyartım Sistemi Kazanç Sabiti
$K_{pss,i}$	PSS Kazancı
K_T^{max}	Kazanç Değerinin Üst Sınırı
K_T^{min}	Kazanç Değerinin Alt Sınırı
LB	Minimum Değişken Vektörü
m	Generatör Sayısı
M	Kullanıcıların Görüşlerinin Ortalama Değeri
M_i	i Makinesinin Atalet Sabiti
n_{new}^d	d -Boyutu İçin Yeni Bir Görüş
NFEs	Toplam Uygunluk Fonksiyonu Değerlendirme Sayısı
N_{user}	Kullanıcı Sayısı
P	Çözüm Adaylarının Popülasyonu
P_{mi}	i Makinesinin Mekanik Giriş Gücü
P_{ei}	i Makinesinin Elektriksel Çıkış Gücü
R	Şok Yarıçapı
r	Popülerlik Yarıçapı
S_p	Popülasyonun Puan Vektörü
T_{iT}^{max}	Zaman Sabitinin Üst Sınırı
T_{iT}^{min}	Zaman Sabitinin Alt Sınırı
T'_{do}	Açık Devre d -Ekseni Zaman Sabiti
T_{ei}	Uyartım Sistemi Zaman Sabiti
T_{Ai}	Uyartım Sistemi Zaman Sabiti
T_{wi}	Temizleme Bloğu Zaman Sabiti
$T_{1i} - T_{4i}$	Faz Kompanzatör Bloğu İçin Zaman Sabitleri
t_{sim}	Simülasyon Süresi
UB	Maksimum Değişken Vektörü
$u_{pss,i}$	PSS Çıkış Sinyali
v_{ref}	Referans Gerilimi
v_{pss}	PSS Giriş Gerilimi
v_t	Terminal Gerilimi
V_T	Generatör Terminali
V_B	Sonsuz Bara Gerilimi
Y	Admitans Değeri
Z	Empedans Değeri
X_0	Kullanıcının Başlangıç Konumu (Görüşü)

X_C	Sabit Kapasitörün Nominal Reaktansı
X_L	Sabit Kondansatöre Paralel Bağlı İndüktörün Endüktif Reaktansı
x_i	i 'ninci Çözüm Adayı
X_i	i Kullanıcısının Konum Vektörü
X_{inew}	Yeni Kullanıcı Konumu (Görüşü)
X_j	j Kullanıcısının Konum Vektörü
x'_{di}	d -Ekseni Geçici Durum Reaktansı
x'_{qi}	q -Ekseni Geçici Durum Reaktansı
X_T	Transformatör Reaktansı
X_{TCSC}	TCSC Reaktansı
$X_{TCSC}(\alpha)$	TCSC'nin α Ateşleme Açısındaki Reaktansı
ω_i	i Makinesinin Açısız Hızı
ω_{i-1}	i Generatörünün Birinci Generatöre Göre Bağlı Rotor Hızı
σ	TCSC Denetleyicisinin İletim Açısı
σ_0	İlk İletim Açısı
δ_i	i Makinesinin Rotor Açısı
Δu	Çıkış Sinyali
Δx	Giriş Sinyali
$\Delta \omega_i$	Hız Sapması
$\Delta \sigma$	İletim Açısındaki Değişim

ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİ DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN UYGUNLUK MESAFE DENGESİ TABANLI SOSYAL AĞ ARAMA ALGORİTMASI KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Enes KAYMAZ

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

Ağustos 2023, 132 sayfa

Bu tez çalışmasında, modern güç sistemlerinin güvenli bir şekilde çalışmasında kritik bir öneme sahip olan ve geçici durum kararlılık analizi probleminin çözümünde kullanılan denetleyicilerin, en uygun parametrelerinin belirlenmesini sağlamak amacıyla uygunluk-mesafe dengesi (Fitness-Distance Balance, FDB) tabanlı sosyal ağ arama (Social Network Search, SNS) algoritması (FDBSNS) geliştirilmiştir. Bu kapsamda tez çalışması, üç genel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, zayıf keşif-sömürü yeteneği ve erken yakınsama problemleri nedeniyle SNS algoritması, FDB seçim yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. FDB yöntemi, SNS algoritmasındaki arama sürecinde çözüm adaylarının uygunluk ve mesafe değerlerini dikkate alarak daha verimli bir şekilde seçilmesini sağlamaktadır. Bu doğrultuda, geliştirilen FDBSNS algoritmasının performansı IEEE CEC 2014 ve CEC 2017 kıyaslama problemleri kullanılarak test edilmiştir. İkinci aşamada, FDBSNS algoritması güç sistemlerinde geçici durum kararlılığının sağlanması amacıyla güç sistemi kararlı kılıcısının (Power System Stabilizer, PSS) en uygun parametrelerinin belirlenmesi problemine uygulanmıştır. Çalışmada, FDBSNS'nin yanı sıra 10 farklı güncel ve etkili rakip Meta-Sezgisel Arama (MSA) algoritması kullanılarak PSS parametrelerinin en uygun değerleri belirlenmiştir. Sonrasında, belirlenen amaç fonksiyonuna göre elde edilen uygunluk değerleri, çeşitli istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, FDBSNS'nin etkisi, çeşitli arıza senaryosu durumları için zaman alanı analizleri gerçekleştirilerek WSCC 3-Makineli 9-Baralı ve New England 10-Makineli 39-Baralı test sistemlerinde incelenmiştir. Üçüncü aşamada ise, FDBSNS , güç sistemlerinde geçici durum kararlılığının sağlanması amacıyla TCSC tabanlı denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümünde kullanılmıştır. Problemin çözümünde FDBSNS'nin yanı sıra 11 farklı güncel ve etkili rakip algoritma kullanılarak TCSC tabanlı faz ilerlemeli-faz gerilemeli (Lead- Lag, LL) ve TCSC tabanlı orantılı-integral-türev (Proportional-Integral-Derivative, PID) denetleyicilere ait parametrelerin en uygun değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, FDBSNS'nin problemin çözümündeki etkisi tek makineli sonsuz baralı (Single Machine Infinite Bus, SMIB) bir güç sisteminde belirlenen arıza durumu ve farklı yüklenme senaryoları için uygunluk değerleri, istatistiksel analizler ve zaman alanı analizleri açısından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen FDBSNS'nin kıyaslama problemlerinin çözümünde ve denetleyici parametrelerinin en uygun değerleri elde edilerek geçici durum kararlılığının sağlanması konusunda, rakip algoritmaların tamamına kıyasla üstünlük sağladığını göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Güç sistemi denetleyicilerinin optimizasyonu, Sosyal ağ arama algoritması, Uygunluk-mesafe dengesi seçim yöntemi.

ABSTRACT

DETERMINATION OF POWER SYSTEM CONTROLLER PARAMETERS USING FITNESS DISTANCE BALANCE BASED SOCIAL NETWORK SEARCH ALGORITHM

Enes KAYMAZ

Düzce University

Graduate School, Department of Electrical-Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

August 2023, 132 pages

In this thesis study, in order to determine optimal parameters of the controllers, which are of crucial importance in the safe operation of modern power systems and used in the solution of the transient stability analysis problem, the fitness-distance balance (FDB) based Social Network Search, (SNS) Algorithm (FDBSNS) has been improved. In this context, the thesis study consists of three general stages. In the first stage, the SNS algorithm was developed using the FDB selection method due to its insufficient exploration-exploitation capability and early convergence problems. The FDB method enables the solution candidates to be selected more efficiently by considering the fitness and distance values in the search process in the SNS algorithm. Accordingly, the performance of the improved FDBSNS algorithm was tested using IEEE CEC 2014 and CEC 2017 benchmark problems. In the second stage, the FDBSNS algorithm is applied to the problem of determining the optimal parameters of the Power System Stabilizers (PSS) in order to provide transient stability in power systems. In solving the problem, PSS parameters were optimized by using 10-different up-to-date and effective competitor Meta-Heuristic Search (MHS) algorithms in addition to the proposed FDBSNS algorithm. Afterward, the fitness values obtained by MSA algorithms according to the proposed objective function were compared using various statistical analysis methods. In addition, the effect of FDBSNS was tested in the WSCC 3-Machine 9-Bus and New England 10-Machine 39-Bus test systems by conducting time domain analyses for the various fault scenarios. In the third stage, the FDBSNS is used to solve the problem of determining the optimal parameters of TCSC-based Controllers problem in order to provide transient stability in power systems. In the solution of the problem, the parameters of TCSC-based Lead-Lag (LL) and TCSC-based Proportional-Integral-Derivative, (PID) controllers were optimized by using 11 different up-to-date and effective competitor algorithms as well as FDBSNS. In addition, the effect of the FDBSNS on the solution of the problem has been investigated in terms of statistical analyzes and time domain analyses for the fault condition and different loading scenarios determined in a Single Machine Infinite Bus (SMIB) power system. When the results obtained are examined comprehensively, it is seen that the improved FDBSNS provides a superiority to all the competitor algorithms in solving the benchmark problems and in ensuring transient stability by optimizing the controller parameters in power systems.

Keywords: Fitness-distance balance selection method, Social network search algorithm, Optimization of power system controllers.

EXTENDED ABSTRACT

DETERMINATION OF POWER SYSTEM CONTROLLER PARAMETERS USING FITNESS DISTANCE BALANCE BASED SOCIAL NETWORK SEARCH ALGORITHM

Enes KAYMAZ

Düzce University

Graduate School, Department of Electrical-Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

August 2023, 132 pages

1. INTRODUCTION

Optimization is the process of obtaining optimal decision variables to minimize or maximize a problem by considering various constraints. Nowadays, due to the increasing complexity of non-convex, non-linear, and high-dimensional real-world engineering problems, it has become inevitable to solve these problems with meta-heuristic optimization algorithms. Therefore, in this thesis study, two main issues are emphasized. The first is to improve a new algorithm for solving real-world engineering problems using the FDB selection method. Secondly, with this proposed algorithm, optimal parameters of different controller types used to improve transient stability in power systems are achieved.

2. MATERIAL AND METHODS

In this thesis study, a novel metaheuristic optimization algorithm, FDBSNS, was improved to solve global optimization problems. In the optimization process, the two most important criteria for the success of MSA algorithms are selection and search strategies. In the selection strategy, guide search agents are selected that determines the direction of the search process, while the search strategy consists of exploration and exploitation tasks. In this thesis study, the SNS algorithm, inspired by users' interactive behaviors to increase their popularity in social networks, could not reach the global optimum solution due to the inability to provide an effective balance between discovery and exploitation and the early convergence problem. For this reason, FDB, one of the most effective selection methods of recent times, was used to improve the exploration and balanced search capabilities of the SNS algorithm for a successful optimization process, and the FDBSNS algorithm was proposed to solve optimization problems. The proposed FDBSNS algorithm was used for different types of benchmark problems in CEC

2014 and CEC 2017 and tested for different dimensional search spaces, and outperformed the SNS algorithm in experimental studies. Afterward, the FDBSNS algorithm, which was developed based on these results, was used to optimize the parameters of PSS, TCSC-based LL, and TCSC-based PID controllers, which are used to improve transient stability in power systems. The obtained results were evaluated regarding fitness values, various statistical analyses, and time domain analysis.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Experimental studies carried out in this study consist of three parts. In the first part, the developed FDBSNS algorithm and the basic SNS algorithm are analyzed in terms of solving the CEC 2014 and CEC 2017 benchmarking problems. The exploration, exploitation, and balanced search capabilities of the enhanced FDBSNS algorithm were first tested in solving unimodal, multimodal, hybrid, and composition-type problems in CEC 2014 and CEC 2017 benchmark problems. The test run was conducted for 50 independent runs for 30 dimensions in CEC 2014 benchmark problems and 51 independent runs for 10, 30, 50, and 100 dimensions in CEC2017 benchmark problems. The results obtained for benchmark problems with the improved FDBSNS algorithm and the basic SNS algorithm were compared with Wilcoxon statistical analysis. According to the results obtained in CEC 2014 and CEC 2017 benchmarking problems, the FDBSNS algorithm clearly outperformed SNS in terms of minimum, mean, maximum and standard deviation values, showing strong variation in both unimodal and multimodal type problems. Then, inspired by the effective performance obtained in solving the benchmark problems, the FDBSNS algorithm is used to obtain the optimal parameters of different controller types to improve transient stability in power systems. Accordingly, in the first stage, the problem of determining the optimal parameters of PSS controllers in power systems is solved using the FDBSNS algorithm. In the solution of the problem, the results obtained with FDBSNS and 10 different up-to-date meta-heuristic optimization algorithms were compared in terms of fitness values, statistical analysis, time domain analysis, and various performance indices. In the WSCC 3-Machine 9-Bus test system, FDBSNS ranks first in minimum fitness value and is approximately 0.104% better than its closest competitor SNS and APGSK-IMODE algorithms. Regarding maximum values, FDBSNS achieved 1,14% and 2,07% more effective solution performance than its closest competitors, IMODE and SNS, respectively. When compared in terms of mean and median values, it is seen that FDBSNS gives 0,41% and 0,21% better results than its

closest competitor, APGSK-IMODE. In the New England 10-machine 39-Bus test system, FDBSNS ranks first in minimum fitness value and is approximately 6,14% better than its closest competitor, the BBO algorithm. Regarding maximum values, FDBSNS achieved 6,44% more effective solution performance than its closest competitor, BBO. When compared in terms of mean and median values, it is seen that FDBSNS gives 7,08% and 6,88% better results than its closest competitor, BBO. On the other hand, the FDBSNS gave more effective results in terms of Friedman statistical analysis, box-plot charts, and time domain analysis compared to competing algorithms in solving the problem. After the effective performance of FDBSNS for this power system problem, in the next stage, a test study was conducted in which the proposed algorithm was used to optimize the parameters of TCSC-based LL and PID controllers to improve the transient stability in power systems. In the test study on a single-machine infinite bus power system, the parameters of TCSC-based LL and PID controllers were optimized with FDBSNS and 11 different competitor algorithms considering the proposed objective function approaches, the determined fault condition, and different loading conditions. When the results obtained were evaluated in terms of fitness values, statistical analyses, and time domain analysis, the effectiveness of the FDBSNS was verified again in this experimental study.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

Based on the results obtained from this thesis, it can be deduced that the FDB-based method significantly improves the search performance of SNS, a population-based algorithm. In the study, the search strategy of the SNS algorithm was redesigned using the FDB selection method. The performance of the FDBSNS algorithm has been compared with some of the most successful algorithms in recent CEC competitions and up-to-date metaheuristic algorithms, for comprehensive benchmark and power systems problems. When the obtained results are evaluated in terms of fitness values and statistical analyses or performance indices and time domain analyses, it can be said that FDBSNS provides stable and robust performance for benchmark problems and power systems optimization problems. In this regard, the FDBSNS algorithm developed in this thesis study can be developed by researchers using different hybrid methods, or different controller structures and renewable energy sources in power systems can be included in the system to perform further studies related to improving transient stability.

1. GİRİŞ

Optimizasyon, belirlenen bir amaç fonksiyonunun çeşitli eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları dikkate alınarak minimize edilmesi veya maksimize edilmesi amacıyla tasarım parametresi değerlerinin belirlenmesi sürecidir [1], [2]. Mühendislik, ekonomi, işletme, finans ve ulaşım gibi çok sayıda farklı bilimsel alanda kullanılmasının yanı sıra günlük yaşamda da sıklıkla optimizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Bir yatırımcının minimum risk ile maksimum kazanç sağlamaya çalışması, belirli bir bütçe için en iyi uçuşun aranması veya zamandan tasarruf etmeye çalışılarak en uygun gezi rotasının belirlenmesi gibi durumlar günlük yaşamdan bazı optimizasyon örnekleridir [3], [4]. Bir optimizasyon probleminin çözümünde verimlilik ve kalite maksimum düzeye çıkarılırken; maliyet, zaman ve riskin minimum düzeye indirilmesi gerekir. Bunu gerçekleştirebilmek amacıyla, belirli bir probleme karşılık gelen uygunluk fonksiyonu değerinin minimum seviyeye indirilmesi veya maksimum seviyeye çıkarılması için arama uzayı içerisinde aday çözümler aranır. Optimizasyon sürecinde amaç, aday çözümlerin keşfedilmesi ve mümkün olan en iyi çözüme ulaşılmasıdır [5], [6].

Teknolojide meydana gelen gelişmeler doğrultusunda, endüstri ve bilimdeki gerçek yaşam optimizasyon problemlerinin karmaşıklığı, boyutu ve zorluğu son dönemlerde önemli ölçüde artmıştır. Bu optimizasyon problemlerinin büyük çoğunluğu doğrusal olmamakla birlikte farklı karar değişkenleri içerir ve çeşitli kısıtlamalara sahip olabilir. Ayrıca yüksek boyutlu optimizasyon problemlerinin çözümünde arama uzayının boyutu da önemli ölçüde artar. Bahsedilen bu durumlar, optimizasyon probleminin çözümünü zorlaştıran etkenler olup, kullanılan optimizasyon algoritmaları problemlerin çözüm kalitesinde son derece önemli bir rol oynar. Optimizasyon algoritmaları genel olarak deterministik ve stokastik yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır [7]. Deterministik algoritmalar kural tabanlı olup, genellikle en uygun çözüm imkanını garanti etmelerine rağmen, bu algoritmalar amaç fonksiyonun eğiminin veya türevinin kullanıldığı gradyan tabanlı yöntemler olmaları nedeniyle yüksek boyutlu optimizasyon problemlerinde yerel optimum noktaya takılma ve yüksek hesaplama maliyeti gibi olumsuz özelliklere de sahiptir [8], [9]. Bunun aksine, stokastik algoritmalar ise başlangıç koşulları aynı olsa bile rastgele çözüm adayları üreten ve en uygun çözümlerin algoritmanın her çalışmasında

büyük olasılıkla farklı olduğu yöntemlerdir. Stokastik algoritmaların en uygun çözümleri garanti etmeseler de gradyan içermeyen yöntemler olmaları ve makul bir hesaplama maliyeti için tatmin edici çözümlere ulaşabilmeleri gibi özellikleri, bu algoritmaları bazı optimizasyon problemlerinin çözümünde ideal kılar. Stokastik algoritmalar sezgisel arama ve meta-sezgisel arama (MSA) algoritmaları olmak üzere iki temel gruba ayrılır. Bu iki kategori arasında belirgin bir fark olmamasına rağmen, araştırmacılar arasında MSA'ların daha gelişmiş yöntemler olduğu konusunda ortak bir görüş söz konusudur. MSA'lar özellikle karmaşık problemler için çözüm kalitesi ve hesaplama süresi gibi özellikleri bakımından, geleneksel optimizasyon yöntemlerine kıyasla daha üstündür. MSA algoritmaları genellikle ilk çözüm tahmini gerektirmezler ve doğrusal olmayan, türevlenemeyen karmaşık optimizasyon problemleri için geleneksel ve deterministik optimizasyon teknikleriyle karşılaştırıldığında daha esnek ve verimli yöntemlerdir [10], [11]. Bu algoritmalar, yüksek düzeyde soyutlama özellikleri sayesinde problemten bağımsız olup, gerçek dünya optimizasyon problemlerinin çözümü için son derece uygun yöntemlerdir [7], [12]. Genel olarak, MSA algoritmaları tek çözüm tabanlı ve popülasyon tabanlı olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Örneğin, benzetimli tavlama (Simulated Annealing, SA) [13] tek çözüm tabanlı bir MSA algoritması iken, genetik algoritma (Genetic Algorithm, GA) [14] popülasyon tabanlı algoritmalar arasındadır. Tek çözüm tabanlı algoritmalarda, optimizasyon süreci sadece bir çözüm üzerinden ilerlerken, popülasyon tabanlı algoritmalarda ise bir dizi çözüm kullanılır. Popülasyon tabanlı algoritmalar kullanılarak optimum çözüm ile aynı olabilecek bir çözüm veya komşuluğunda bir alt en uygun çözüm elde edilebilir.

Popülasyon tabanlı MSA algoritmaları, canlı organizmaların biyolojik davranışlarını taklit eder veya fiziksel kanunlardan ilham alır. Bu tür algoritmaların optimizasyon sürecinde, popülasyonda yer alan bireylerden her biri, aday bir çözümü temsil eder ve stokastik operatörler kullanılarak mevcut popülasyon yeni bir popülasyon ile iterasyonlara bağlı olarak durdurma kriteri sağlanana kadar güncellenir. Bu algoritmaları evrimsel tabanlı, sürü zekası tabanlı, fizik/kimya tabanlı ve sosyal-insan davranışı gibi yaklaşımlardan ilham alma durumlarına göre sınıflandırmak mümkündür [15]-[17]. Örneğin, diferansiyel evrim (Differential Evolution, DE) [18] ve evrim stratejisi (Evolution Strategy, ES) [19] algoritmaları çaprazlama, mutasyon ve seçim gibi biyolojik davranışlardan ilham alan evrimsel tabanlı algoritmalar. Sürü zekası tabanlı algoritmalar, sürüler halinde yaşayan canlıların sosyal davranışlarından ilham alır. Yapay

arı kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC) [20], karınca kolonisi optimizasyonu (Ant Colony Optimization, ACO) [21], gri kurt optimizasyon algoritması (Grey Wolf Optimization, GWO) [22] gibi algoritmalar bu kategoriye örnektir. Bunun yanı sıra yerçekimi arama algoritması (Gravitational Search Algorithm, GSA) [23], elektromanyetik alan optimizasyonu algoritması (Electromagnetic Field Optimization, EFO) [24] ve optik ilhamlı optimizasyon algoritması (Optics Inspired Optimization, OIO) gibi algortimalar fizik yasalarından ilham alan algoritmalara örnek olarak verilebilir. Sosyal-insan davranışlarından ilham alan algoritmalara ise, tabu arama (Tabu Search, TS) [25] veya öğretme ve öğrenme tabanlı optimizasyon (Teaching-Learning Based Optimization, TLBO) [26] algoritması örnek olarak verilebilir.

Popülasyon tabanlı MSA algoritmaları, optimizasyon sürecinde bireyler arasında oluşan etkileşime, yani bir başka deyişle farklı çözümler arasındaki bilgi alışverişine bağlı olarak popülasyonun çeşitlendirilmesi bakımından avantaj sağlar [27]. Popülasyonda sağlanan çeşitlilik, arama uzayının etkili bir biçimde araştırılması ve yerel çözüm tuzaklarından kaçınılması gibi durumlar açısından oldukça önemlidir. Popülasyon tabanlı MSA algoritmalarında optimizasyon süreci iki adımdan oluşur. İlk adımda, çözüm adaylarının arama uzayındaki referans konumları belirlenen seçim yöntemine bağlı bir şekilde popülasyon içerisinden seçilir. Bir sonraki adımda ise, seçilen referans konumlara bağlı olarak ve arama operatörleri kullanılarak arama işlemi gerçekleştirilir. Arama işleminde kullanılan arama operatörlerinin temel görevi, keşif ve sömürü gereksinimlerinin sağlanmasıdır [28]. Bir optimizasyon probleminin çözümünde, keşif ve sömürü yetenekleri arasında uygun bir denge sağlandığında MSA algoritmalarının daha etkili bir performans sunabileceği ve küresel optimum noktaya yakınsama sağlayabileceği araştırmacıların önemli bir kısmı arasında öne çıkan bir görüştür [29], [30]. Keşif, arama uzayına yayılmış çeşitli çözümler bulma yeteneğini ifade ederken; sömürü ise çözüm uzayının gelecek vaat eden alanlarında daha iyi çözümler bulmak veya mevcut çözümleri iyileştirmek için yapılan yerel aramadır. Son dönemlerde, MSA algoritmalarının geliştirilmesinde, genellikle arama operatörlerinin veya yüksek performanslı MSA algoritmalarının farklı varyantlarının tasarlanmasına odaklanma durumu söz konusu olmuştur [31]–[35]. Bununla birlikte, seçim yöntemi ile elde edilen çözüm adaylarının referans konumu da arama sürecinin başarısı açısından üzerinde durulması gereken önemli bir konudur [36]. Çözüm adaylarının referans konumları arama stratejisine yön verir, ancak nitelikli bir çeşitlilik sağlanması açısından bu konumların rastgele bir

biçimde değil, uygun bir seçim yöntemi kullanılarak belirlenmesi gerekir [37]. Bu nedenle, seçim yöntemleri MSA sürecinde etkili bir rol oynamaktadır. MSA sürecinde, açgözlü, rastgele ve olasılıksal yöntemler, seçim yönteminin alt kategorilerini oluşturur [38]. Açgözlü seçim yöntemi, doğadaki elitizmden ilham alan, popülasyonda en güçlü olan bireyin seçildiği bir seçim yöntemidir. Rastgele seçim yönteminde algoritmanın keşif görevi, popülasyonda yer alan bireyler arasından rastgele seçim yapılarak geliştirilir [39]. Olasılıksal seçim yönteminde ise, popülasyonda yer alan üyelerin uygunluk değerlerine göre seçilme oranı belirlenir. Popüler olasılıksal seçim yöntemleri, rulet çarkı ve turnuva yöntemleridir [40], [41].

Bahsedilen klasik yöntemlere alternatif bir seçim yöntemi olarak, MSA algoritmalarında referans konumların etkili ve verimli seçimi için yeni bir seçim yöntemi olan ve bu tez çalışmasında da kullanılan uygunluk mesafe dengesi (Fitness-Distance Balance, FDB) yakın zamanda sunulmuştur [28]. Aynı zamanda açgözlü bir seçim yöntemi de olan FDB’de, diğer seçim yöntemlerinden farklı olarak her adayın uygunluk ve mesafe değerlerine göre puan değeri hesaplanır. Uygunluk değeri çözüm adaylarının başarısını gösterirken, mesafe değeri ise en iyi çözüm adayları arasındaki farkı göstermektedir. FDB seçim yöntemi, popülasyondaki en iyi çözüme benzer olan adayların belirlenmesini ve en iyi çözüme benzemedikleri durumda ise uygunluk değeri yüksek olan adayların elde edilmesini sağlar. Böylece, arama uzayında konumları birbirine çok yakın olan adaylar aynı anda seçilemez ve popülasyondaki en iyi çözümün eksiklerinin giderilmesini sağlayacak adaylar seçilir. Çözüm adayının hem uygunluk hem de mesafe değerlerinin yüksek olması, arama sürecinin başarısında oldukça önemli bir etkiye sahiptir [28]. Bu özelliklerinden dolayı FDB seçim yöntemi, MSA algoritmalarının geliştirilmesinde son dönemde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden bir tanesi haline gelmiştir ve literatürde FDB seçim yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar mevcuttur. Örneğin, FDB seçim yöntemi ilk olarak simbiyotik organizma arama (Symbiotic Organism Search, SOS) algoritmasının keşif ve sömürü yeteneklerini geliştirmek amacıyla ve erken yakınsama problemi yaşayan stokastik fraktal arama (Stochastic Fractal Search, SFS) algoritmasında popülasyon çeşitliliğinin artırılması amacıyla kullanılmıştır [28], [37]. Bunun dışında, bir başka çalışmada öğretim ve öğrenme temelli yapay arı kolonisi (Teaching-Learning Based Artificial Bee Colony, TLABC), algoritmasında yer alan üç farklı arama süreci FDB kullanılarak geliştirilmiştir [42]. Bununla birlikte, FDB’nin uyarlanabilir kılavuzlu diferansiyel evrim algoritmasının (Adaptive Guided Differential

Evolution Algorithm, AGDE) mutasyon sürecinde geliştirme yapılması amacıyla ve kır kurdu optimizasyon algoritmasının (Coyote Optimization Algorithm, COA) kültürel aşamasında sürüye maksimum katkı sağlayacak olan alfa kır kurdunun belirlenmesi amacıyla kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [38], [43]. Son dönemlerde, MSA algoritmalarının popülerliği mühendislik bilimindeki çok sayıda alanda olduğu gibi, güç sistemlerindeki uygulamalarda da önemli ölçüde artmıştır. Güç sistemlerinde mevcut olan optimizasyon problemleri, lineer olmayan amaç fonksiyonlarına sahip olan, eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarını içeren, konveks olmayan, yüksek boyutlu ve karmaşık problemlerdir. Herhangi bir mühendislik probleminin tasarım parametreleri, geleneksel optimizasyon tekniklerine kıyasla MSA algoritmaları kullanılarak minimum sürede belirlenmektedir. Ancak, MSA algoritmalarının performansı optimizasyon probleminin türüne ve karmaşıklığına göre değiştiğinden dolayı, güç sistemlerinde yer alan optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili sonuçlar elde edilmesi için MSA algoritmalarının performansının sürekli olarak geliştirilmesi gerekmektedir [43].

Bu tez çalışmasında öncelikli olarak, literatürde yer alan güncel MSA algoritmalarından olan Sosyal Ağ Arama (Social Network Search, SNS) [44] algoritmasının seçim stratejisi FDB seçim yöntemi kullanılarak yeniden tasarlanmıştır. SNS, kullanıcıların sosyal ağlarda daha fazla popülerlik elde edebilmek için birbirlerine karşı göstermiş oldukları etkileşimli davranışlarından ilham alan bir MSA algoritmasıdır. Talatahari ve arkadaşları [44] tarafından, CEC 2014 [45] ve CEC 2017 [46] karşılaştırma problemlerinin çözümü için SNS kullanılarak gerçekleştirilen test çalışmalarının neticesinde umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, SNS'nin güncel ve etkili bir algoritma olmasının dışında literatürdeki çok sayıda MSA algoritması arasından bu tez çalışması için seçilmesindeki temel faktörlerden bir tanesi de, bu algoritmanın güç sistemlerindeki optimizasyon problemlerinin çözümünde henüz uygulanmamış olmasıdır. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, SNS'nin güç sistemleri problemlerinin çözümünde çoğu zaman yerel çözüm tuzaklarına yakalandığı ve kararlı bir şekilde optimum çözüme yakınsayamadığı görülmüştür. Bu istikrarsız performansın temel nedeni, SNS algoritmasının arama sürecinde yeterli çeşitliliği sağlayamamasıdır. Bu nedenle, tez çalışmasında SNS algoritmasının keşif kabiliyetini geliştirmek için, FDB [28] kullanılarak rehber seçim süreci yeniden tasarlanmış ve FDBSNS adlı sağlam ve kararlı bir MSA algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen FDBSNS algoritması, öncelikle CEC 2014 [45] ve CEC 2017 [46] kıyaslama problemlerinin çözümünde farklı problem

tipleri ve farklı boyutlar için test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Wilcoxon ikili işaret testi kullanılarak SNS algoritması ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda, FDBSNS algoritmasının CEC 2014 [45] ve CEC 2017 [46] kıyaslama problemlerinin çözümü açısından SNS algoritmasına kıyasla açık bir şekilde üstün olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlardaki etkili performansından yola çıkılarak, FDBSNS algoritması bir sonraki aşamada güç sistemlerinde geçici durum kararlılığının iyileştirilmesi amacıyla kullanılan güç sistemi kararlı kılıcısının (Power System Stabilizer, PSS) en uygun parametrelerinin hesaplanması amacıyla kullanılmıştır. FDBSNS tabanlı PSS kullanılmasıyla gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında, önerilen amaç fonksiyonu ve farklı arıza senaryoları için WSSC 3-Makineli 9-Baralı ve New England 10-Makineli 39-Baralı test sistemlerinde geçici durum kararlılığı iyileştirilmiştir. Önerilen FDBSNS algoritması geçici durum kararlılığı için gerçekleştirilen en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümünde, PSO [47], yapay arı kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC) [47], biyocoğrafya tabanlı optimizasyon algoritması (Biogeography-Based Optimization, BBO) [48], sürüngen arama algoritması (Reptile Search Algorithm, RSA) [49], doğrusal popülasyon boyutu azaltma başarı geçmişine dayalı uyarlanabilir diferansiyel evrim algoritması (Linear Population Size Reduction Success History Based Adaptive Differential Evolution, LSHADE) [50], geliştirilmiş çok operatörlü diferansiyel evrim algoritması (Improving Multi-Objective Differential Evolutionary, IMODE) [51], uyarlanabilir bilgi edinme-paylaşma tabanlı algoritma (Adaptive Gaining-Sharing Knowledge-based algorithm, AGSK) [52], uyarlanabilir parametrelerle bilgi edinme-paylaşma tabanlı algoritma (Gaining- Sharing Knowledge-Based Algorithm with Adaptive Parameters, APGSK) [53], uyarlanabilir parametrelerle bilgi edinme-paylaşma tabanlı algoritma ile hibrit edilmiş geliştirilmiş çok operatörlü diferansiyel evrim algoritması (Gaining-Sharing Knowledge-Based Algorithm with Adaptive Parameters Hybrid with Improving Multi-Objective Differential Evolutionary Algorithm, APGSK-IMODE) [54] ve sosyal ağ arama algoritması (Social Network Search, SNS) [44] gibi çok sayıda modern ve etkili algoritma ile parametreleri belirlenen PSS'ler ile uygunluk değerleri, çeşitli istatistiksel analiz yöntemleri, doğrusal olmayan zaman alanı analizi sonuçları ve performans indeksleri açısından karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, geliştirilen FDBSNS geçici durum kararlılığını iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilen en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümünde rakip MSA algoritmalarından daha etkili bir performans ortaya koymuştur.

Bir sonraki aşamada, FDBSNS algoritması güç sistemlerinde bir başka geçici durum kararlılığı problemi olan TCSC tabanlı LL ve PID denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. FDBSNS algoritmasının geçici durum kararlılığı probleminin çözümündeki etkisi, SMIB bir güç sisteminde belirlenen amaç fonksiyonu yaklaşımları ve arıza durumu için farklı yüklenme koşulları dikkate alınarak test edilmiştir. Önerilen FDBSNS algoritması geçici durum kararlılığı için gerçekleştirilen TCSC tabanlı LL ve PID denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümünde, bir önceki aşamada yer alan problemin çözümünde kullanılan algoritmalarının tamamı (PSO, ABC, BBO, RSA, LSHADE, IMODE, AGSK, APGSK, APGSK-IMODE, SNS) ve referans çalışmada yer alan DE [55] ile uygunluk değerleri, çeşitli istatistiksel analiz yöntemleri ve doğrusal olmayan zaman alanı analizi sonuçları açısından karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda, FDBSNS, problemin çözümünde rakip algoritmalarla karşı genel olarak üstün bir performans sergilemiştir.

Buna göre, bu tez çalışmasının literatüre başlıca katkıları özetle şu şekildedir:

➤ FDBSNS olarak adlandırılan etkili bir MSA algoritması geliştirilmiştir. Temel SNS algoritmasının keşif kabiliyetini arttırmak için uygunluk - mesafe dengesi (Fitness-Distance Balance, FDB) seçim yöntemi kullanılmıştır. Böylece keşif ve sömürü arasında güçlü bir denge sağlanmıştır. Önerilen FDBSNS Congress on Evolutionary Computation (CEC) problemleri olan CEC 2014 [45] ve CEC 2017 [46]'da farklı türde kıyaslama problemleri ve farklı boyutlu arama uzayları için test edilmiş ve deneysel çalışmalarda SNS algoritmasından [44] daha iyi performans göstermiştir.

➤ Tez çalışmasının ikinci orijinal katkısı olarak, bir sonraki adımda, güç sistemlerinde geçici durum kararlılığını iyileştirmek amacıyla, karmaşık ve rekabetçi bir optimizasyon problemi olan en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi problemini çözmek için FDBSNS algoritması ilk kez uygulanmıştır. Problemin çözümünde FDBSNS algoritması; PSO, ABC, BBO, RSA, SNS gibi güncel algoritmalar ve AGSK, APGSK, APGSK-IMODE, LSHADE, IMODE gibi son beş yılın CEC yarışmalarında en etkili olan algoritmalarla bazıları ile karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, bu algoritmalarla PSO ve ABC algoritmaları [47] dışında kalan algoritmalar ile bu problem ilk defa çözülmüştür.

➤ Tez çalışmasının üçüncü orijinal katkısı ise, bir diğer geçici kararlılık durumu problemi olan TCSC tabanlı denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi probleminde,

TCSC tabanlı LL ve PID denetleyicilerin parametrelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesinde FDBSNS algoritmasının ilk defa kullanılmasıdır. Problemin çözümünde FDBSNS algoritması; DE, PSO, ABC, BBO, RSA, SNS, AGSK, APGSK, APGSK-IMODE, LSHADE ve IMODE gibi etkili algoritmalarla karşılaştırılmıştır. FDBSNS'nin yanı sıra SNS, AGSK, APGSK, APGSK-IMODE, LSHADE, IMODE ve RSA gibi algoritmalar da problemin çözümüne ilk defa uygulanmıştır.

Buna göre, tez çalışmasının geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir:

- İkinci bölümde, kullanılan yöntem detaylı olarak açıklanmıştır. İlk olarak genel bir bakış açısıyla MSA süreci, SNS algoritmasının matematiksel modeli ve FDB yöntemi tanıtılmıştır. Ardından, geliştirilen FDBSNS algoritmasının matematiksel modeli, tasarım adımları ve akış diyagramına da bu bölümde yer verilmiştir.
- Üçüncü bölümde, güç sistemlerinde en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümü amacıyla, öncelikle generatör ve uyartım sisteminin matematiksel modeli, lineerleştirilmiş güç sistemi modeli, problemin amaç fonksiyonu ve FDBSNS algoritmasının probleme uygulanma adımlarına yer verilmiştir.
- Dördüncü bölümde, FDBSNS kullanılarak TCSC tabanlı denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, SMIB bir güç sisteminde TCSC'nin modellenmesi, TCSC tabanlı denetleyicilerin modellenmesi ve problemin amaç fonksiyonuna yer verilmiştir.
- Beşinci bölümde, FDBSNS ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait sonuçlar yer almaktadır. İlk olarak CEC 2014 ve CEC 2017 problemleriyle ilgili olarak elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Sonrasında, en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi amacıyla FDBSNS ve çeşitli MSA algoritmaları kullanılarak WSCC 3-Makine 9-Barlı ve New England 10-Makine 39-Barlı test sistemlerinde farklı arıza senaryoları için belirlenen denetleyici parametreleri, elde edilen uygunluk değerleri, istatistiksel analizler, performans indeksi sonuçları ve zaman alanı analizleri için genertörlere ait açı, açısal hız ve güç grafikleri de sunulmuştur. Ayrıca, FDBSNS ve rakip MSA algoritmaları ile en uygun değerleri belirlenen denetleyici parametreleri, uygunluk değeri sonuçları, istatistiksel analizler ve zaman alanı analizleri için elde edilen güç açısı ve TCSC reaktansı grafikleri de bu bölümde sunulmuştur.
- Son olarak, Altıncı bölümde elde edilen sonuçlar, genel bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir.

2. YÖNTEM

Optimizasyon sürecinde, MSA algoritmalarının başarısı için en önemli iki kriter seçim ve arama stratejileridir. Seçim stratejisinde, arama sürecinin yönünü belirleyen rehber arama ajanları seçilirken, arama stratejisi ise keşif ve sömürü görevlerinden oluşur. Sömürü, referans konumların etrafında gerçekleştirilen hassas bir aramadır ve ince ayar olarak da adlandırılır. Keşif görevi, arama sürecindeki yerel çözüm tuzaklarını ortadan kaldırmak için gerçekleştirilir [37], [43]. Tez çalışmasında, kullanıcıların sosyal ağlarda popülaritesini arttırmak amacıyla aralarındaki etkileşimli davranışlardan esinlenerek oluşturulan SNS algoritması, keşif ve sömürü arasında etkili bir denge sağlanamaması ve erken yakınsama problemi nedeniyle global optimum çözüme ulaşamamıştır. Başarılı bir optimizasyon süreci için, SNS algoritmasının keşif ve dengeli arama yeteneklerinin geliştirilmesi amacıyla son zamanların en etkili seçim yöntemlerinden olan FDB kullanılmış ve optimizasyon problemlerinin çözümü için FDBSNS algoritması önerilmiştir. Bu kapsamda, bu bölüm beş alt bölümden oluşmaktadır:

- İlk alt bölümde, MSA ve optimizasyon süreçleri tanıtılmıştır. İkinci alt bölümde ise temel SNS algoritması anlatılmıştır.
- Üçüncü alt bölümde, popülasyon tabanlı MSA algoritmalarının arama sürecine rehberlik edecek çözüm adaylarının popülasyondan seçimi için kullanılan FDB yöntemi anlatılmıştır. Dördüncü alt bölümde ise, tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan uygunluk-mesafe dengesi tabanlı sosyal ağ arama (FDBSNS) algoritması detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.1. META-SEZGİSEL ARAMA SÜRECİNE GENEL BAKIŞ

Bir optimizasyon probleminde, öncelikle m adet tasarım değişkeni olduğunu varsayalım [38], [56], [57]: Buna göre, tasarım değişkenleri $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_m]$, $m \in N^+$, $\forall_{i=1}^m x_i \in X$ ile ifade edilir. l_b , $u_b \in R$ olmak üzere, tasarım değişkenlerinin sınırları $-\infty < l_b, u_b < +\infty$ şeklindedir. O_f , amaç fonksiyonu, $g(x)$ ve $h(x)$ eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları olmak üzere, bu ifadeler Denklem (2.1)'de verildiği gibidir:

$$\begin{aligned}
& \min/\max_{x \in R^n} O_f = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \\
& \text{subject to} \\
& g_j(x) = 0, (j = 1, 2, \dots, J) \\
& h_k(x) \leq 0, (k = 1, 2, \dots, K)
\end{aligned} \tag{2.1}$$

Çözüm adaylarının popülasyonu (P) ve uygunluk değerleri (fv) Denklem (2.2)'de verildiği gibidir:

$$P \equiv \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad fv \equiv \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

MSA algoritmalarının arama süreci Çizelge 2.1'de verilmiştir [28], [38]. Başlangıç aşamasında, Denklem (2.1)'e göre optimizasyon modeli oluşturulur. Ardından, tasarım değişkenlerinin sayısı, sınırları ve popülasyon büyüklüğü belirlenir. İkinci aşamada arama süreci döngüsü başlatılır. Bu döngü; seçim, arama ve güncelleme aşamalarından oluşur. Arama sürecine yön verecek çözüm adayları, seçim aşamasında belirlenir. Arama operatörlerinin görevi, keşif ve sömürü aşamasını gerçekleştirerek algoritmanın performansını iyileştirmektir. Her iki görevi de başarıyla yerine getirebilecek ve arama sürecini yönlendirebilecek bireyler, ilk aşamada seçim işleminden elde edilir.

Çizelge 2.1. MSA algoritmalarında arama sürecinin genel adımları.

Başlangıç
- Denklem (2.2)'ye göre çözüm adaylarından oluşan popülasyonu (P) oluşturun.
for $i=1: n$ (çözüm adayları sayısı) do
- Denklem (2.2)'ye göre çözüm adaylarının uygunluk değerini (fv) hesaplayın.
end
while (arama süreci yaşam döngüsü:sonlandırma süreci sağlanıncaya kadar) do
<i>// Seçim Aşaması //</i>
- Popülasyondan referans çözüm adayının veya arama ajanının seçilmesi
<i>// Arama Aşaması //</i>
- Sömürü : Referans çözüm adaylarına komşu olan yerlerde arama.
- Keşif : Popülasyonda çeşitlilik sağlanması işlemleri .
<i>// Güncelleme Aşaması //</i>
- Çözüm adaylarının uygunluk değerleri (fv) dikkate alınarak popülasyonun (P)'nin güncellenmesi.
end
En iyi çözüm: x_{best}
Bitiş

2.2. SOSYAL AĞ ARAMA ALGORİTMASI

SNS algoritması, Talatahari ve arkadaşları tarafından 2021’de sunulan güncel optimizasyon algoritmalarının başında gelmektedir [44]. SNS’de, kullanıcıların sosyal ağlarda daha fazla popülerlik elde edebilmeleri amacıyla birbirlerine karşı göstermiş oldukları etkileşimli davranışlarından ilham alınmıştır.



Şekil 2.1. Sosyal ağ yapısının genel biçimi.

SNS’nin optimizasyon sürecini başlatmak için ilk olarak kullanıcı sayısı, maksimum iterasyon sayısı ve değişkenlerin kısıtlamaları tanımlanır. Bundan sonra, Denklem (2.3)’e göre her kullanıcı için ilk görüş (başlangıç konumu) oluşturulur [44].

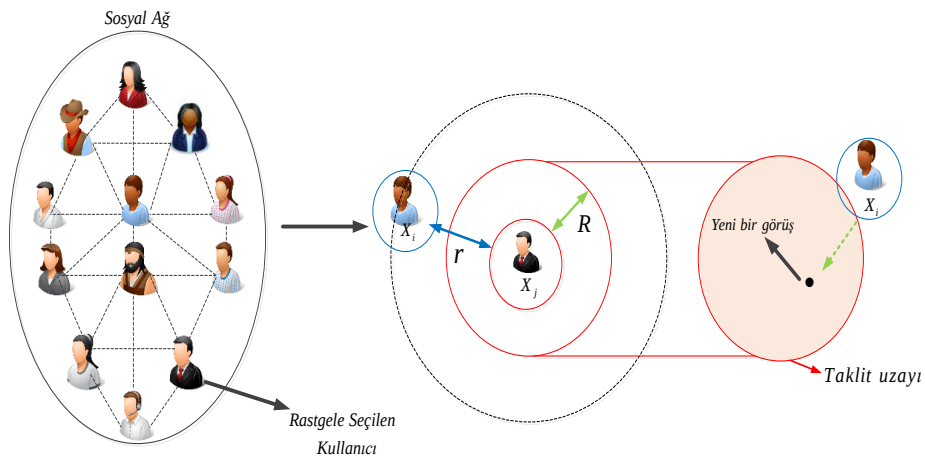
$$X_0 = LB + rand(0,1) \times (UB - LB) \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)’te yer alan X_0 , her bir kullanıcı için temel görüş vektörü olarak ifade edilir ve $rand(0, 1)$, belirtilen sınırlar içinde rastgele bir vektördür. UB ve LB maksimum ve minimum değişken vektörleridir. SNS algoritmasının modellenmesinde, sosyal ağ kullanıcılarının görüşlerini ifade ederken taklit, sohbet, tartışma ve yenilik (inovasyon) aşamaları olarak sınıflandırılan karar operatörlerine (mood) sahip oldukları varsayılmıştır.

Taklit aşamasında, kullanıcıların fikir beyan ederken birbirlerini taklit ettikleri bir durum söz konusudur. Taklit aşamasının matematiksel ifadesi Denklem (2.4)’te verilmiştir:

$$\begin{aligned} X_{inew} &= X_j + rand(-1,1) \times R \\ R &= rand(0,1) \times r \\ r &= X_j - X_i \end{aligned} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'te yer alan X_j , j kullanıcısının görüş (konum) vektörü olarak ifade edilir ve rastgele seçilir. X_i , i kullanıcısının konum vektörüdür ve $(i \neq j)$ olarak kabul edilir. $rand(-1,1)$ ve $rand(0,1)$ belirtilen sınırlar içinde iki rastgele değerdir. Taklit aşamasında, şok yarıçapından (R) ve popülerlik yarıçapından (r) oluşan taklit uzayına göre yeni bir çözüm üretilir. R , j 'nci kullanıcının etki miktarını gösterir ve büyüklüğünün r 'nin katı olduğu kabul edilir. r 'nin değeri, j kullanıcısının popülerlik yarıçapını gösterir. Taklit aşaması sürecini özetlemek gerekirse, Denklem (2.4) kullanılarak bir taklit alanı oluşturulur ve böylece taklit uzayında sosyal ağda paylaşılacak üzere yeni bir görüş olarak bir nokta bulunur [44].

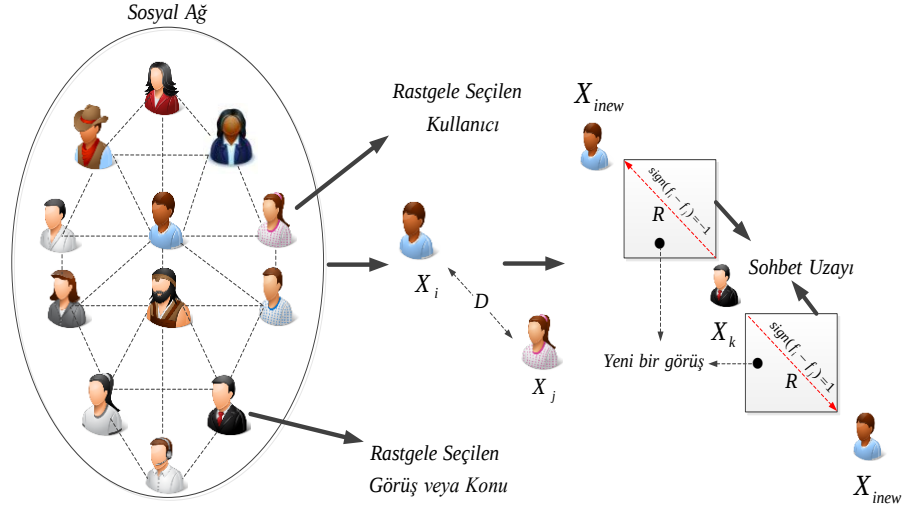


Şekil 2.2. Taklit aşaması genel süreci.

Sohbet aşamasında, kullanıcılar farklı bir konuda yeni bir görüş elde edebilirler. Bu durum Denklem (2.5) ile ifade edilir:

$$\begin{aligned} X_{inew} &= X_k + R \\ R &= rand(0,1) \times D \\ D &= sign(f_i - f_j) \times (X_j - X_i) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'te, X_j ve X_k ($j \neq k$) olmak üzere rastgele seçilen konumların vektörleridir. f_i ve f_j , X_i ve X_j 'nin amaç fonksiyonlarıdır. R , sohbet etkisidir ve X_k konu hakkındaki fikir değişikliğini ifade eder. D , kullanıcıların görüşleri (konumları) arasındaki farkı gösterir. Ayrıca X_k 'nin hareket yönü, f_i ve f_j arasındaki farkı hesaplayan işaret fonksiyonu tarafından belirlenir. Sonuç olarak, sohbet aşamasında, j kullanıcısı ile kurulan iletişimden sonra, kullanıcının konu ile ilgili görüşü değişmektedir. Bu durumda, olaylar yeniden konumlandırılır [44].



Şekil 2.3. Sohbet aşaması genel süreci.

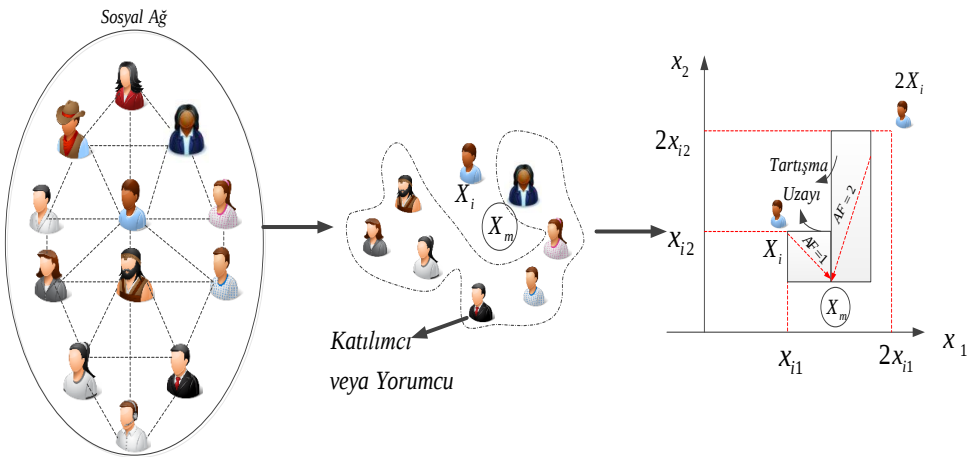
Tartışma aşamasında, rastgele sayıda kullanıcının yorumcu veya katılımcı olduğu varsayılır ve tartışmada etkilenen yeni görüş Denklem (2.6)'da verildiği gibi ifade edilir:

$$X_{inew} = X_i + rand(0,1) \times (M - AF \times X_i)$$

$$M = \frac{\sum_{t=1}^{N_r} X_t}{N_r}$$

$$AF = 1 + round(rand)$$
(2.6)

M , yorum yapanların veya popülasyon üyelerinin görüşlerinin ortalama değerini ifade eder. AF , 1 veya 2 tam sayı değerini alır ve kabul faktörü olarak adlandırılır. 1 değeri ile kullanıcı sayısı (N_{user}) arasında rastgele bir değer olan N_r , yorum yapanların sayısını veya grup boyutunu belirtir [44].

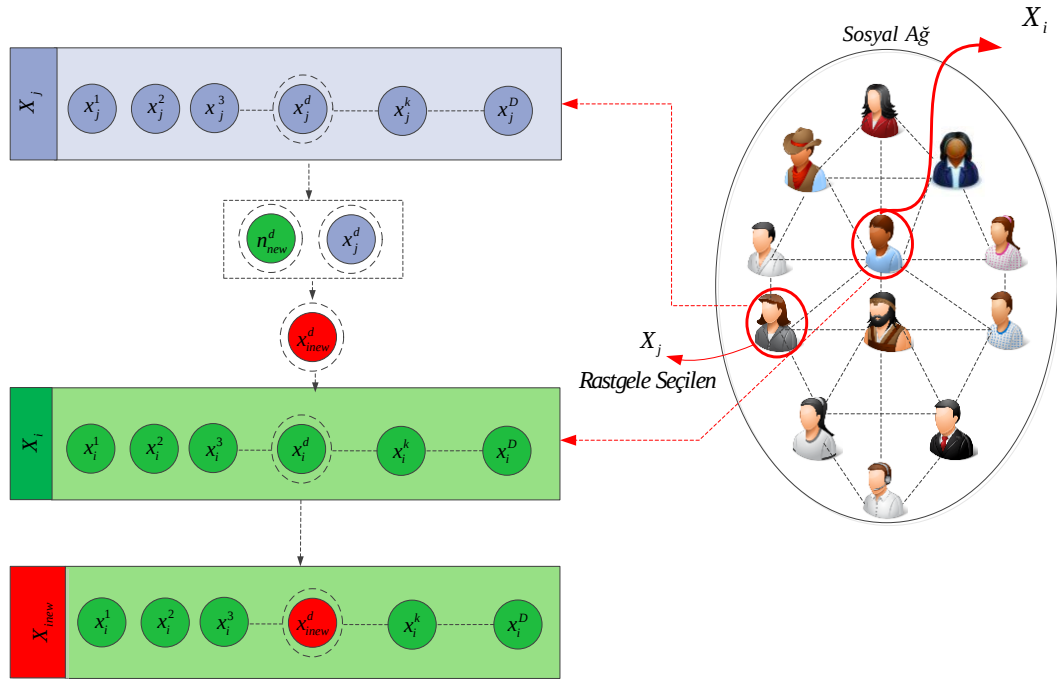


Şekil 2.4. Tartışma aşaması genel süreci.

Yenilik aşamasında ise, herhangi bir kullanıcı tarafından bir konu hakkında farklı bir görüş sunulması varsayılmıştır. Yenilik aşamasında, X_i 'nin rastgele seçilmiş bir değişkeni Denklem (2.7)'de yer aldığı gibi değiştirilerek yeni bir çözüm geliştirilir.

$$\begin{aligned}
 X_{inew} &= [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{inew}^d, \dots, x_D] \\
 x_{inew}^d &= t \times x_j^d + (1-t) \times n_{new}^d \\
 n_{new}^d &= lb_d + rand_1 \times (ub_d - lb_d) \\
 t &= rand_2
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Denklem (2.7)'de, D değişken sayısı, d ise $[1, D]$ değer aralığında rastgele seçilen bir değişkendir. $rand_1$ ve $rand_2$, $[0,1]$ aralığında rastgele değerlerdir. lb_d ve ub_d , d değişkenine ait minimum ve maksimum değerleri gösterir. n_{new}^d , d boyutu için yeni bir görüşü gösterir. x_j^d , j 'nci kullanıcı tarafından önerilen d değişkeninin mevcut görüşüdür. i kullanıcısı, mevcut görüşe karşı yeni bir görüş (n_{new}^d) öne sürer. Bunun sonucunda yeni görüş x_{new}^d oluşturulur [44].



Şekil 2.5. Yenilik (İnovasyon) aşaması genel süreci.

SNS algoritmasında, her iterasyon için rastgele bir karar operatörü çalıştırılır. Denklem (2.8)'de yer alan ifadeler, kullanıcıların görüşlerini sınırlamak için kullanılır.

$$\begin{aligned} x_i &= \min(x_i, ub_i) \\ x_i &= \max(x_i, lb_i) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Denklem (2.8)'de yer alan x_i , X_{inew} 'in değişkenidir, ub_i ve lb_i , problemin alt sınırının (LB) ve üst sınırının (UB) i 'ninci bileşenidir. Yeni bir görüşün paylaşılıp paylaşılmayacağı, amaç fonksiyonunun değerine bağlıdır. Yeni görüş (X_{inew}) mevcut olandan (X_i) daha iyiye paylaşılacaktır; aksi takdirde aynı kalır. Bu durum Denklem (2.9)'da verildiği gibi hesaplanır:

$$X_i = \begin{cases} X_i, & f(x_i) < f(X_{inew}) \\ X_{inew}, & f(X_{inew}) \geq f(x_i) \end{cases} \quad (2.9)$$

Son olarak, SNS algoritmasının arama süreci sonlandırma kriterlerine göre tamamlanır ve en iyi sonuç elde edilir [44].

2.3. UYGUNLUK-MESAFE DENGESİ SEÇİM YÖNTEMİ

FDB, Kahraman ve arkadaşları tarafından 2020 yılında sunulan bir seçim yöntemidir [28]. FDB sayesinde arama sürecine yön verecek en etkili çözüm adayları seçilir ve arama yönü en doğru şekilde belirlenir. FDB, çözüm adaylarının arama sürecine katkısını gösteren puan değerlerinin yanı sıra uygunluk değerlerini de dikkate alır [37], [38], [43], [56]. Puan değerlerinin hesaplanmasında çözüm adaylarının uygunluk değerleri (f_v) ve en iyi çözüm adayına olan mesafe değerleri (x_{best}) kullanılmaktadır. Buna göre, çözüm adaylarına ait FDB puanları şu şekilde hesaplanmaktadır:

- Öncelikle çözüm adaylarının uygunluk değerleri (f_v) hesaplanır. n -tasarım değişkenli ve m -çözüm adaylı bir P -popülasyonunda, i 'ninci çözüm adayı $x_i = [x_{1[i]}, x_{2[i]}, x_{3[i]}, \dots, x_{n[i]}]$ olarak ifade edilir. P -popülasyonunun vektörü ve çözüm adaylarının f_v 'si Denklem (2.2)'de verildiği gibidir.
- Buna göre, i 'ninci çözüm adayı (x_i) ile en iyi çözüm (x_{best}) arasındaki Öklid mesafesi Denklem (2.10)'da verildiği gibidir:

$$\forall P_i, D_{Pi} = \sqrt{(x_{1[i]} - x_{1[best]})^2 + (x_{2[i]} - x_{2[best]})^2 + \dots + (x_{n[i]} - x_{n[best]})^2} \quad (2.10)$$

- Popülasyonun mesafe vektörü (D_p) Denklem (2.11)'de verilmiştir:

$$D_p \equiv \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_m \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (2.11)$$

- FDB puanları, sırasıyla Denklem (2.2) ve Denklem (2.11)'de verilen uygunluk değeri (fv) ve mesafe değeri (D_p) kullanılarak hesaplanır. Bu iki değerden herhangi bir tanesi diğerine karşı baskın olmamalıdır. Bu nedenle, her iki değer de $[0,1]$ aralığında normalize edilir. Buna göre, çözüm adayının FDB puanları (S_{P_i}) Denklem (2.12)'de verilmektedir:

$$\forall P_i, \quad S_{P_i} = \omega * normfv_i + (1 - \omega) * normD_{P_i} \quad (2.12)$$

- Son olarak, P-popülasyonunun puan vektörü (S_p) Denklem (2.13)'te verilmiştir:

$$S_p \equiv \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (2.13)$$

FDB seçim yöntemine göre, MSA algoritmalarının arama sürecinde, S_p vektörünün oluşturulmasının ardından, çözüm adayı seçmek amacıyla olasılıksal veya açgözlü yöntemlerden bir tanesi uygulanır. Örneğin; açgözlü seçim yöntemi kullanıldığında uygunluk değeri en yüksek olan çözüm adayı yerine FDB puanı en yüksek olan çözüm adayı seçilmiş olur. FDB hakkında daha kapsamlı bilgi [28]'den elde edilebilir.

2.4. ÖNERİLEN YÖNTEM: UYGUNLUK MESAFE DENGESİ TABANLI SOSYAL AĞ ARAMA ALGORİTMASI

Bu alt bölümde, FDB yönteminin SNS algoritmasına uygulanması ve sunulan FDBSNS algoritmasının matematiksel modeli açıklanmaktadır. SNS algoritması ve FDB seçim yöntemi, önceki alt bölümlerde daha ayrıntılı olarak ifade edilmiştir. SNS, çeşitli optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan etkili bir MSA algoritmasıdır. Bununla birlikte, bu MSA algoritması en uygun denetleyici parametrelerinin belirlenmesi problemlerinin çözümünde genellikle yerel çözüm tuzaklarına yakalanmıştır. Bu durum, SNS algoritmasının problem çözme performansının istikrarsız olmasına ve arama

sürecinde yeterli çeşitliliğin sağlanamamasına yol açmıştır. Bu nedenle, SNS algoritmasının optimizasyon sürecini iyileştirmek, erken yakınsama sorununun üstesinden gelebilmek ve çözüm adaylarının çeşitliliğinin sağlanması oldukça önemli bir gerekliliktir.

Başarılı bir keşif ve sömürü dengesi elde etmek, herhangi bir MSA algoritmasının performansını iyileştirmek için öncelikli amaçların başında gelmektedir. MSA algoritmasının sömürü görevinde, popülasyonda yer alan en iyi uygunluk değerine sahip olan aday çözüm (X_{best}) kullanılır. Bununla birlikte, etkili bir arama görevi (keşif) aracılığıyla popülasyonda çeşitlilik sağlanarak erken yakınsama sorunları önlenir. Bu noktada çözüm adaylarının seçim yöntemi ile elde edilen konum, arama sürecinin başarısında son derece etkili bir faktördür. FDB, arama sürecinde etkili çözüm adaylarının seçilmesi bakımından belirleyici bir yöntemdir. FDB yöntemi sayesinde X_{best} 'e katkısı en yüksek olan aday belirlenir. FDB yönteminde sömürü ve keşif görevleri için çözüm adaylarının uygunluk değerleri ve çözüm adayları ile X_{best} arasındaki uzaklık değerleri dikkate alınmaktadır [28]. Buna göre, FDB yönteminin SNS algoritmasına uygulanması aşağıdaki paragraflarda açıklanmaktadır:

SNS algoritması, sosyal ağlarda daha fazla popülerlik elde etmek için kullanıcıların birbirlerine karşı etkileşimli davranışlarından ilham alan popülasyon tabanlı bir MSA algoritmasıdır. SNS algoritmasının başarısı, sosyal ağ kullanıcılarının birbirleriyle olan etkileşimlerini taklit etme yeteneğine bağlıdır. Optimizasyon sürecinde bu etkileşime bağlı olarak sosyal ağ kullanıcıları görüşlerini ifade ederken taklit, sohbet, tartışma ve yenilik (inovasyon) olarak sınıflandırılan karar operatörlerine sahiptir. X_j , j 'ninci kullanıcının görüş vektörü olarak ifade edilir ve rastgele olarak seçilir. Denklem (2.4), (2.5) ve (2.7)'de görüldüğü gibi X_j taklit, sohbet ve yenilik aşamalarında yeni bir bakış açısı ortaya koymak amacıyla kullanılır. Tez çalışmasının yenilikleri ve katkıları kapsamında gerçekleştirmiş olduğumuz araştırmalarımıza göre, SNS algoritmasında j 'ninci kullanıcının rastgele seçilmiş bir görüşü olan X_j yerine FDB yöntemi ile algoritmaya yön veren referans konumunun belirlenmesi SNS algoritmasının arama sürecine katkı sağlamakta ve arama uzayında daha iyi çözüm adayları sunmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda, Denklem (2.4)'te X_j yerine taklit aşaması için X_{FDB} kullanıcı görüşü kullanılmıştır. Buna göre, şok yarıçapı (R), popülerlik yarıçapı (r) ve yeni görüş (X_{new}) ifadeleri Eşitlik (2.14)'te verildiği gibi güncellenmiştir:

$$\begin{aligned}
X_{inew} &= X_{FDB} + rand(-1,1) \times R \\
R &= rand(0,1) \times r \\
r &= X_{FDB} - X_i
\end{aligned} \tag{2.14}$$

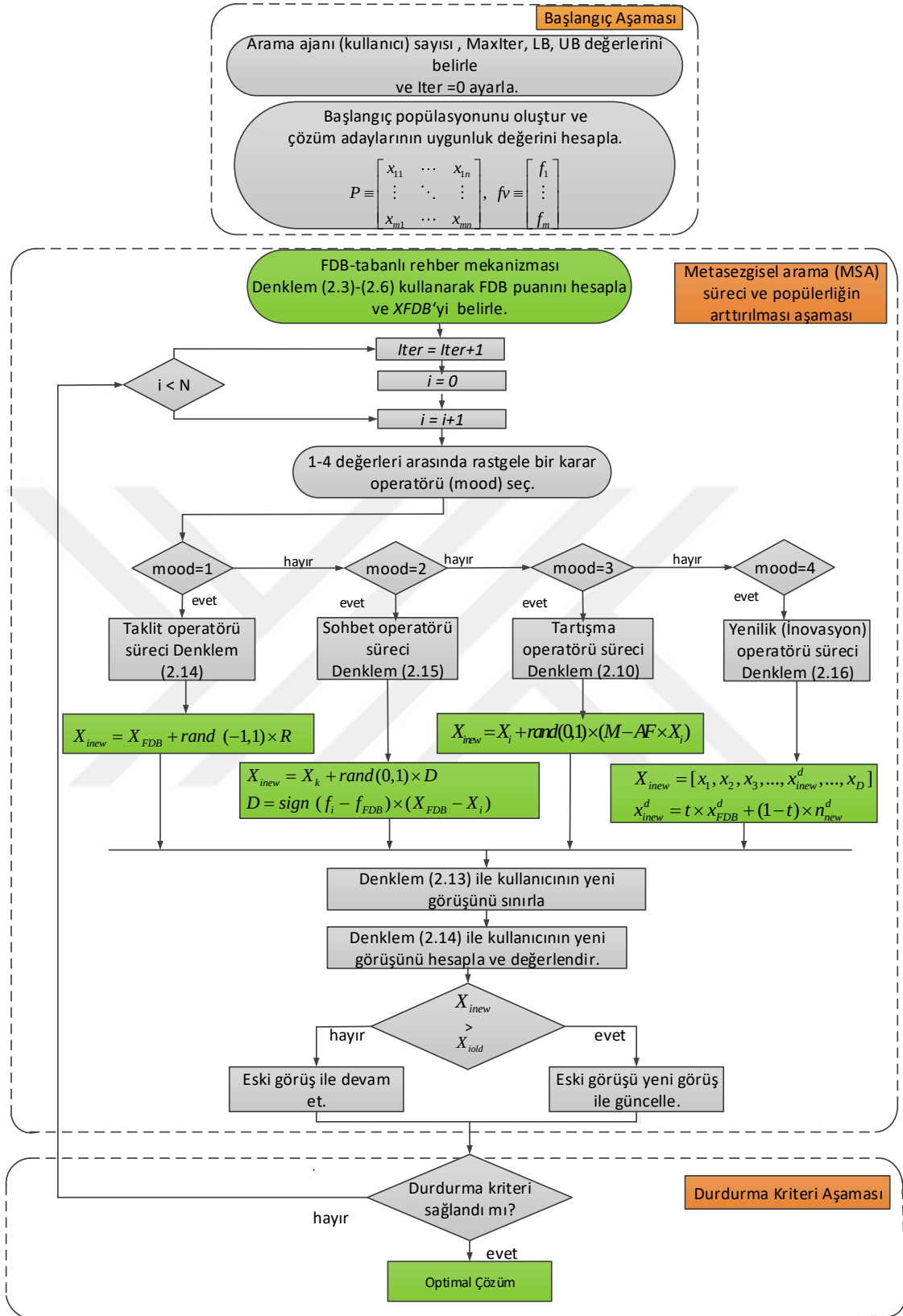
Sohbet aşamasında, Denklem (2.5)'te yer alan X_j ifadesi yerine X_{FDB} ifadesi kullanılarak sohbet etkisi değeri (R), kullanıcıların görüşleri arasındaki fark değeri (D) ve yeni görüş (X_{inew}) ifadeleri Denklem (2.15)'te güncellenmiştir. Böylece, FDB seçim mekanizması tabanlı kullanıcı ile yapılan görüşmeler sonucunda, diğer kullanıcının konuyla ilgili görüşü değişmektedir. Bunun sonucunda, mevcut görüş değiştirilerek yeni görüş diğer kullanıcılarla paylaşılır. Kullanıcının olaylarla ilgili görüşünü değiştirmenin, olayların yeniden konumlandırılması olduğu varsayılır.

$$\begin{aligned}
X_{inew} &= X_k + R \\
R &= rand(0,1) \times D \\
D &= sign(f_i - f_{FDB}) \times (X_{FDB} - X_i)
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Yenilik aşamasında, x_{inew}^d , Denklem (2.7)'de yer alan x_j^d ifadesi yerine X_{FDB}^d ifadesi kullanılarak yeniden hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer ile X_{inew} Denklem (2.16)'da olduğu gibi değiştirilir:

$$\begin{aligned}
X_{inew} &= [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{inew}^d, \dots, x_D] \\
x_{inew}^d &= t \times x_{FDB}^d + (1-t) \times n_{new}^d \\
n_{new}^d &= lb_d + rand_1 \times (ub_d - lb_d) \\
t &= rand_2
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Sonuç olarak, FDBSNS algoritmasında rehber çözüm adaylarının seçimi taklit, sohbet ve yenilik aşamaları olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Uygulanan tasarım değişikliklerinin daha etkili bir biçimde anlaşılmasını sağlamak için Şekil 2.6'da FDBSNS algoritmasının akış diyagramı sunulmuştur.



Şekil 2.6. FDBSNS algoritmasının akış diyagramı.

3. ÖNERİLEN YÖNTEM İLE GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISI PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Günümüz dünyasında, teknolojik yenilikler, ekonomik gelişmeler, hızlı nüfus artışı ve yükselen yaşam standartları gibi nedenlerden dolayı elektriksel güç talebi önemli ölçüde artmaktadır. Gelişen teknoloji ve modernleşme, güç sistemlerinin uzun iletim hatları aracılığıyla birbirine bağlanmasına olanak sağlar [10]. Çok makineli güç sisteminin kararlı durum çalışmasında, sistemde yer alan senkron makinelerin tamamı aynı hızda çalışır [58]. Ancak artan enerji talebine bağlı olarak güç sistemlerinde yer alan senkron generatörler maksimum güç kapasitesi sınırlarında çalıştırıldığında veya ani yük değişimleri ile birlikte arıza durumları meydana geldiğinde, elektriksel çıkış gücü ve mekanik giriş gücü arasında bir güç dengesizliği durumu söz konusu olur. Bu güç dengesizliği, senkron makinelerin rotor tarafında çeşitli salınımlara neden olur [10], [58], [59]. Güç sistemlerinde meydana gelen düşük frekanslı salınımlar (Low- Frequency Oscillations, LFO), güç sisteminin geçici durum kararlılığını olumsuz yönde etkileyerek, sistemin güvenilirliğini tehdit eder ve güç sisteminde yer alan senkron makinelerde çeşitli mekanik sorunlara yol açar. Sistemde herhangi bir arıza meydana gelmesi durumunda, bu salınımların sönümlenememesi elektriksel kesintilere, sistemin çökmesine ve ekonomik açıdan çeşitli olumsuz sonuçlara neden olabilir [60]. Bu nedenle, LFO'ları azaltmak için güç sistemlerinde çeşitli kontrol stratejileri geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Geçmiş yıllarda, modern güç sistemlerinde sistem kararlılığını sağlayabilmek amacıyla güç sistemlerinde türbin yöneticisi (Turbine Governor, TG) ve otomatik gerilim regülatörü (Automatic Voltage Regulator, AVR) gibi kontrol sistemleri kullanılmıştır [61]. Ancak bu kontrol sistemlerinin kapasitelerindeki sınırlamalar nedeniyle, LFO'ları en iyi şekilde sönümlemek için bir başka kontrol yöntemi olarak PSS önerilmiştir. PSS'ler, uyarım sistemini makine hızı, frekans veya güç gibi bir yardımcı stabilize edici sinyal aracılığıyla kontrol ederek güç sistemlerindeki rotor salınımlarını azaltırlar [59], [60], [62]. PSS ile ilgili olarak gerçekleştirilen ilk çalışmalarda, genellikle sabit parametrelere sahip geleneksel güç sistemi kararlı kılıcısı (Conventional Power System Stabilizer, CPSS) tercih edilmiştir. Örneğin, ilk olarak De Mello ve Concordia tarafından, PSS'nin temel yapısı sunulmuştur [62]. Sonrasında, Gibbard [63] tarafından farklı

çalışma koşulları için sabit kazançlı PSS parametrelerinin belirlenmesine yönelik bir çalışma sunulmuştur. Bunun devamında ise, Kundur ve arkadaşları tarafından [64] yerel ve alanlar arası salınım modlarında geçici durum kararlılığını arttırmak için faz ilerlemeli-faz gerilemeli (Lead-Lag, LL) tipi denetleyiciler olan CPSS'lerin parametrelerinin belirlenmesi hakkında detaylı analitik çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışmalar CPSS'ler konusunda ilk etapta öne çıkan çalışmalar olmalarına rağmen, ilerleyen yıllarda modernleşen güç sistemlerinin dinamik ve lineer olmayan bir yapıya sahip olmasıyla birlikte, CPSS'ler salınımların azaltılması amacıyla optimum performansın sağlanması konusunda yetersiz kalmıştır. Bununla birlikte, bir güç sisteminin çalışma koşullarında beklenmeyen bir arıza olması durumunda, PSS'lerin optimum performans sağlamaları gerekir. Performansı iyileştirmenin temelinde ise PSS parametrelerinin optimizasyonu yer alır [64]. PSS parametrelerinin optimizasyonu için geçmiş yıllarda doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol teknikleri [65], [66] ve bulanık mantık yapay zeka teknikleri [67] gibi geleneksel yöntemler kullanılmıştır. Bu teknikler, daha önce yer alan klasik yöntemlere kıyasla sistem kararlılığı açısından nispeten daha etkili olmalarına rağmen, çok makineli güç sistemlerinde PSS tasarımı için oldukça karmaşık ve fazladan hesaplama süresi gerektiren yöntemlerdir. Bu olumsuzlukların üstesinden gelebilmek ve bu tekniklere alternatif bir yaklaşım sunabilmek amacıyla, son yıllarda MSA algoritmalarının popüleritesi mühendislik bilimindeki çok sayıda alanda olduğu gibi güç sistemlerinde de önemli ölçüde artmıştır. MSA algoritmaları, LFO'ların meydana geldiği güç sistemlerinde kararlılığı iyileştirmek için PSS'lerin kontrol-kazanç parametrelerinin belirlenmesi amacıyla da kullanılır. Referans [68]'de, çok makineli güç sistemleri için Genetik Algoritma (GA) tabanlı PSS optimizasyonu yöntemi sunulmuştur. GA'nın avantajlı özellikleri, performans indekslerine bağlı olmaması ve problemin çözümünde minimum arama karmaşıklığına sahip olmasıdır. Ancak, kapsamlı bir arama uzayında, GA yerel bir noktada takılıp kalabilir ve bu durum en uygun çözüme yakınsama süresinin artmasına yol açar [68], [69]. Abido, [70]'te özdeğerleri minimuma indirmeye dayalı bir amaç fonksiyonu kullanarak parçacık sürüsü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) ile PSS parametrelerini belirlemiştir. Çalışma, elektromekanik salınımların sönümlenmesini iyileştirmek amacıyla WSCC 3-Makineli 9-Baralı ve New England 10-Makineli 39-Baralı güç sistemlerinde test edilmiştir. Bu çalışma, en uygun PSS tasarımı için etkili olmasına rağmen, PSO algoritmasının problemin çözümündeki başarısı önemli ölçüde algoritma parametrelerine bağlıdır ve bu optimizasyon algoritmasında sıklıkla yakınsama sorunları meydana gelmektedir. Bu algoritmaların

dışında benzetimli tavlama (Simulated Annealing, SA) [71] , tabu arama algoritması (Tabu Search, TS) [72] ve kural tabanlı bakteri besin arama algoritması da (Rule-Based Bacteria Foraging, RBBF) [73] PSS parametrelerinin optimizasyonu için önerilmiştir. Bu algoritmalar, çeşitli optimizasyon problemlerinin çözümü açısından etkili yöntemler olmalarına rağmen, özellikle yakından ilişkili parametrelerin optimizasyonunda (epistatic amaç fonksiyonu) ve parametre sayısının çok olduğu durumlarda global optimum çözümün elde edilmesinde düşük verimliliğe sahip olan algoritmalar [74]. Shayeghi ve arkadaşları [74], etkili bir arıza durumu için WSCC 3-Makineli 9-Baralı bir güç sistemindeki PSS parametrelerini belirlemek amacıyla kaotik optimizasyon algoritmasını (Chaotic Optimization, CO) önermiştir. Çalışmada, önerilen bu yöntemin salınımların sönümlenmesinde CPSS ve GA tabanlı PSS tasarımına göre üstünlüğü görülmüştür. Bir başka çalışmada ise, Abd-Elazim ve Ali [75], farklı yüklenme koşulları altında SMIB ve çok makineli güç sistemlerinde sistem kararlılığını arttırmak için PSS parametrelerinin bakteriyel besin arama algoritması (Bacterial Foraging, BF) ile optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Ancak BF'nin rastgele bir arama stratejisine sahip olması global çözümün elde edilme süresinde gecikmelere neden olmaktadır. [76], [77]'de, tek makineli sonsuz baralı ve çok makineli test sistemlerinde sırasıyla özdeğer tabanlı bir amaç fonksiyonu kullanılarak küçük sinyal kararlılığını iyileştirmek amacıyla yarasa algoritması (Bat Algorithm, BA) ile PSS parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. BA, güçlü sömürü yeteneğine sahip bir algoritma olmasına rağmen, yerel optimum noktalara takılmasından dolayı keşif özelliği bakımından zayıftır [78]. [79]'da, maksimum sönümlemenin amaç fonksiyonu olarak belirlendiği PSS tasarımında bal arısı çiftleşme optimizasyonu (Honey Bee Mating Optimization, HBMO) algoritması kullanılmıştır. Çalışmada önerilen algoritma, 10-Makineli 39-Baralı ve 16-Makineli 68-Baralı değiştirilmiş güç sistemlerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar hatanın mutlak değerinin integrali (the Integral of the Absolute magnitude of the Error, IAE), mutlak hatanın zamanla çarpımının integrali (the Integral of Time multiplied by Absolute Error, ITAE), hatanın karesinin integrali (the Integral of Square of the Error, ISE) ve hatanın karesinin zamanla çarpımının integrali (the Integral of Time multiplied by the Squared Error, ITSE) kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, HBMO algoritması, TS ve GA'ya kıyasla daha etkili sonuçlar vermiştir. Bir diğer çalışma olan [80]'de, WSCC 3-Makineli 9-Baralı güç sisteminin en uygun PSS tasarımı için guguk kuşu arama algoritması (Cuckoo Search, CS) önerilmiş ve özdeğer tabanlı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. CS sönümleme özelliklerinin yanı sıra IAE ve ITAE

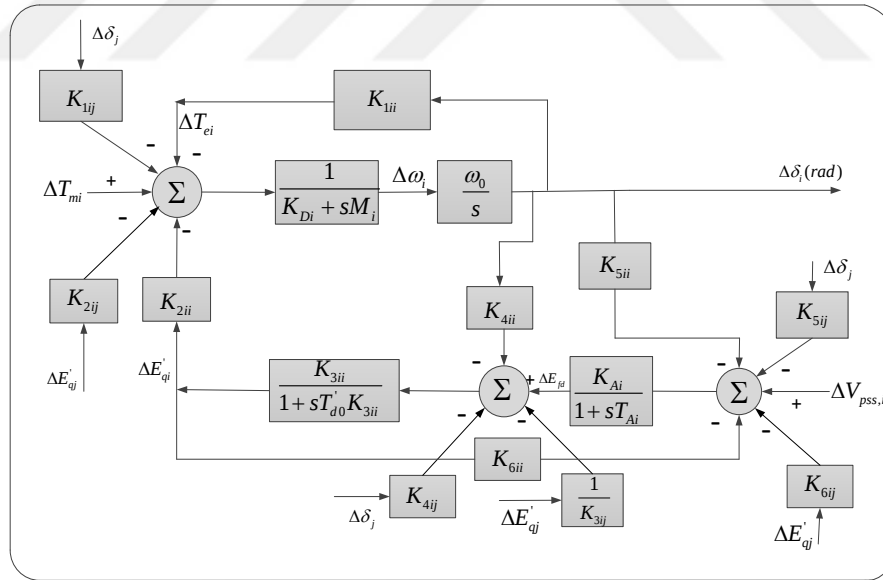
performans indeksleri açısından GA ve CPSS yöntemiyle karşılaştırıldığında, daha etkili sonuçlar vermiştir. [81]'de Islam ve arkadaşları tarafından, PSS parametrelerini belirlemek amacıyla geri izleme arama algoritması (Backtracking Search Algorithm, BSA) kullanılarak çok makineli bir güç sisteminde sönüm oranı ve özdeğerler hesaplanmıştır. [82]'de Ekinci tarafından, özdeğer tabanlı ve zaman alanı tabanlı amaç fonksiyonu kullanılarak SMIB ve WSCC 3-Makineli 9-Baralı güç sistemlerinde sinüs kosinüs algoritması (Sine-Cos Algorithm, SCA) yardımıyla en uygun PSS parametreleri belirlenmiştir. Önerilen amaç fonksiyonuna göre, SCA yöntemi BA ve simbiyotik organizma arama (Symbiotic Organism Search SOS) algoritmaları ile karşılaştırılmış ve bu algoritmalara karşı üstünlük sağlanmıştır. [83]'te, Sabo ve arkadaşları, New England 10-Makineli 39-Baralı güç sisteminde PSS'nin en uygun kontrol parametrelerini elde etmek için tarım arazisi verimliliği algoritmasını (Farmland Fertility Algorithm, FFA) önermiştir. Çalışmada, FFA yönteminin problemin çözümünde GA ve PSO algoritmalarına karşı üstün olduğu görülmüştür. [84]'te, Farah ve arkadaşları tarafından, WSCC 3-Makineli 9-Baralı ve New England 10-Makineli 39-Baralı güç sistemlerinde kaotik öğretme-öğrenme algoritması (Chaotic Teaching-Learning Algorithm, CTLA) kullanılarak en uygun PSS parametreleri belirlenmiştir. Çalışmada, zaman alanı analizinden elde edilen sonuçlar çeşitli performans indekslerine bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Buna göre, CTLA yönteminin TLA ve GA kullanılarak en uygun parametreleri belirlenen PSS'lere kıyasla üstünlüğü görülmüştür. Butti ve arkadaşları tarafından [85], geliştirilmiş balina optimizasyonu algoritması (Improved Whale Optimization Algorithm, IWOA) kullanılarak WSCC 3-Makineli 9-Baralı güç sistemi, 2-Alanlı ve 4-Makineli enterkonnekte güç sistemi ve New England 10-Makineli 39-Baralı güç sisteminde PSS tasarımı gerçekleştirilmiştir. [86]'da, Alshammari ve Guesmi tarafından, New England 10-Makineli 39-Baralı güç sisteminde ortaya çıkan elektromekanik salınımların sönümlenmesi amacıyla en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesinde kaotik ayçiçeği optimizasyonu algoritması (Chaotic Sunflower Optimization Algorithm, CSOA) önerilmiştir. [87]'de, Devarapalli ve arkadaşları tarafından 2-Alanlı ve 4-Makineli güç sisteminde kullanılan PSS'nin parametrelerinin optimizasyonu için iyileştirilmiş gri kurt optimizasyonunun (Amended Grey Wolf Optimization, AGWO) farklı hibrit varyantları önerilmiştir. Bu çalışmanın sonrasında, Devarapalli ve Bhattacharyya [88] tarafından, enterkonnekte 2-Alanlı ve 4-Makineli güç sisteminin küçük sinyal kararlılığını iyileştirmek amacıyla PSS parametrelerinin optimizasyonunda değiştirilmiş hibrit gri kurt optimizasyonu-sinüs kosinüs algoritması

(Hybrid Modified Grey Wolf Optimization-Sine Cosine Algorithm, HM GWO-SCA) önerilmiştir.

Literatürdeki çalışmalarda görüldüğü gibi, yakın geçmişten günümüze kadar olan süreçte, güç sistemlerinin geçici durum kararlılığını iyileştirmek amacıyla çok sayıda farklı MSA algoritması kullanılarak PSS parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde yer alan alt bölümlerde sırasıyla generatör ve uyarım sistemlerine, PSS'ler ve lineer güç sistemlerine ait matematiksel modellere ve bunlara ek olarak en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi probleminin genel çerçevesine ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

3.1. GENERATÖR VE UYARTIM SİSTEMLERİ

Çok makineli herhangi bir güç sisteminde, herhangi bir i makinesi doğrusal olmayan çeşitli diferansiyel denklemlerle ifade edilir. Bu çalışmada, çok makineli bir güç sisteminde, her bir generatör için Şekil 3.1'de yer alan Heffron-Philips modeli kullanılmıştır [85].



Şekil 3.1. Çok makineli güç sisteminde Heffron -Philips modeli.

Ayrıca, her senkron makine için statik uyarmalı akı sönümlü model kullanılmıştır. Her makinenin doğrusal olmayan dinamik Denklemleri (3.1) - (3.5) arasında verildiği gibidir [84]:

$$\dot{\delta}_i = \omega_b(\omega_i - 1) \quad (3.1)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i}(P_{mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - 1)) \quad (3.2)$$

$$\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0}}(E_{fdi} - (x_{di} - x'_{di})i_{di} - E'_{qi}) \quad (3.3)$$

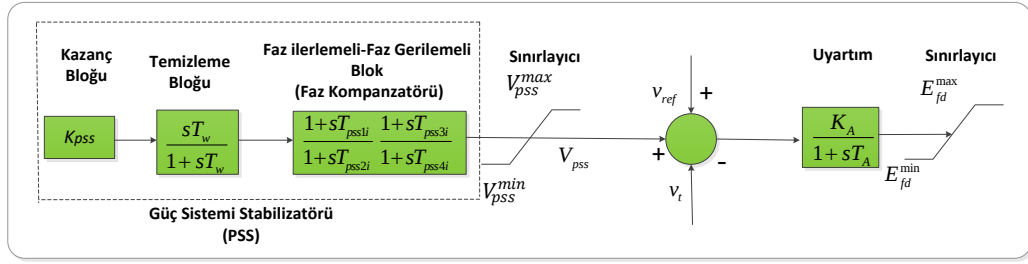
$$\dot{E}_{fdi} = \frac{K_{Ai}(v_{ref,i} - v_{t,i} + v_{pss,i}) - E_{fdi}}{T_{Ai}} \quad (3.4)$$

$$T_{ei} = E'_{qi}i_{qi} - (x_{qi} - x'_{di})i_{di}i_{qi} \quad (3.5)$$

Denklem (3.1) ve (3.5) arasında yer alan ifadelerden δ_i ve ω_i , herhangi bir i makinesine ait rotor açısı ve açısal hızdır. ω_b temel frekanstır, P_{mi} ve P_{ei} i makinesinin mekanik girişini ve elektriksel çıkış gücünü ifade eder. D_i ve M_i , i makinesinin sönümleme katsayısı ve atalet sabitidir. E_{fd} ve E'_{q} , uyarım sistemi gerilimini ve q eksenini iç gerilimini ifade eder. T'_{d0} açık devre d eksenini zaman sabitidir. T_{ei} uyarım sistemi zaman sabitidir. i_{di} ve i_{qi} , d-q eksenini armatür akımlarını gösterir. x'_{qi} ve x'_{di} , d-q eksenini geçici durum reaktanslarıdır. K_{Ai} ve T_{Ai} sırasıyla uyarım sistemi kazanç ve zaman sabitleridir. v_{ref} , v_{pss} ve v_t sırasıyla referans gerilimi, PSS'nin giriş gerilimini ve terminal gerilimini ifade eder.

3.2. GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISI

Herhangi bir güç sisteminde, PSS'nin öncelikli görevi, arıza durumu sonrasında meydana gelen hafif bir bozunumun etkisiyle oluşan LFO'ları sönümlemek için generatörün uyarım sistemine sönümleme torku eklemektir [89]. Bir PSS'nin temel yapısı; kazanç bileşeni, temizleme bileşeni ve faz kompanzatorü bileşeni olmak üzere üç temel bileşenden meydana gelir. Bu bileşenlerden kazanç bileşeni, salınımları sönümlemek için sisteme kazanç değeri sağlar. Temizleme bileşeni, yüksek geçiş filtresi özelliğini sağlarken, faz kompanzatorü bileşeni ise sistemin faz gecikmesini iyileştirir [85]. IEEE Tip-ST1 uyarım sistemi ile entegre edilen PSS'nin blok şeması Şekil 3.2'de verilirken, Denklem (3.6)'da ise PSS'nin transfer fonksiyonu verilmiştir [84]:



Şekil 3.2. IEEE Type-ST1 uyartım sistemi entegreli PSS'nin blok şeması.

$$u_{pss,i} = K_{pss,i} \frac{sT_{wi}}{1+sT_{wi}} \left[\frac{1+sT_{pss1i}}{1+sT_{pss2i}} \frac{1+sT_{pss3i}}{1+sT_{pss4i}} \right] \Delta\omega_i(s) \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da, $K_{pss,i}$, PSS kazancını ifade eder. T_{wi} temizleme bloğu için zaman sabitini gösterirken T_{pss1i} , T_{pss2i} , T_{pss3i} ve T_{pss4i} ifadeleri faz kompanzator bloğu için zaman sabitlerini ifade eder. $\Delta\omega_i$ hız sapmasını gösterir. $u_{pss,i}$ ise çıkış sinyalidir [84].

3.3. DOĞRUSAL GÜÇ SİSTEMİ MODELİ

PSS tasarımında, doğrusallaştırılmış artımlı modeller genellikle bir denge noktası etrafında kullanılır [80]. Bu nedenle, uyartım sistemi ve PSS dahil edilen doğrusallaştırılmış çok makineli güç sistemi modeli için durum denklemi (3.7)'de verilmiştir [59]:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{E}'_q \\ \Delta\dot{E}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ -\frac{K_4}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} \Delta v_{pss} \quad (3.7)$$

Buna göre, güç sisteminin doğrusallaştırılmış modeli Denklem (3.8)'de ve K_1 - K_6 sabitlerine ait denklemler Ek 1'de verilmiştir [59], [80]:

$$\Delta\dot{x} = A_{sys} \Delta x + B \Delta u \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de, A_{sys} ve B , durum değişkenlerini ve giriş matrislerini ifade eder. Ayrıca,

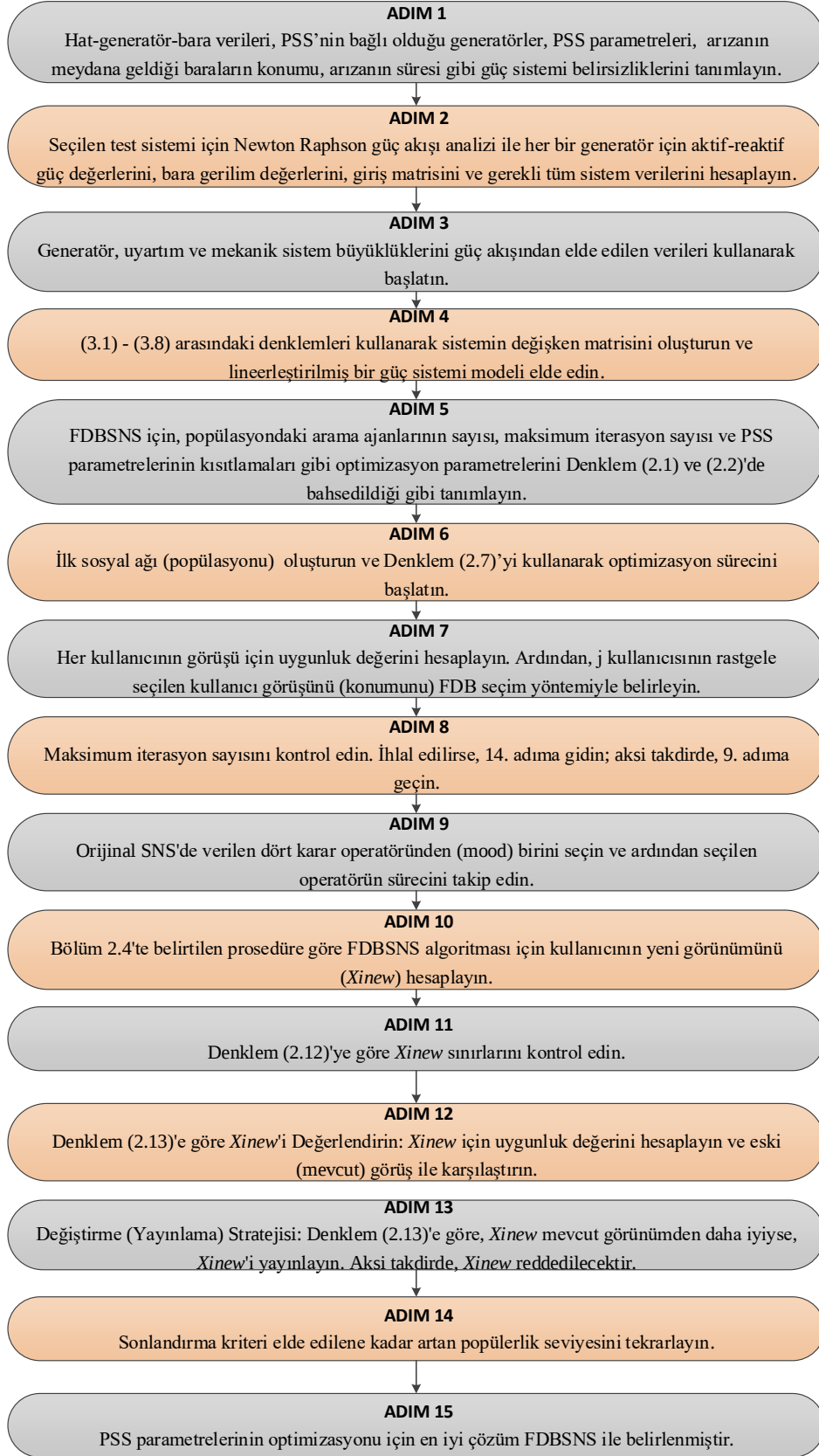
$\Delta x = [\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta E'_q \ \Delta E_{fd}]^T$ ve Δu ise giriş ve çıkış sinyallerini ifade eder.

3.4. PROBLEMİN AMAÇ FONKSİYONU

PSS'ler, güç sisteminde meydana gelen önemli bir arıza durumu sonrasında güç açıları, rotor hızları ve elektrik hatlarının güçlerindeki sapmalardan kaynaklanan salınımları minimum seviyeye indirecek şekilde tasarlanmalı ve amaç fonksiyonu bu doğrultuda belirlenmelidir. Bu çalışmada, hatanın karesinin zamanın karesi ile çarpımının integrali (Integral of Squared Time multiplied by Squared Error, *ISTSE*) amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir [47].

$$\begin{aligned}
 J &= \sum_{i=1}^{NS} ISTSE, \quad NS = 4 \\
 \text{minimize } J, \\
 ISTSE &= \sum_{i=1}^m \int_0^{t_{sim}} (t\omega_{i-1})^2 dt \\
 \text{subject to } g(x), \quad g(x) &= \begin{cases} K_{pss}^{\min} \leq K_{pss} \leq K_{pss}^{\max} \\ T_{pss,i}^{\min} \leq T_{pss,i} \leq T_{pss,i}^{\max} \end{cases} \quad (i=1,2,3,4)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Denklem (3.9)'da yer alan J amaç fonksiyonu ifadesini, $g(x)$ optimizasyon probleminin kısıtlarını, NS toplam senaryo sayısını, m generatör sayısını, t_{sim} simülasyon süresini ve ω_{i-1} , birinci generatöre göre i generatörünün bağıl rotor hızını ifade eder. $\omega_{i-1} = \omega_i - \omega_1$ (ω_1 referans rotor hızıdır). K_P ve T_1, T_2, T_3, T_4 değişkenleri sırasıyla kazanç ve zaman sabiti parametreleri olup, $[0-100]$ ve $[0,01-1]$ arasında değer alır. $K_{pss}^{\max}$ ve $K_{pss}^{\min}$ kazanç değerinin üst ve alt sınırları $T_{pss,i}^{\max}$ ve $T_{pss,i}^{\min}$ ifadeleri ise ($i=1, 2, 3, 4$) için zaman sabitinin üst ve alt sınırlarını ifade eder. Çalışmada, J amaç fonksiyonunun minimum değeri için kısıtlamalara bağlı olarak PSS parametrelerinin ($K_{pss}, T_{pss1}, T_{pss2}, T_{pss3}$ ve T_{pss4}) en uygun değerleri elde edilmiştir. Önerilen amaç fonksiyonunda yer alan *ISTSE* değeri; *ISE*, *IAE*, *ITAE* ve *ITSE* hata değerlerinden oluşur ve dört farklı performans indeksi temel alınarak hesaplanır. Bu hesaplamalara ait denklemler Bölüm 5.2.4.3'te yer almaktadır. Tez çalışmasında önerilen amaç fonksiyonu yaklaşımında asıl hedeflenen, optimizasyonu gerçekleştirilen parametrelerin farklı arıza senaryolarının tamamı için etkili sonuçlar verebilmesini sağlamaktır ve sistemin oturma süresine ve aşımara bağlı olarak daha kararlı hale gelmesi için J amaç fonksiyonunun minimum olması gerekir. FDBSNS algoritmasının en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi problemine uygulanma adımları ise Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. FDBSNS algoritması kullanılarak en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi adımları.

4. ÖNERİLEN YÖNTEM İLE TCSC TABANLI DENETLEYİCİLERİN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Sanayileşme ve nüfus artışı, elektrik enerjisi talebinin istikrarlı bir şekilde artmasındaki başlıca faktörlerdir. Talep edilen elektriksel gücün karşılanabilmesi, üretim ve tüketim arasındaki dengenin sağlanabilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Üretim ve tüketim arasındaki dengenin sağlanması için ilk etapta elektrik santrali, hat, trafo vb. sayılarının arttırılması düşünülebilir; ancak bu durum maliyetlerin ve çevresel bozulmanın artması anlamına gelmektedir. Günümüzde, modern elektrik şebekelerinin serbestleştirilmesi ve enerji piyasasındaki artan rekabetle birlikte elektrik enerjisi şirketleri tarafından kurulan güç sistemlerinin, yüklenme ve güç akış koşullarına bağlı olarak tasarım kapasitelerinin üzerinde bir performans göstermeleri beklenmektedir. Bu durum güç tesislerinde yer alan generatörleri, kararlılık sınırlarında faaliyet göstermeye mecbur bırakmaktadır [10], [90], [91].

Güç sistemi kararlılığı, bir elektrik güç sisteminin fiziksel bir bozulmaya maruz kaldıktan sonra çalışma dengesini yeniden kazanma yeteneği olarak ifade edilir ve kararlılığın sağlanması sistemin güvenli bir şekilde çalışması açısından son derece önemli bir konudur [10]. Sistemde arıza, bozucu etki vb. durumlara bağlı olarak meydana gelen kararsızlık olaylarında, elektrik uzmanlarının karşılaştığı en önemli problemlerin başında güç sistemi salınımları gelmektedir. Güç sisteminde meydana gelen elektromekanik salınımlar, sistemdeki senkron generatörlerin açısal kararlılığı ile güçlü bir şekilde ilişkilidir ve bozucu bir etkinin meydana gelmesiyle birlikte sistemde yer alan senkron generatörlerin güvenilir koşullarda çalışması zorlaşır. Yeterli sönümleme sağlanamaması durumunda, devam eden bu salınımların büyümesi ile birlikte sistemde ayrılma veya çökme gibi durumlar söz konusu olabilir. Senkron generatörlerin rotor tarafında oluşan bu elektromekanik salınımları azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla gerçekleştirilen uyarım kontrolü, kararlılığın arttırılması bakımından etkili ve ekonomik yöntemlerin başında gelir. Bununla birlikte, uyarım kontrolü; uyarım akımı limiti ve uyarım sargılarının zaman sabiti ile sınırlandırılır ve bir güç sisteminde büyük bir arıza meydana geldiğinde sadece uyarım kontrolü ile sistemde senkronizasyon sağlanamayabilir [92]. Bu durum, güç sistemlerinde farklı denetleyicilerin kullanımına ve farklı kontrol

stratejilerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmasına yol açmaktadır [61], [93]. Geçmiş yıllarda, enterkonnekte güç sistemlerinde meydana gelen salınımların sönümlenmesi amacıyla orantılı-integral-türev (Proportional-Integral-Derivative, PID) denetleyicileri kullanılmıştır [95], [96]. Ancak PID denetleyiciler, yüksek mertebeden türev terimleri içermeleri ve kararlılık güvencesi sağlamamaları gibi nedenlerden dolayı yeterli sıklıkta tercih edilmemektedir [10]. Özellikle 1990'lı yıllardan itibaren, doğrusal yaklaşımlar kullanılarak bağımsız olarak ayarlanan faz ilerlemeli-faz gerilemeli (Lead-Lag, LL) kompanzatörlerinin yer aldığı PSS'ler, sistem sönümlenmesini geliştirmek ve güç aktarım limitlerini arttırmak için generatör uyartım sistemleriyle birlikte endüstride rutin olarak kullanılmıştır. Bunun sonucunda ise bu denetleyici, salınımların sönümlenmesinde öne çıkan bir denetleyici tipi olmuş ve maliyet, kararlılık güvencesi ve kullanım kolaylığı gibi avantajlarının da etkisiyle sıklıkla tercih edilmiştir [10], [76], [91], [96]–[98]. Bununla birlikte, PSS'ler ek geri beslemeli stabilize edici sinyaller sağlamalarına rağmen, bu denetleyiciler farklı yüklenme durumlarına bağlı olarak çeşitli çalışma koşullarında yeterli sönümleme üretemeyebilir ve bu nedenle farklı denetleyici alternatiflerine de ihtiyaç duyulmaktadır.

Son dönemlerde güç elektroniğinde meydana gelen gelişmeler, güç sistemlerinde esnek alternatif akım iletim sistemleri (Flexible Alternating Current Transmission System, FACTS) denetleyicilerinin kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Yakın geçmişte geliştirilmiş olan FACTS denetleyicileri; faz kayması, gerilim ve iletim hattı empedansı gibi çeşitli şebeke parametreleri konusunda sürekli ve hızlı hareket ederek güç şebekelerinin daha yoğun kullanımı için umut verici olmuştur. Bu sayede, güç akışının kontrolü daha etkili bir şekilde sağlanmakta, gerilimler nominal limitler içerisinde tutulmakta ve bu durum sistemdeki kararlılık marjlarının artışı sağlamaktadır. FACTS denetleyicileri, şebeke durumunu çok kısa bir sürede kontrol etme yetenekleri ve güç sistemi operatörlerine daha fazla seçenek sunarak çalışma esnekliği sağlamaları gibi benzersiz özellikleri sayesinde, PSS'lere alternatif veya tamamlayıcı olarak arıza durumlarında oluşan LFO'ları sönümlemek ve sistemin geçici durum kararlılığını iyileştirmek amacıyla da kullanılmıştır [90], [93], [99]. Örneğin, Norozian ve Anderson [100] tarafından sunulan çalışmada, iletim hattı yüklenmesinin ve yük özelliklerinin elektromekanik salınımların sönümlenmesi üzerindeki etkisi FACTS cihazlarından statik var kompanzatör (Static Var Compensator, SVC) kullanılarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Bir başka çalışmada ise Wang ve Swift [101] tarafından, birleşik yük akışı

kontrol cihazının (Unified Power Flow Controller, UPFC) sağladığı sönümleme torku tartışılmıştır. Güç sistemlerinde geçici durum kararlılığının iyileştirilmesi için, seri FACTS denetleyicilerinden bir tanesi olan, iletim hattı empedansının hızlı ve sürekli olarak değiştirilmesine izin veren tristör kontrollü seri kapasitör (Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC) de kullanılmaktadır. TCSC, bir iletim hattı üzerindeki güç akışını tam olarak düzenleme, gerilim desteği sağlama, kısa devre akımlarının sınırlama, senkron altı rezonansı azaltma, geçici durum kararlılığını iyileştirme ve alanlar arası güç salınımlarının sönümlenmesi gibi konularda son derece etkili bir potansiyele ve uygulamaya sahiptir [94], [100]. TCSC denetleyicisinin güç sistemi kararlılığı üzerindeki etkisinin araştırılması, araştırmacılar tarafından ilgi gören bir konu olmuştur. Örneğin, Chen ve arkadaşları [102], bir kutup yerleştirme tekniği kullanarak çok makineli bir güç sisteminde TCSC için durum geri beslemeli denetleyici sunmuşlardır. Bir başka çalışmada, Chang ve Chow [103] tarafından TCSC için performans indeksinin en aza indirildiği bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Sonrasında [104]'te, TCSC'nin elektromanyetik geçici durum analizini güç sistemi kararlılık analizine dahil edebilen bir modelleme yöntemi açıklanmış ve TCSC'nin farklı modelleme yöntemlerinin kullanıldığı benzetim çalışmaları sunulmuştur. Simülasyon sonuçları, modelleme yönteminin kullanılmasının avantajlarını göstermiştir. Bir başka çalışmada [105], TCSC cihazı tarafından çoklu güç sistemi çalışma koşullarında alanlar arası salınımları sönümlemek amacıyla ek bir denetleyici olarak kullanılabilecek etkili bir yerel sinyali belirlemek için bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada önerilen metodolojileri göstermek için iki alanlı dört generatörlü güç sisteminde, geleneksel bir LL denetleyicisi ve çok adımlı bir kontrol tasarım yaklaşımı kullanan bir denetleyici olmak üzere iki farklı tasarım sunulmuştur. Bunlara ek olarak ilerleyen yıllarda, Kumar [106] tarafından lineer kuadratik regülatör tabanlı TCSC denetleyicisi tasarımı ve Halder ve arkadaşları [107] tarafından sıfır dinamik yöntemi kullanılarak lineer olmayan bir TCSC denetleyicisi önerilmiştir.

FACTS cihazları ile sönümleme kontrolünün incelendiği yukarıda yer alan çalışmalarda, denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesine yönelik herhangi bir çaba gösterilmemiştir. Bununla birlikte, FACTS denetleyicilerinin geçici durum kararlılığında oluşan güç salınımlarını sönümleme performansı en uygun denetleyici parametrelerinin belirlenmesine bağlıdır [10], [108]. Ayrıca, birden fazla denetleyicinin yer aldığı sistemlerin tasarımında denetleyiciler uygun şekilde koordine edilmezse, denetleyicilerin etkileşimi nedeniyle sistem kararsız duruma geçebilir. Bu nedenle, güç sistemlerinde

oluşan salınımları başarılı bir şekilde sönümlmek için denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi zorlu bir optimizasyon problemi olarak karşımıza çıkmaktadır [10], [108]. Sönüm denetleyicilerinin tasarımı, çeşitli optimizasyon teknikleri kullanılarak çözülen bir optimizasyon problemidir. Denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi, güvenli çalışmayı sağlamak için güç sistemlerindeki salınımlara karşı mümkün olan en iyi çözümdür [10]. Geçmişte, geleneksel PSS tasarımı probleminin çözümü için matematiksel programlama, gradyan yöntemi, özdeğer analizi ve modern kontrol teorisi, ikinci dereceden programlama, bulanık mantık, H_∞ tabanlı denetleyici, sinir ağı denetleyicisi gibi çeşitli geleneksel ve deterministik yöntemler önerilmiştir [99], [109]–[112]. Ancak bu geleneksel yöntemler, hesaplama süresi açısından dezavantajlı olup, yavaş yakınsama gösteren yöntemlerdir. Ayrıca, bu tür yöntemlerde arama süreci yerel minimumlara takılmaya yatkındır ve bu nedenle elde edilen çözümler en uygun değerlerde olmayabilir [99], [113].

Son yıllarda, güç sistemlerinde yer alan denetleyicilerin en uygun parametrelerini belirlemek ve sönümleme performansını iyileştirmek amacıyla MSA algoritmaları popülerlik kazanmıştır. Literatürde PID, PSS ve çeşitli FACTS denetleyicilerinin parametrelerinin MSA algoritmaları kullanılarak en uygun parametrelerinin belirlendiği çeşitli çalışmalar mevcuttur. Örneğin, 2000’li yılların başında TCSC tabanlı denetleyicilerin tasarımında MSA’ların kullanıldığı ilk çalışmalardan olan ve Abido [114] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, SA algoritması kullanılarak PSS ve TCSC tabanlı denetleyici için bir kutup yerleştirme tekniği sunulmuştur. Çalışmada önerilen SA tabanlı PSS ve TCSC denetleyicileri, farklı bozunumlar ve yükleme koşulları için SMIB güç sisteminde özdeğer analizi ve lineer olmayan simülasyon sonuçları açısından LFO’ların etkili bir şekilde sönümlenmesine bağlı olarak incelenmiş ve önerilen denetleyicilerin, şiddetli bozucu etki altında sistemin gerilim profilini büyük ölçüde iyileştirdiği gözlenmiştir. Sonrasında, Panda ve Padhy tarafından [115], SMIB güç sisteminde kararlılık analizi gerçekleştirmek için bozucu etkiye maruz kalan bir sistemde, zaman alanı tabanlı bir amaç fonksiyonu önerilmiş ve TCSC denetleyicisinin en uygun parametrelerini belirlemek için GA yöntemi kullanılmıştır. Aynı yazarların bir başka çalışmasında ise yine SMIB güç sistemi için PSO algoritması kullanılarak PSS ve TCSC parametreleri ayrı ayrı ve koordineli bir şekilde belirlenmiştir [116]. Sonrasında ise, literatürdeki öncü çalışmalardan olan ve bu tez çalışmasında da referans olarak alınan Panda [91] tarafından sunulan çalışmada, TCSC tabanlı LL ve TCSC tabanlı PID olmak

üzere iki tür denetleyici yapısı dikkate alınarak, denetleyicilerin tasarım problemi bir optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Kullanılan denetleyicilerin parametreleri, DE algoritması kullanılarak belirlenmiş ve bu parametrelere bağlı olarak güç sisteminin kararlılığını iyileştirmek amacıyla TCSC tabanlı LL ve PID denetleyicilerinin dinamik performansları farklı yüklenme koşulları ve çeşitli bozucu etkiler altında SMIB ve WSCC 3-makinelili 9-baralı test sistemlerinde analiz edilmiştir. Bu çalışmanın ardından, Shayeghi ve arkadaşları [117] tarafından PSS ve TCSC denetleyicilerinin eş zamanlı koordineli tasarımı için PSO algoritmasına dayalı yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışmada, önerilen denetleyicinin etkisi simulink tabanlı benzetim çalışmaları ve bazı performans indeksleri aracılığıyla iki alanlı dört makineli bir güç sisteminde test edilmiştir. Simülasyon sonuçları, farklı çalışma koşulları altında alanlar arası düşük frekanslı salınımların sönümlenmesi açısından önerilen yöntemin etkili olduğu göstermiştir. Bir başka çalışmada ise yine Panda [118] tarafından TCSC tabanlı bir PID denetleyici parametrelerinin en uygun değerinin belirlenmesi için pareto tabanlı baskın olmayan genetik algoritma-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II) tekniği kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada, tasarımın amacı minimum maliyetle maksimum sönümleme elde etmek olup, simülasyon sonuçları çeşitli kontrol sinyalleri için farklı yükleme koşulları ve bozucu etkiler altında sunulmuştur. Sonrasında, Ali ve Abd-Elazim [93] tarafından çok makineli bir güç sisteminde yer alan PSS ve TCSC denetleyicilerinin eş zamanlı tasarımı için, generatörler arasındaki hız sapmaları amaç fonksiyonu olarak belirlenmiş ve önerilen amaç fonksiyonunun minimize edilmesi için denetleyici parametreleri bakteri sürüsü optimizasyonu (Bacterial Swarm Optimization, BSO) kullanılarak belirlenmiştir. Farklı çalışma koşulları ve farklı bozucu etkiler için gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında, BSO algoritması BF ve PSO algoritmalarıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonrasında Eslami ve arkadaşları [99] tarafından sunulan çalışmada, PSS ve TCSC denetleyicilerinin koordineli tasarım problemi, sönüm oranı ve sönüm faktörü ile ilgili iki amacın birleştirildiği çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir. Çalışmada, önerilen denetleyicilerin tasarım parametreleri GSA ile belirlenmiştir. GSA tabanlı denetleyicilerin performansı, farklı bozulmalara, yükleme koşullarına ve sistem parametresi varyasyonlarına maruz kalan zayıf bağlı bir güç sistemi üzerinde test edilmiştir. Özdeğer analizi ve doğrusal olmayan simülasyon sonuçları, GSA tabanlı denetleyicilerin düşük frekanslı salınımların etkili bir şekilde sönümlenmesi konusunda GA'ya kıyasla üstün olduğunu göstermiştir. Bir başka çalışmada, Sethi ve arkadaşları [119] tarafından, farklı yükleme koşulları için sistemin

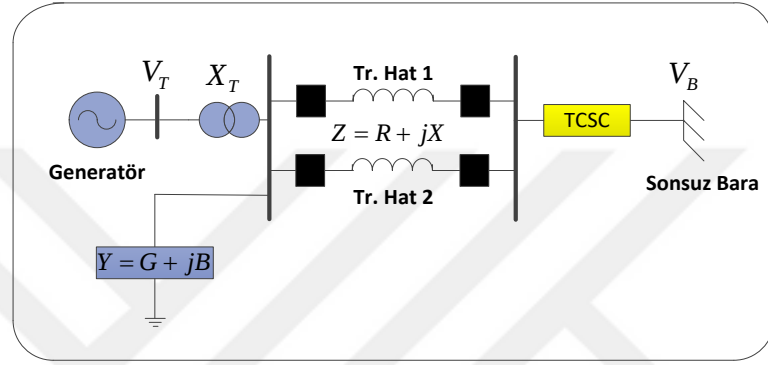
çeşitli arıza durumlarındaki dinamik performansının iyileştirilmesi amacıyla TCSC tabanlı PID denetleyicisinin en uygun parametreleri CS algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen kararlılık analizinde CS algoritması NSGA-II algoritmasına kıyasla daha etkili sonuçlar vermiştir. Naresh ve arkadaşları [120] tarafından sunulan çalışmada ise, PSS ve TCSC denetleyicilerinin parametrelerinin eş zamanlı olarak koordineli tasarımı için geliştirilmiş uyum arama algoritması (Improved Harmony Search Algorithm, IHSA) önerilmiştir. Önerilen yöntemin etkisini incelemek amacıyla, WSCC 3-Makinelili 9-Baralı ve New England 10-Makinelili 39-Baralı test sistemlerinde çok çeşitli yükleme koşulları ve şiddetli arıza durumları altında kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, önerilen IHSA tabanlı denetleyicilerin düşük frekanslı alanlar arası salınımları sönümlemedeki etkisini ve sağlamlığını göstermek için elde edilen özdeğer analizi ve lineer olmayan simülasyon sonuçları GA, PSO, BSO ve HS gibi algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Shahgholian ve arkadaşları [121] tarafından sunulan çalışmada, iki-alanlı dört-makinelili bir güç sisteminin kararlılığını arttırmak amacıyla PSS ve TCSC denetleyicilerine ait parametreler hız güncellemesi tabanlı geliştirilmiş bir PSO algoritması (Velocity Update Relaxation Particle Swarm Optimization, VURPSO) ve GA kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sistem yanıtları incelendiğinde; hız sapması, rotor açısı ve çıkış gücü grafikleri açısından VURPSO algoritması ve GA kombinasyonunun daha iyi bir tasarım ve kararlılığa yol açtığı görülmüştür. Bir başka çalışmada, Islam ve arkadaşları [122] tarafından PSS ve TCSC'nin koordineli tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu denetleyicilere ait en uygun parametre değerleri geri izleme arama algoritması (Backtracking Search Algorithm, BSA) kullanılarak belirlenmiştir. Tasarımın etkisini gösterebilmek amacıyla, 5-alanlı 16-makinelili bir güç sisteminde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve önerilen yöntem sönümleme performansı ve yerleşme zamanı açısından PSO ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, BSA tabanlı tasarımın sistem kararlılığını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Alomoush [123] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, PSS ve TCSC dahil edilen bir güç sisteminin denetleyicilerinin aynı anda optimum tasarımı için SOS algoritması uygulanmıştır. Sunulan çalışmada, yazar tarafından SMIB güç sisteminde gerçekleştirilen test çalışmasında, şiddetli bozucu etkiler altında SOS algoritmasının PSO ve GA'ya kıyasla salınımları daha etkili şekilde sönümleyebildiği ifade edilmiştir. İlerleyen süreçte sunulan bir başka çalışmada, Jokarzadeh ve arkadaşları [61] tarafından, güç sisteminde meydana gelen salınımları azaltmak için lineer kuadratik regülatörü (Linear Quadratic Regulator, LQR) en uygun şekilde ayarlayarak senkron altı

salınımların sönümleme kapasitesini geliştirmek amacıyla yeni bir kontrol stratejisi sunulmuştur. Önerilen model, optimal bir kontrol problemi olarak formüle edilen LQR denetleyicileri ile birlikte PSS ve TCSC koordinasyonunu ele almıştır. Çalışmada, kontrol parametrelerini elde etmek amacıyla DE algoritması kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar, önerilen kontrol yönteminin yerleşme zamanı, maksimum aşım ve sistem performans indeksleri açısından en etkili ve hızlı yanıtları sunduğunu göstermiştir. Bir diğer çalışmada ise Agrawal ve Gowda [124] tarafından PID, PSS ve TCSC denetleyicilerine ait parametreler güve alevi optimizasyonu (Moth Flame Optimization, MFO) kullanılarak ISE ve ITAE amaç fonksiyonlarının minimize edilmesi amacıyla optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen zaman alanı sonuçları ve sistemin sönümleme performansı GA ile karşılaştırılmış ve bu sayede daha etkili sonuçlar elde edilmiştir.

Literatür çalışmalarından da görüldüğü üzere, yakın geçmişten günümüze kadar gelen süreçte güç sistemlerinde geçici durum kararlılığının iyileştirilmesi amacıyla TCSC tabanlı farklı denetleyicilerin parametrelerinin optimizasyonu, çeşitli MSA algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde ise, geliştirilen FDBSNS algoritmasının etkisini daha açık bir şekilde gösterebilmek amacıyla, geliştirilen algoritma TCSC tabanlı denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümünde uygulanmıştır. Çalışmada, faz ilerlemeli-faz gerilemeli (LL) ve orantılı-integral-türev (PID) yapısı olmak üzere iki tür TCSC tabanlı denetleyici yapısı dikkate alınmıştır. Optimizasyon probleminde amaç, farklı yüklenme senaryolarına ve ciddi arıza durumlarına maruz kalan SMIB güç sisteminde sistemin kararlılığını iyileştirmektir. Amaç fonksiyonu olarak hatanın zamanla çarpılmış mutlak değerinin integrali (ITAE) tercih edilmiştir. ITAE'yi minimum değere indirmek amacıyla FDBSNS kullanılarak, denetleyicilerin en uygun parametreleri belirlenmiştir. Tez çalışmasının bir önceki bölümünde yer alan problemin çözümünde kullanılan algoritmaların tamamı TCSC tabanlı denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümünde de kullanılmış ve FDBSNS algoritması 11-farklı rakip algoritma ile karşılaştırılmıştır. İlerleyen alt bölümlerde sırasıyla, SMIB güç sisteminde TCSC'nin modellenmesi, TCSC tabanlı denetleyici yapılarının modellenmesi, TCSC tabanlı denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi probleminin genel çerçevesi ve amaç fonksiyonu ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.1. SMIB GÜÇ SİSTEMİNDE TCSC'NİN MODELLENMESİ

Tez çalışmasının bu alt bölümünde, Şekil 4.1'de yer alan TCSC denetleyicisinin iki paralel hatta seri bir bağlantı ile dahil edildiği SMIB güç sistemi ele alınmıştır. Sistemde yer alan generatör yükünün admitans değeri $Y = G + jB$ ve çift iletim hattının toplam empadans değeri $Z = R + jX$ olarak ifade edilir. Şekil 4.1'de yer alan V_T ve V_B ifadeleri sırasıyla generatör terminali ve sonsuz bara gerilimidir. X_T ise transformatörün reaktansıdır.



Şekil 4.1. TCSC entegreli SMIB güç sistemi.

TCSC denetleyicisinin reaktans ayarının karmaşık ve dinamik bir süreç olduğu bilinmektedir. TCSC kontrol stratejisinin etkili tasarımı ve doğru değerlendirmesi, bu sürecin simülasyon doğruluğuna bağlıdır. TCSC; kapasitör bankları, by-pass indüktörü ve çift yönlü tristörler olmak üzere üç temel bileşenden meydana gelir [91]. Tristörlerin ateşleme açıları kontrol edilirken, TCSC reaktansı bazı sistem parametre varyasyonlarına yanıt olarak bir sistem kontrol algoritmasına göre ayarlanır [125]. Tristör ateşleme açısının (α) veya iletim açısının (σ) değişimine göre bu süreç, güç sistemine sunulan reaktans arasında hızlı bir geçiş olarak modellenebilir. TCSC'den geçen toplam akım sinüsoidal olarak kabul edilirse, temel frekanstaki eş değer reaktans X_{TCSC} değişken reaktansı olarak ifade edilebilir. α ve X_{TCSC} reaktansı arasındaki ilişki Denklem (4.1)'de verildiği gibi açıklanabilir [91]:

$$X_{TCSC}(\alpha) = X_c - \frac{X_c^2}{(X_c - X_L)} \frac{(\sigma + \sin \sigma)}{\pi} + \frac{4X_c^2}{(X_c - X_L)} \frac{\cos^2(\sigma/2)}{(k^2 - 1)} \frac{[k \tan(k\sigma/2) - \tan(\sigma/2)]}{\pi} \quad (4.1)$$

Bu denklemde, X_c sabit kapasitörün nominal reaktansı, X_L sabit kondansatöre paralel bağlı indüktörün endüktif reaktansı, σ TCSC denetleyicisinin iletim açısı ($\sigma=2(\pi-\alpha)$) ve k kompanzasyon oranıdır ($k = \sqrt{X_c - X_p}$). α ve TCSC tarafından sunulan eşdeğer temel frekans reaktansı arasındaki ilişki, $X_{TCSC}(\alpha)$ olarak ifade edilir ve TCSC burada α tarafından uygulanan sınırlar tarafından tanımlanan çalışma bölgesi içinde değişken bir kapasitif reaktans olarak modellenmiştir. Böylece, $X_{TCSCmin} \leq X_{TCSC} \leq X_{TCSCmax}$ ve $X_{TCSCmax} = X_{TCSC}(\alpha_{min})$ ve $X_{TCSCmin} = X_{TCSC}(180^\circ) = X_c$ olarak ifade edilir. Tez çalışmasının bu bölümünde, denetleyicinin yalnızca kapasitif bölgede ($\alpha_{min} > \alpha_r$) çalıştığı varsayılmıştır. Burada, α_r rezonans noktasına karşılık gelir ve $90^\circ < \alpha < \alpha_r$ ile ilişkili endüktif bölge kararlılık çalışmalarında uygun şekilde modellenemeyen yüksek harmonikleri indükler [91].

TCSC'li bir güç sisteminin modellenmesinde; generatör, elektromekanik salınım denklemi ve generatör iç gerilim denkleminde oluşan üçüncü dereceden modelle temsil edilir. Durum denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [91]:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= [P_m - P_e - D(\omega - 1)] / M \\ \dot{\delta} &= \omega_b(\omega - 1) \\ V_T &= v_d + jv_q \\ I &= i_d + ji_q\end{aligned}\tag{4.2}$$

P_m ve P_e generatörün mekanik ve elektriksel çıkış güçlerini, M ve D eylemsizlik katsayısı ve sönümleme katsayısını, ω_b senkron hızı, V_T terminal gerilimini, I akımı, δ ve ω rotor açısı ve hızını ifade eder.

Armatür akımının d eksen ve q eksen bileşenleri, yani I akımı Denklem (4.3)'te verildiği şekilde hesaplanabilir. Ayrıca Denklem (4.3)'te verilen ifadeler Denklem (4.4) - (4.8) arasında açıklanmıştır [91]:

$$\begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Yd \\ Yq \end{bmatrix} E_q' - \frac{V_B}{Z_e^2} \begin{bmatrix} R_2 & X_1 \\ -X_2 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \delta \\ \cos \delta \end{bmatrix}\tag{4.3}$$

$$Y_d = (C_1 X_1 - C_2 R_2) / Z_e^2, \quad Y_q = (C_1 R_1 + C_2) / Z_e^2\tag{4.4}$$

$$C_1 = 1 + RG - XB, \quad C_2 = RB + XG\tag{4.5}$$

$$Z_e^2 = R_1 R_2 + X_1 X_2 \quad (4.6)$$

$$R_1 = R - C_2 X_d' \quad , \quad R_2 = R - C_2 X_q \quad (4.7)$$

$$X_1 = X_{Eff} + C_1 X_q \quad , \quad X_2 = X_{Eff} + C_1 X_d' \quad , \quad X_{Eff} = X - X_{TCSC}(\alpha) \quad (4.8)$$

Bu denklemlere ek olarak, Pe gücü, $\dot{E}_q'$ iç gerilim ifadesi ve V_T terminal gerilimi ifadeleri Denklem (4.9) - (4.11) arasında verilmiştir:

$$Pe = \dot{E}_q' i_q + (X_q - X_d') i_d i_q \quad (4.9)$$

$$\dot{E}_q' = E_{fd} - E_q' - [x_d - x_d'] i_d / T_{d0}' \quad (4.10)$$

$$V_T = \sqrt{(x_q i_q)^2 + (E_q' - X_d i_d)^2} \quad (4.11)$$

Yukarıdaki denklemlerde E_{fd} alan gerilimidir. T_{d0}' açık devre zaman alanı sabiti, X_d ve X_d' generatörün d -ekseni reaktansı ve d -ekseni geçici durum reaktansıdır. Bu çalışmada, basitleştirilmiş IEEE Type-ST1 uyarma sistemi kullanılmıştır ve Denklem (4.12)'de verildiği gibi ifade edilir:

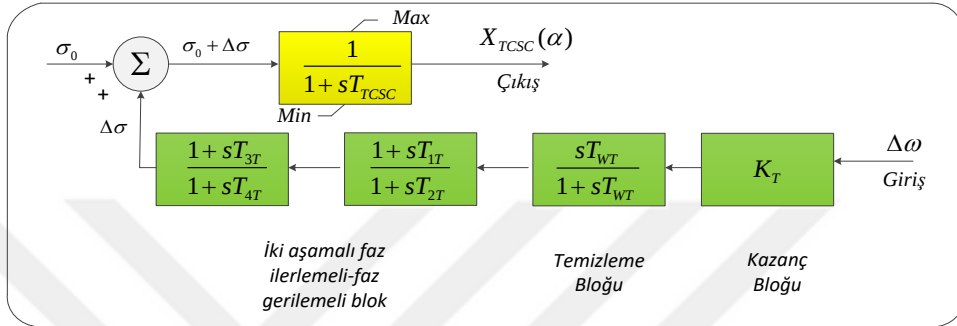
$$\dot{E}_{fd} = [K_A (V_{ref} - V_T) - E_{fd}] / T_A \quad (4.12)$$

Bu denklemde, K_A ve T_A uyartım sisteminin kazanç ve zaman sabitleridir. V_{ref} ise referans gerilimidir.

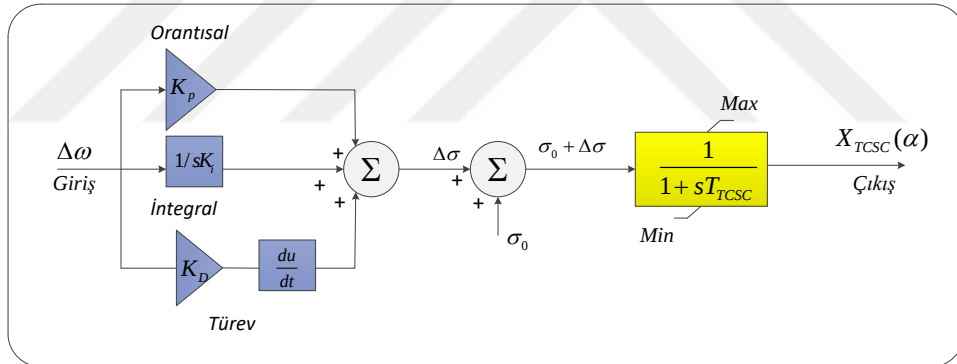
4.2. TCSC TABANLI DENETLEYİCİ YAPILARININ MODELLENMESİ

Son yıllarda kontrol şemalarının geliştirilmesinde önemli adımlar atılmasına rağmen, geleneksel LL denetleyicisinin yanı sıra klasik PID denetleyicisi ve varyantları; yapısal basitlikleri, güvenilirlikleri ve performans ile maliyet arasındaki uygun oran nedeniyle çok sayıda endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir. Bu faydaların ötesinde, bu denetleyiciler aynı zamanda basitleştirilmiş dinamik modelleme, daha düşük kullanıcı

becerisi gereksinimleri ve mühendislik uygulamaları için büyük önem taşıyan minimum geliştirme çabası sunar [91], [126]. Bu bilgiler ışığında, bu çalışmada TCSC tabanlı bir denetleyici kullanılarak, gerçekleştirilecek analiz için hem LL hem de PID denetleyici yapıları dikkate alınmaktadır. TCSC tabanlı sönüm denetleyicisinin LL ve PID yapıları, sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Önerilen denetleyicilerin giriş sinyali hız sapması ($\Delta\omega$) olup; çıkış sinyali ise TCSC tarafından sunulan reaktanstır ($X_{TCSC}(\alpha)$).



Şekil 4.2. TCSC tabanlı LL denetleyici yapısı.



Şekil 4.3. TCSC tabanlı PID denetleyici yapısı.

LL denetleyici yapısı, bir kazanç bloğu (K_T), bir sinyal temizleme bloğu ve iki aşamalı faz kompanzasyon bloklarından oluşur. Sinyal temizleme bloğu, T_{WT} zaman sabiti ile giriş sinyalindeki salınımlarla ilişkili sinyallerin değişmeden geçmesine izin verecek kadar yüksek geçiren bir filtre görevi görür. Temizleme bloğu fonksiyonu açısından bakıldığında, T_{WT} 'nin değeri kritik değildir ve 1–20 s aralığında olabilir [92]. Faz kompanzasyon bloğu (zaman sabitleri T_{1T} , T_{2T} , T_{3T} ve T_{4T}), giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki faz gecikmesini kompanze etmek için uygun faz-ileri özelliklerini sağlar. PID denetleyicinin oransal, integral ve türev parametreleri sırasıyla K_P , K_I ve K_D 'dir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te σ_0 , güç akışı kontrol döngüsü tarafından istenen şekilde ilk iletim açısını

ifade eder. Kararlı durum güç akış döngüsü, pratikte oldukça yavaş hareket eder ve bu nedenle bu çalışmada, σ_0 'ın büyük bozunum geçici durum periyodu boyunca sabit olduğu varsayılmıştır. Hat reaktansının istenen değeri $\Delta\sigma_0$ ise iletim açısındaki değişikliğe göre elde edilir. Etkin reaktans (X_{Eff}) ise Denklem (4.13)'te verilmiştir:

$$X_{Eff} = X - X_{TCSC}(\alpha) \quad (4.13)$$

Bu denklemde, $X_{TCSC}(\alpha)$, TCSC'nin α ateşleme açısındaki reaktansıdır. Ateşleme açısı α 'nın değeri, TCSC denetleyicisindeki $\Delta\sigma_0$ 'nin çıkışındaki değişikliğe göre değiştirilir, $\alpha = \Omega - \sigma/2$ ve $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$ olup, σ_0 iletim açısının başlangıç değeridir.

4.3. PROBLEMİN AMAÇ FONKSİYONU

Tez çalışmasında kullanılan LL denetleyicisi için temizleme zamanı sabiti $T_{WT}=10$ s ve zaman sabitlerinden T_{2T} ve $T_{4T} = 0,1$ s olarak belirlenmiştir [91]. Optimizasyonu gerçekleştirilecek parametreler ise K_T denetleyici kazancı ve T_{1T} ve T_{3T} zaman sabiti olarak belirlenmiştir. K_T ve T_1 - T_3 değişkenleri için sırasıyla [20-100] ve [0,01- 0,5] sınır aralıkları dikkate alınmıştır. PID denetleyicisi kullanılması durumunda ise optimizasyonu gerçekleştirilecek parametreler K_P , K_i ve K_D parametreleridir. Sınır aralıkları, K_P için [20-100] ve K_i ile K_D için [0,01- 0,5] değerlerindedir. Kararlı durum koşulları için $\Delta\sigma$ ve σ_0 değerleri sabittir. Dinamik koşullar boyunca, iletim açısı (σ) ve dolayısıyla da $X_{TCSC}(\alpha)$, güç sistemi kararlılığını geliştirmek için düzenlenir. İstenilen kompanzasyon değeri, $\Delta\omega$ 'deki değişime göre iletim açısındaki değişimle ($\Delta\sigma$) elde edilir. Dinamik koşullar sırasında, iletim açısı (σ) aşağıdaki denklemde verildiği gibi ifade edilir [91]:

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma \quad (4.14)$$

Tez çalışmasının bu bölümünde, LL ve PID denetleyicilerinin parametrelerinin optimizasyonu için [91]'de yer alan referans çalışmada da olduğu gibi amaç fonksiyonu Denklem (4.15)'te yer alan ITAE olarak belirlenmiştir.

$$J = \sum_{j=1}^{NS} ITAE, \quad NS=1,3$$

$$minimize \quad J,$$

$$ITAE = \int_0^{t_1} t |e(t)| dt \quad (4.15)$$

$$subject \quad to \quad g(x), \quad \begin{matrix} K_{LL}^{min} \leq K_{LL} \leq K_{LL}^{max} \\ T_{LL,i}^{min} \leq T_{LL,i} \leq T_{LL,i}^{max} \end{matrix} \quad veya \quad \begin{matrix} K_p^{min} \leq K_p \leq K_p^{max} \\ K_i^{min} \leq K_i \leq K_i^{max} \\ K_D^{min} \leq K_D \leq K_D^{max} \end{matrix}$$

Yukarıdaki denklemde yer alan J ifadesi amaç fonksiyonunu ve $g(x)$ ifadesi optimizasyon probleminin kısıtlarını ifade eder. Sistem kararlılığını iyileştirmek için, bu amaç fonksiyonunun minimum değere indirilmesi hedeflenmektedir. Güç sistemi kararlılık problemlerinde, $ITAE$ kullanılarak, yani zaman hata ile çarpılarak salınımlar daha çabuk ortadan kalkar ve yerleşme zamanı daha kısa olur. Bununla birlikte, e ifadesi hata sinyalinin temsil eder. Tez çalışmasında, bir bozunumun ardından meydana gelen hız sapması $\Delta\omega$, hata sinyali olarak alınmıştır. $\Delta\omega = \omega_i - \omega_0$ olarak ifade edilir ve ω_0 referans rotor hızı olup, ($\omega_0 = 0$) olarak belirlenmiştir. t_1 simülasyon zaman aralığını ve NS ise yüklenme durumu senaryolarının sayısını ifade eder. K_{LL}^{max} ve K_{LL}^{min} LL denetleyici için kazanç değerinin üst ve alt sınırlarını $T_{LL,i}^{max}$ ve $T_{LL,i}^{min}$ ifadeleri ise zaman sabitinin üst ve alt sınırlarını ifade eder. Öte yandan K_p^{max} , K_p^{min} , K_i^{max} , K_i^{min} , K_D^{max} ve K_D^{min} ifadeleri sırasıyla orantısız, integral ve türev kazanç parametrelerinin alt ve üst sınırlarını ifade eder.

Test çalışmasının ilk aşamasında, TCSC tabanlı denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi [91]'de yer alan referans çalışmada olduğu gibi tek bir senaryo için düşünülmüştür. Ancak ikinci aşamada ise, tıpkı bir önceki bölümde yer alan optimizasyon probleminde olduğu gibi, üç farklı yüklenme senaryosunun tamamı için denetleyici parametrelerinin belirlenmesi durumu söz konusudur. İlk aşamada TCSC tabanlı LL denetleyicisi için K_{LL} , T_{LL1} ve T_{LL3} parametrelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi amaçlanırken, TCSC tabanlı PID denetleyicisinde K_p , K_i , K_D parametrelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İkinci aşamada birinci aşamadan farklı olarak sınır aralıkları aynı kalmak koşuluyla TCSC tabanlı LL denetleyicisi için K_{LL} , T_{LL1} , T_{LL2} , T_{LL3} ve T_{LL4} parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada optimizasyonu gerçekleştirilen TCSC tabanlı PID parametreleri ise birinci aşama ile aynıdır.

5. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI

5.1. ÖNERİLEN ALGORİTMANIN CEC 2014 VE CEC 2017 KIYASLAMA PROBLEMLERİ İÇİN TEST EDİLMESİ

Bu alt bölümde, CEC 2014 [45] ve CEC 2017 [46] kıyaslama problemleri kullanılarak, FDBSNS'nin performansı test edilmiş ve önerilen algoritma orijinal SNS algoritması ile karşılaştırılmıştır. Rakip algoritma olan SNS algoritmasının parametre ayarları, orijinal makalesindeki veriler ile aynı olup, ayrıntılı bilgi [44]'te verilmiştir. CEC 2014'te F1'den F30'a kadar isimlendirilen sırasıyla 3-adet döndürülmüş, 13-adet kaydırılmış ve döndürülmüş, 6-adet hibrit ve 8-adet birleşik (kompozisyon) fonksiyon ele alınmıştır. [44]'e göre, bu fonksiyonların boyutu (D) 30 olarak ayarlanmıştır. CEC 2014 kıyaslama problemlerinde yer alan matematiksel fonksiyonların detayları [44]'te ve EK2'de sunulmuştur. Buna göre, CEC 2014 kıyaslama problemleri için, maksimum uygunluk fonksiyonu değerlendirme sayısı ($maxFEs$), 150000 olarak kabul edilmiş ve en uygun çözümde 1×10^{-12} 'lik tolerans eşik değeri olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, FDBSNS ve SNS algoritmaları için popülasyon boyutu ise 50 olarak ayarlanmıştır. MSA algoritmalarının stokastik (rastlantısal) doğası nedeniyle, sadece bir defa çalıştırma ile elde edilen sonuçlar bir algoritmanın performansını değerlendirmek için yetersizdir. Bu nedenle FDBSNS, CEC 2014 için referans [44]'te yer alan SNS algoritması gibi her bir problem için bağımsız olarak 50 defa çalıştırılmıştır. Çizelge 5.1'de CEC 2014 için FDBSNS ve SNS'nin karşılaştırmalı sonuçları sunulmuştur. Öte yandan, CEC 2017'de yer alan 30 matematiksel fonksiyonun detayları [44], [46]'da ve EK 3'de sunulmuştur. Bu matematiksel fonksiyonlar, 3-adet tek-modlu kaydırılmış ve döndürülmüş fonksiyon, 7-adet çok-modlu kaydırılmış ve döndürülmüş fonksiyon, 10-adet hibrit fonksiyon ve 10-adet birleşik (kompozisyon) fonksiyonlardır. Tez çalışmasında bu fonksiyonlar F31'den F59'a kadar adlandırılmış ve ikinci fonksiyon CEC 2017 yarışma komitesi tarafından kaldırılmıştır [46]. Bu nedenle, tez çalışmasında CEC 2017 için toplam 29 adet kıyaslama fonksiyonu kullanılmıştır. [44]'e göre, bu fonksiyonların boyutu (D) 10, 30, 50 ve 100 olarak ayarlanmıştır. CEC 2017 kıyaslama problemlerinde, her bir test problemi için toplam uygunluk fonksiyonu değerlendirme sayısı ($NFEs$) $10000 \times D$ olarak seçilir. En uygun çözümde 1×10^{-8} toleransı eşik değeri olarak kabul edilir. Ayrıca, FDBSNS ve

SNS algoritmaları için popülasyon boyutu 50 olarak ayarlanmıştır. CEC2017 kıyaslama problemleri için 51 bağımsız çalıştırma neticesinde istatistiksel sonuçlar elde edilmiştir. Çizelge 5.2’de CEC 2017 için FDBSNS ve SNS algoritmalarının karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar, D=10, 30, 50, 100 boyut için her iki algoritmanın da kıyaslama problemlerinin çözümünde elde ettiği ortalama (*Ort*) ve standart sapma (*Std*) değerlerini içermektedir. Karşılaştırılan her iki algoritma için elde edilen en iyi sonuçlar, her bir kıyaslama fonksiyonu için kalın harflerle gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. CEC 2014 için FDBSNS ve SNS’nin karşılaştırmalı sonuçları.

	<i>Min</i>		<i>Ort</i>		<i>Max</i>		<i>Std</i>	
	SNS [47]	FDBSNS	SNS [47]	FDBSNS	SNS [47]	FDBSNS	SNS [47]	FDBSNS
F1	$3,87 \times 10^5$	$7,90 \times 10^4$	$1,52 \times 10^6$	$2,87 \times 10^5$	$5,03 \times 10^6$	$4,46 \times 10^5$	$7,78 \times 10^5$	$1,12 \times 10^5$
F2	$1,83 \times 10^2$	$2,64 \times 10^2$	$6,03 \times 10^3$	$3,04 \times 10^3$	$2,50 \times 10^4$	$5,90 \times 10^3$	$5,84 \times 10^3$	$1,66 \times 10^3$
F3	$6,06 \times 10^0$	$6,96 \times 10^0$	$4,26 \times 10^2$	$1,94 \times 10^2$	$3,32 \times 10^3$	$4,76 \times 10^2$	$6,47 \times 10^2$	$1,42 \times 10^2$
F4	$9,60 \times 10^{-5}$	$3,36 \times 10^{-3}$	$8,13 \times 10^1$	$5,82 \times 10^1$	$1,44 \times 10^2$	$7,73 \times 10^1$	$4,56 \times 10^1$	$2,79 \times 10^1$
F5	$2,03 \times 10^1$	$2,00 \times 10^1$	$2,04 \times 10^1$	$2,00 \times 10^1$	$2,05 \times 10^1$	$2,00 \times 10^1$	$4,51 \times 10^{-2}$	$4,79 \times 10^{-3}$
F6	$7,02 \times 10^0$	$3,89 \times 10^0$	$1,29 \times 10^1$	$8,47 \times 10^0$	$1,79 \times 10^1$	$1,03 \times 10^1$	$2,27 \times 10^0$	$1,48 \times 10^0$
F7	$1,14 \times 10^{-8}$	$7,77 \times 10^{-9}$	$2,32 \times 10^{-2}$	$3,17 \times 10^{-3}$	$1,15 \times 10^{-1}$	$9,86 \times 10^{-3}$	$2,63 \times 10^{-2}$	$4,13 \times 10^{-3}$
F8	$7,54 \times 10^0$	$2,34 \times 10^{-4}$	$1,19 \times 10^1$	$9,02 \times 10^{-1}$	$1,55 \times 10^1$	$2,75 \times 10^0$	$1,78 \times 10^0$	$8,93 \times 10^{-1}$
F9	$4,38 \times 10^1$	$3,69 \times 10^1$	$7,29 \times 10^1$	$5,91 \times 10^1$	$1,25 \times 10^2$	$6,87 \times 10^1$	$1,57 \times 10^1$	$6,85 \times 10^0$
F10	$5,89 \times 10^1$	$1,19 \times 10^1$	$1,19 \times 10^2$	$3,03 \times 10^1$	$1,92 \times 10^2$	$4,46 \times 10^1$	$3,00 \times 10^1$	$9,81 \times 10^0$
F11	$2,48 \times 10^3$	$7,06 \times 10^2$	$3,13 \times 10^3$	$1,49 \times 10^3$	$3,66 \times 10^3$	$1,87 \times 10^3$	$2,93 \times 10^2$	$2,85 \times 10^2$
F12	$3,61 \times 10^{-1}$	$3,18 \times 10^{-2}$	$6,53 \times 10^{-1}$	$8,06 \times 10^{-2}$	$8,34 \times 10^{-1}$	$1,14 \times 10^{-1}$	$7,99 \times 10^{-2}$	$2,19 \times 10^{-2}$
F13	$1,88 \times 10^{-1}$	$1,81 \times 10^{-1}$	$3,29 \times 10^{-1}$	$2,73 \times 10^{-1}$	$4,51 \times 10^{-1}$	$3,37 \times 10^{-1}$	$6,13 \times 10^{-2}$	$4,72 \times 10^{-2}$
F14	$1,84 \times 10^{-1}$	$1,69 \times 10^{-1}$	$2,55 \times 10^{-1}$	$2,22 \times 10^{-1}$	$3,76 \times 10^{-1}$	$2,54 \times 10^{-1}$	$3,96 \times 10^{-2}$	$2,69 \times 10^{-2}$
F15	$4,27 \times 10^0$	$2,90 \times 10^0$	$1,02 \times 10^1$	$6,19 \times 10^0$	$2,18 \times 10^1$	$7,85 \times 10^0$	$4,05 \times 10^0$	$1,32 \times 10^0$
F16	$9,67 \times 10^0$	$7,77 \times 10^0$	$1,05 \times 10^1$	$8,95 \times 10^0$	$1,10 \times 10^1$	$9,51 \times 10^0$	$3,33 \times 10^{-1}$	$4,42 \times 10^{-1}$
F17	$1,94 \times 10^4$	$8,89 \times 10^3$	$1,22 \times 10^5$	$3,94 \times 10^4$	$4,37 \times 10^5$	$6,80 \times 10^4$	$8,76 \times 10^4$	$1,73 \times 10^4$
F18	$3,88 \times 10^1$	$2,30 \times 10^1$	$1,26 \times 10^3$	$1,83 \times 10^2$	$1,18 \times 10^4$	$4,12 \times 10^2$	$2,05 \times 10^3$	$1,23 \times 10^2$
F19	$3,32 \times 10^0$	$4,19 \times 10^0$	$1,08 \times 10^1$	$6,04 \times 10^0$	$6,80 \times 10^1$	$7,20 \times 10^0$	$1,61 \times 10^1$	$8,37 \times 10^{-1}$
F20	$1,20 \times 10^2$	$3,88 \times 10^2$	$5,75 \times 10^2$	$1,81 \times 10^3$	$1,83 \times 10^3$	$3,30 \times 10^3$	$4,09 \times 10^2$	$8,12 \times 10^2$
F21	$1,84 \times 10^3$	$3,35 \times 10^3$	$1,19 \times 10^4$	$1,46 \times 10^4$	$5,15 \times 10^4$	$2,36 \times 10^4$	$9,87 \times 10^3$	$5,59 \times 10^3$
F22	$2,39 \times 10^1$	$2,34 \times 10^1$	$2,85 \times 10^2$	$2,05 \times 10^2$	$4,91 \times 10^2$	$2,80 \times 10^2$	$1,09 \times 10^2$	$6,85 \times 10^{-1}$
F23	$3,15 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$3,15 \times 10^2$	$2,95 \times 10^2$	$3,15 \times 10^2$	$3,15 \times 10^2$	$1,13 \times 10^{-7}$	$4,47 \times 10^1$
F24	$2,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$2,26 \times 10^{-4}$	$2,26 \times 10^{-4}$
F25	$2,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$0,00 \times 10^0$	$0,00 \times 10^0$
F26	$1,00 \times 10^2$	$1,00 \times 10^2$	$1,08 \times 10^2$	$1,00 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	$1,01 \times 10^2$	$2,70 \times 10^1$	$1,03 \times 10^{-1}$
F27	$4,01 \times 10^2$	$4,01 \times 10^2$	$5,79 \times 10^2$	$4,06 \times 10^2$	$9,21 \times 10^2$	$5,28 \times 10^2$	$1,39 \times 10^2$	$1,98 \times 10^1$
F28	$7,97 \times 10^2$	$7,19 \times 10^2$	$9,82 \times 10^2$	$8,49 \times 10^2$	$1,63 \times 10^3$	$8,95 \times 10^2$	$1,33 \times 10^2$	$3,41 \times 10^1$
F29	$8,88 \times 10^2$	$8,72 \times 10^2$	$1,89 \times 10^6$	$1,32 \times 10^3$	$8,92 \times 10^6$	$1,76 \times 10^3$	$3,55 \times 10^6$	$1,91 \times 10^2$
F30	$8,02 \times 10^2$	$7,19 \times 10^2$	$3,23 \times 10^3$	$1,54 \times 10^3$	$2,79 \times 10^4$	$2,12 \times 10^3$	$3,67 \times 10^3$	$3,78 \times 10^2$

Çizelge 5.2. CEC 2017 için FDBSNS ve SNS'nin karşılaştırmalı sonuçları.

	Dim= 10				Dim=30				Dim=50				Dim=100			
	SNS [47]	FDBSNS	SNS [47]	FDBSNS	SNS [47]	FDBSNS	SNS [47]	FDBSNS	SNS [47]	FDBSNS	SNS [47]	FDBSNS	SNS [47]	FDBSNS	SNS [47]	FDBSNS
	Ort	Ort	Std	Std	Ort	Ort	Std	Std	Ort	Ort	Std	Std	Ort	Ort	Std	Std
F31	3,69×10 ²	4,73×10 ²	4,93×10 ²	3,55×10 ²	2,68×10 ³	7,17×10 ²	3,39×10 ³	5,73×10 ²	7,12×10 ²	2,03×10 ²	7,19×10 ²	1,80×10 ²	3,99×10 ³	1,60×10 ³	2,59×10 ³	1,21×10 ³
F32	0,00×10 ⁰	0,00×10 ⁰	0,00×10 ⁰	0,00×10 ⁰	2,16×10 ¹	9,37×10 ¹	3,56×10 ¹	5,69×10 ¹	2,22×10 ⁴	1,18×10 ⁴	4,73×10 ³	2,44×10 ³	1,62×10 ⁵	9,54×10 ⁴	1,46×10 ⁴	7,25×10 ³
F33	2,54×10 ⁰	1,03×10 ⁰	1,16×10 ⁰	5,49×10 ⁻¹	7,10×10 ¹	4,01×10 ¹	3,21×10 ¹	3,15×10 ¹	9,12×10 ¹	5,82×10 ¹	3,96×10 ¹	2,36×10 ¹	2,52×10 ²	1,90×10 ²	5,20×10 ¹	4,26×10 ¹
F34	7,25×10 ⁰	8,14×10 ⁰	2,49×10 ⁰	1,94×10 ⁰	6,32×10 ¹	5,28×10 ¹	1,54×10 ¹	6,15×10 ⁰	1,63×10 ²	1,40×10 ²	2,44×10 ¹	1,60×10 ¹	5,07×10 ²	4,43×10 ²	5,93×10 ¹	3,41×10 ¹
F35	0,00×10 ⁰	4,09×10 ⁻⁴	0,00×10 ⁰	3,43×10 ⁻⁴	0,00×10 ⁰	1,49×10 ⁻³	0,00×10 ⁰	5,69×10 ⁻⁴	0,00×10 ⁰	2,99×10 ⁻³	0,00×10 ⁰	9,57×10 ⁻⁴	0,00×10 ⁰	6,61×10 ⁻³	0,00×10 ⁰	1,44×10 ⁻³
F36	1,70×10 ¹	1,88×10 ¹	2,30×10 ⁰	2,35×10 ⁰	9,49×10 ¹	8,07×10 ¹	1,37×10 ¹	8,35×10 ⁰	2,15×10 ²	1,65×10 ²	4,47×10 ¹	1,27×10 ¹	5,97×10 ²	4,68×10 ²	1,25×10 ²	3,61×10 ¹
F37	6,79×10 ⁰	8,09×10 ⁰	2,39×10 ⁰	2,15×10 ⁰	6,15×10 ¹	5,41×10 ¹	1,30×10 ¹	6,96×10 ⁰	1,69×10 ²	1,46×10 ²	2,77×10 ¹	1,33×10 ¹	4,57×10 ²	4,23×10 ²	6,87×10 ¹	4,30×10 ¹
F38	1,00×10 ⁻²	2,81×10 ⁻²	2,00×10 ⁻²	4,20×10 ⁻²	6,06×10 ¹	7,91×10 ⁰	7,11×10 ¹	4,08×10 ⁰	1,27×10 ²	5,05×10 ²	9,81×10 ¹	3,23×10 ²	7,46×10 ³	1,12×10 ⁴	6,66×10 ³	1,57×10 ³
F39	1,87×10 ²	2,31×10 ²	1,10×10 ²	9,42×10 ¹	2,80×10 ³	1,95×10 ³	2,97×10 ²	2,48×10 ²	5,92×10 ³	3,48×10 ³	3,05×10 ²	3,39×10 ²	1,53×10 ⁴	9,98×10 ³	5,31×10 ²	6,54×10 ²
F40	4,69×10 ⁰	2,44×10 ⁰	3,28×10 ⁰	1,14×10 ⁰	5,92×10 ¹	3,28×10 ¹	2,39×10 ¹	8,59×10 ⁰	9,15×10 ¹	7,42×10 ¹	3,06×10 ¹	1,46×10 ¹	2,66×10 ²	2,56×10 ²	4,77×10 ¹	4,10×10 ¹
F41	8,12×10 ³	4,18×10 ³	5,63×10 ³	2,67×10 ³	2,75×10 ⁴	2,00×10 ⁴	1,08×10 ⁴	5,83×10 ³	3,42×10 ⁵	1,69×10 ⁵	1,66×10 ⁵	5,30×10 ⁴	1,31×10 ⁶	8,74×10 ⁵	4,97×10 ⁵	2,02×10 ⁵
F42	6,08×10 ²	4,36×10 ¹	8,64×10 ²	3,69×10 ¹	9,98×10 ³	4,27×10 ³	8,21×10 ³	2,81×10 ³	2,29×10 ³	5,64×10 ²	3,60×10 ³	3,70×10 ²	4,26×10 ³	1,18×10 ³	3,18×10 ³	7,51×10 ²
F43	3,63×10 ⁰	2,41×10 ⁰	2,10×10 ⁰	9,36×10 ⁻¹	1,32×10 ³	5,89×10 ²	1,35×10 ³	4,99×10 ²	5,36×10 ³	1,02×10 ⁴	3,99E×10 ³	4,47×10 ³	8,90×10 ⁴	1,16×10 ⁵	2,96×10 ⁴	1,98×10 ⁴
F44	3,01×10 ⁰	1,24×10 ⁰	1,51×10 ⁰	5,55×10 ⁻¹	9,47×10 ²	1,75×10 ²	9,30×10 ²	1,28×10 ²	1,07×10 ⁴	6,10×10 ³	5,30×10 ³	4,23×10 ³	1,22×10 ³	5,58×10 ²	1,14×10 ³	2,96×10 ²
F45	2,49×10 ¹	6,82×10 ⁰	3,80×10 ¹	1,22×10 ¹	3,88×10 ²	4,74×10 ²	1,79×10 ²	1,05×10 ²	9,89×10 ²	8,27×10 ²	3,27×10 ²	2,06×10 ²	3,18×10 ³	2,87×10 ³	6,13×10 ²	3,48×10 ²
F46	9,33×10 ⁰	5,46×10 ⁰	8,38×10 ⁰	5,01×10 ⁰	6,78×10 ¹	6,05×10 ¹	5,16×10 ¹	4,67×10 ¹	7,23×10 ²	6,45×10 ²	2,16×10 ²	1,13×10 ²	2,30×10 ³	2,11×10 ³	4,39×10 ²	2,97×10 ²
F47	1,83×10 ³	4,65×10 ²	2,38×10 ³	3,56×10 ²	6,00×10 ⁴	3,73×10 ⁴	4,06×10 ⁴	1,16×10 ⁴	5,72×10 ⁴	6,29×10 ⁴	3,07×10 ⁴	2,05×10 ⁴	3,93×10 ⁵	2,26×10 ⁵	1,18×10 ⁵	4,14×10 ⁴
F48	1,58×10 ⁰	7,62×10 ⁻¹	1,02×10 ⁰	4,62×10 ⁻¹	3,47×10 ³	1,63×10 ³	2,14×10 ³	1,02×10 ³	1,23×10 ⁴	1,05×10 ⁴	5,02×10 ³	3,78×10 ³	1,51×10 ³	5,06×10 ²	1,70×10 ³	3,14×10 ²
F49	1,20×10 ⁰	9,63×10 ⁻¹	1,33×10 ⁰	7,45×10 ⁻¹	1,10×10 ²	1,23×10 ²	5,06×10 ¹	4,34×10 ¹	3,69×10 ²	3,97E+02	1,74×10 ²	1,06×10 ²	1,64×10 ³	1,89×10 ³	4,43×10 ²	3,10×10 ²
F50	1,29×10 ²	1,17×10 ²	4,70×10 ¹	3,91×10 ¹	2,48×10 ²	2,47×10 ²	1,46×10 ¹	6,63×10 ⁰	3,30×10 ²	3,29×10 ²	2,26×10 ¹	1,59×10 ¹	5,96×10 ²	5,94×10 ²	5,82×10 ¹	3,70×10 ¹
F51	9,48×10 ¹	9,52×10 ¹	2,08×10 ¹	2,07×10 ¹	1,01×10 ²	1,00×10 ²	1,48×10 ⁰	1,41×10 ⁻¹⁰	6,35×10 ²	6,41×10 ²	1,84×10 ³	1,37×10 ³	1,04×10 ⁴	1,11×10 ⁴	8,31×10 ³	3,31×10 ³
F52	3,05×10 ²	3,11×10 ²	2,68×10 ⁰	3,27×10 ⁰	4,13×10 ²	3,95×10 ²	1,57×10 ¹	7,89×10 ⁰	5,55×10 ²	5,46×10 ²	2,75×10 ¹	1,49×10 ¹	7,81×10 ²	7,48×10 ²	4,80×10 ¹	2,48×10 ¹
F53	2,70×10 ²	2,48×10 ²	1,01×10 ²	1,16×10 ²	5,04×10 ²	4,82×10 ²	2,14×10 ¹	1,16×10 ¹	6,50×10 ²	6,66×10 ²	4,01×10 ¹	2,35×10 ¹	1,32×10 ³	1,26×10 ³	8,17×10 ¹	3,84×10 ¹
F54	4,23×10 ²	3,88×10 ²	2,22×10 ¹	5,90×10 ¹	3,95×10 ²	3,87×10 ²	1,34×10 ¹	2,15×10 ⁰	5,75×10 ²	5,53×10 ²	3,11×10 ¹	2,59×10 ¹	8,32×10 ²	7,69×10 ²	4,47×10 ¹	3,75×10 ¹
F55	2,90×10 ²	2,64×10 ²	6,50×10 ¹	5,88×10 ¹	1,31×10 ³	2,41×10 ²	1,13×10 ³	4,97×10 ¹	3,94×10 ²	3,00×10 ²	4,69×10 ²	9,02×10 ⁻⁶	1,47×10 ⁴	7,98×10 ³	4,72×10 ³	6,02×10 ³
F56	3,92×10 ²	3,93×10 ²	2,43×10 ⁰	1,79×10 ⁰	5,25×10 ²	5,07×10 ²	1,14×10 ¹	9,62×10 ⁰	6,84×10 ²	6,33×10 ²	8,13×10 ¹	3,39×10 ¹	9,02×10 ²	8,78×10 ²	6,70×10 ¹	4,50×10 ¹
F57	3,47×10 ²	3,00×10 ²	1,08×10 ²	4,57×10 ⁻⁹	3,63×10 ²	3,02×10 ²	4,68×10 ¹	4,03×10 ⁰	5,15×10 ²	4,87×10 ²	2,06×10 ¹	1,72×10 ¹	5,78×10 ²	5,48×10 ²	3,00×10 ¹	1,53×10 ¹
F58	2,50×10 ²	2,51×10 ²	9,02×10 ⁰	7,67×10 ⁰	4,96×10 ²	4,41×10 ²	7,76×10 ¹	2,88×10 ¹	5,38×10 ²	6,52×10 ²	9,98×10 ¹	1,27×10 ²	2,65×10 ³	2,73×10 ³	5,84×10 ²	2,84×10 ²
F59	4,94×10 ³	1,88×10 ³	1,03×10 ⁴	8,04×10 ²	3,62×10 ³	3,03×10 ²	1,04×10 ³	3,88×10 ²	8,14×10 ⁵	7,56×10 ⁵	6,14×10 ⁴	4,70×10 ⁴	8,47×10 ³	4,15×10 ³	3,67×10 ³	1,12×10 ³

Çizelge 5.3. FDBSNS ve SNS algoritmalarının CEC 2014 ve CEC 2017 için Wilcoxon İstatistiksel Analizi ile karşılaştırılması.

FDBSNS vs. SNS + / = / -	CEC 2014 (D=30)								
	Problem Tipi	Min.		Ort.		Maks.		Std.	
	Tek-modlu (F1-F3)	1/0/2		3/0/0		3/0/0		3/0/0	
	Çok-modlu (F4-F16)	12/0/1		13/0/0		13/0/0		12/0/1	
	Hibrit (F17-F22)	3/0/3		4/0/2		5/0/1		5/0/1	
	Kompozisyon (Birleşik) (F23-F30)	4/4/0		6/2/0		5/3/0		5/2/1	
	Genel Karşılaştırma	20/4/6		26/2/2		26/3/1		25/2/3	
CEC 2017									
FDBSNS vs. SNS + / = / -	Problem Tipi	D=10		D=30		D=50		D=100	
		Ort.	Std.	Ort.	Std.	Ort.	Std.	Ort.	Std.
	Tek-modlu (F31-F32)	0/1/1	1/1/0	1/0/1	1/0/1	2/0/0	2/0/0	2/0/0	2/0/0
	Çok-modlu (F33-F39)	1/0/6	4/0/3	6/0/1	6/0/1	5/0/2	4/0/3	5/0/2	5/0/2
	Hibrit (F40-F49)	10/0/0	10/0/0	9/0/1	10/0/0	7/0/3	9/0/1	8/0/2	10/0/0
	Kompozisyon (Birleşik) (F50-F59)	6/0/4	7/0/3	10/0/0	10/0/0	7/0/3	9/0/1	9/0/1	9/0/1
	Genel Karşılaştırma	17/ 1/ 11	22/ 1/ 6	26/ 0/ 3	27 / 0/ 2	21 /0 /8	24 /0 /5	24 /0 /5	26 /0 /3

Elde edilen sonuçların etkisini daha detaylı incelemek amacıyla temel SNS ile FDBSNS algoritmaları arasında ikili karşılaştırmaya olanak sağlayan Wilcoxon İstatistiksel Analiz Testi yapılmıştır. Çizelge 5.3'te FDBSNS ve SNS algoritmalarının CEC 2014 ve CEC 2017 için Wilcoxon İstatistiksel Analizi ile karşılaştırılması sunulmuştur. + / = / - işaretleri, karşılaştırılan algoritmaların sırasıyla daha iyi, benzer veya daha kötü performans gösterdiği test problemlerinin sayısını ifade eder. İkili karşılaştırmada, FDBSNS algoritmasının SNS algoritmasından daha iyi performans gösterdiği fonksiyonlar Çizelge 5.3'te koyu renkle işaretlenmiştir. CEC 2014'te elde edilen sonuçlara göre, FDBSNS algoritmasının performansı minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri bakımından temel SNS algoritmasından üstündür. CEC 2014'te 30 boyutlu arama uzayı için ikili karşılaştırma sonuçları minimum değerler açısından incelendiğinde, toplamda 20/4/6 skoru ile FDBSNS algoritmasının 30 fonksiyonun 20 tanesinde SNS algoritmasından daha etkili çözümler sunduğu görülmektedir. Sadece 6 tane fonksiyon

için SNS algoritması FDBSNS algoritmasından daha etkili çözümler sunarken, 4 fonksiyon için ise her iki algoritma minimum değerler açısından birbirlerine karşı üstünlük sağlayamamıştır. Bununla birlikte, CEC 2014'te 30 boyut için problem tipine göre daha detaylı bir inceleme yapılacak olursa, FDBSNS algoritmasının özellikle çok-modlu problem tipinde ve birleşik (kompozisyon) problem tipinde sırasıyla **12/0/1** ve **4/4/0** skorlarıyla SNS algoritmasına kıyasla daha etkili çözümler sunduğu görülürken, hibrit problem tipi için **3/0/3** skoru ile her iki algoritmanın da eşit performans sunduğu ve SNS algoritmasının tek-modlu problemin çözümünde **1/0/2** skoru ile biraz daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Öte yandan ortalama değerler ve maksimum değerler açısından karşılaştırma yapıldığında ise sırasıyla **26/2/2** ve **26/3/1** skorları ile FDBSNS algoritması, SNS algoritmasına karşı 26 fonksiyonda üstünlük sağlamıştır. Ortalama değerler ve maksimum değerler için problem tipine göre karşılaştırma yapıldığında, FDBSNS algoritmasının dört farklı problem tipinin tamamında SNS algoritmasına kıyasla üstün olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Standart sapma açısından elde edilen **25/2/3** skoru ise CEC 2014'te yer alan 30 kıyaslama probleminin 30 boyut için çözümünde FDBSNS algoritmasının SNS algoritmasına kıyasla daha istikrarlı ve etkili çözümler sunduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, dört problem tipinin tamamında standart sapma değerleri açısından da FDBSNS algoritmasının açık bir şekilde üstünlük sağladığı görülmektedir. Özetlemek gerekirse, CEC 2014 için 30 boyutta elde edilen tüm sonuçlar incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri açısından SNS algoritmasına karşı üstünlük sağladığı görülmektedir. Buna ek olarak, minimum değerler açısından tek-modlu problem tipi için SNS üstün olmasına ve hibrit fonksiyonlar için eşitlik durumu söz konusu olmasına rağmen; maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri açısından FDBSNS algoritması bu problem tiplerinde de üstünlük sağlamıştır.

CEC 2017'de ise 10, 30, 50 ve 100 boyutlu arama uzayları için elde edilen sonuçlar, ortalama değerler ve standart sapma değerleri açısından karşılaştırıldığında, FDBSNS algoritmasının temel SNS algoritmasından daha etkili bir performans sunduğu görülmektedir. CEC 2017 kıyaslama problemlerinde, 10 boyutlu yani bir başka ifadeyle düşük boyutlu bir arama uzayı için ikili karşılaştırma sonuçları ortalama değer açısından incelendiğinde, toplamda **17/1/11** skoru ile FDBSNS algoritmasının 17 fonksiyonun çözümünde SNS algoritmasına karşı üstünlük sağladığı görülürken, 11 fonksiyon için ise SNS algoritmasının daha üstün olduğu görülmektedir. 1 fonksiyonun çözümünde ise her

iki algoritma da birbirlerine karşı üstünlük sağlayamamıştır. 10 boyut için problem tipine göre daha detaylı bir inceleme yapılacak olursa, FDBSNS algoritmasının özellikle hibrit ve birleşik problem tiplerinde sırasıyla **10/0/0** ve **6/0/4** skorlarıyla üstün olduğu görülürken, tek-modlu ve çok-modlu problem tiplerinde ise **0/1/1** ve **1/0/6** skorlarıyla SNS algoritmasının daha iyi performans sunduğu görülmektedir. Bununla birlikte, 10 boyut için elde edilen sonuçlar, standart sapma değeri açısından karşılaştırıldığında ise elde edilen **22/1/6** skoru FDBSNS algoritmasının SNS algoritmasına kıyasla belirgin bir şekilde üstün olduğunu ve daha istikrarlı bir MSA algoritması olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, standart sapma değerleri açısından FDBSNS algoritmasının dört farklı problem tipinin tamamında üstünlük sağladığı açık bir şekilde görülmektedir. CEC 2017 kıyaslama problemlerinde 30 boyut için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sırasıyla ortalama değer ve standart sapma değerleri açısından toplamda **25/0/4** ve **27/0/2** skorları ile FDBSNS algoritmasının SNS algoritmasına kıyasla bariz bir üstünlük durumu söz konusudur. Problem tiplerine göre karşılaştırma yapıldığında, özellikle boyut artışı ile birlikte ortalama değer ve standart sapma değeri açısından, FDBSNS algoritmasının birleşik fonksiyonlardaki üstünlüğü **10/0/0** skoru ile açık bir şekilde artış gösterirken, 10 boyutta düşük performans sunduğu çok-modlu problem tipinin aksine, 30 boyutta ortalama ve standart sapma değerleri açısından **6/0/1** skoru ile önemli bir üstünlük ve gelişme sağlanmıştır. FDBSNS algoritması, yine 30 boyut için hibrit problem tipi açısından üstünlüğünü sürdürürken, tek modlu problem tipi için ise her iki algoritma eşit performans göstermiştir. 50 boyut için her iki algoritma ile elde edilen skorlar sırasıyla ortalama değer ve standart sapma değerleri bakımından karşılaştırıldığında ise **21/0/8** ve **24/0/5** skorları ile FDBSNS algoritmasının SNS algoritmasına kıyasla üstünlüğü bir kez daha doğrulanmıştır. Buna ek olarak, FDBSNS algoritması diğer iki problem boyutundan farklı olarak, 50 boyutta dört farklı problem tipinin tamamı için SNS algoritmasına kıyasla daha etkili çözüm sunmuştur. Son olarak, FDBSNS algoritmasının yüksek boyutlu ve karmaşık bir arama uzayındaki performansını inceleyebilmek amacıyla, 100 boyut için kıyaslama problemlerinde elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Sonuçlar, ortalama değerler ve standart sapma değerleri açısından incelendiğinde, sırasıyla **23/0/6** ve **26/0/3** skorları ile FDBSNS algoritmasının ortalama değerler açısından 23 fonksiyonun çözümünde ve standart sapma değerleri açısından ise 26 fonksiyonun çözümünde SNS algoritmasından daha üstün olduğu göstermektedir. Bu durum, FDBSNS algoritmasının yüksek boyutlu problemlerde güçlü keşif yeteneğine sahip olduğunu ve global optimuma ulaşmada son derece etkili bir algoritma olduğunu ifade

etmektedir. Ayrıca, dört farklı problem tipinin tamamında FDBSNS algoritması SNS algoritmasına kıyasla açık bir şekilde üstünlük sağlamıştır. Wilcoxon ikili karşılaştırma sonuçları, düşük boyutlu ($D=10$) arama uzayına kıyasla orta boyutlu ($D=30$, $D=50$) ve yüksek boyutlu ($D=100$) arama uzaylarında FDBSNS algoritmasının arama performansının arttığını ve FDBSNS algoritmasının SNS algoritmasına kıyasla 10, 30, 50 ve 100 boyutlu arama uzaylarının tamamında ve farklı problem tiplerinde çok daha etkili olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, CEC 2014 ve CEC 2017 kıyaslama problemleri için tüm bu üstün sonuçlara rağmen, önerilen algoritmanın etkisini daha etkili bir biçimde gösterebilmek amacıyla tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde FDBSNS algoritması, gerçek dünya mühendislik problemlerinden olan en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi ve TCSC tabanlı denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesi problemlerinin çözümünde uygulanmış ve her iki problemin çözümünde çeşitli MSA algoritmaları ile karşılaştırılmıştır.

5.2. ÖNERİLEN ALGORİTMANIN EN UYGUN PSS PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ PROBLEMİ İÇİN TEST EDİLMESİ

Bu alt bölümde, FDBSNS algoritmasının en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi problemini çözme performansı, kapsamlı bir deneysel çalışma ile test edilmiştir. Bu alt bölüm iki deneysel çalışmadan oluşmaktadır: İlk deneysel çalışmada, geçici durum kararlılık analizi için en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi problemi, FDBSNS algoritması kullanılarak WSCC 3-Makineli 9-Baralı bir güç sisteminde belirlenen amaç fonksiyonu için 4 farklı arıza senaryosu dikkate alınarak çözülmüştür. İkinci deneysel çalışmada, FDBSNS algoritmasının daha kapsamlı bir sistemde performansını incelemek için önerilen algoritmanın etkisi New England 10-Makineli 39-Baralı güç sistemi üzerinde test edilmiştir.

Bu alt bölümde, deneysel çalışmalar için belirlenen deneysel kriterler şu şekilde verilmektedir:

- Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm algoritmalar için popülasyon büyüklüğü 30, iterasyon sayısı ise 100 olarak kabul edilmiştir. Ek olarak, kullanılan algoritmalarının tamamı ile her bir deneysel çalışma için 30 defa bağımsız çalıştırma gerçekleştirilmiştir.

- Karşılaştırılan algoritmaların tüm spesifik ve ayarlanabilir parametreleri, bu algoritmaların orijinal makalelerinde verildiği gibi kullanılmıştır [47]–[54]. Önerilen FDBSNS yönteminin ayarlanabilir parametreleri ise referans olarak alınan orijinal SNS çalışmasındaki değerlerle aynıdır [44].
- [47]’de yer alan Matlab/Simulink modeli, tez çalışmasının bu bölümünde referans olarak alınmıştır. Sistem bileşenlerinin güç akışından hesaplanan başlangıç değerleri ve doğrusallaştırılmış sistemin matematiksel modeli referans çalışmada mevcuttur. Ayrıca çalışmada kullanılan güç sistemlerinin generatör, iletim hatları ve uyarım verilerine yine aynı çalışmadan detaylı olarak ulaşılabilmektedir [47]. Buna ek olarak, Çizelge 5.4’te WSCC 3-Makineli 9-Baralı Test Sistemi ve New England 10-Makineli 39-Baralı Test Sistemi için kullanılan Heffron - Philips parametreleri yer almaktadır [47],[89].
- Deneysel sonuçların istatistiksel doğruluğunu göstermek ve FDBSNS algoritmasının başarılı performansını kanıtlamak için Friedman [57] [127] istatistiksel analiz yöntemi ve kutu grafikleri (box-plot) ile analizler gerçekleştirilmiştir.
- Belirlenen amaç fonksiyonuna göre en uygun değerleri belirlenen PSS parametreleri kullanılarak zaman alanı simülasyonları gerçekleştirilmiş, buna bağlı olarak sistem yanıtları elde edilmiş ve performans indeksi kriterlerine göre değerlendirmeler yapılmıştır.

Çizelge 5.4. Test sistemleri için Heffron - Philips parametreleri [47],[89].

<i>WSCC 3-Makineli 9-Baralı Test Sistemi için Heffron -Philips parametreleri</i>											
<i>Generatör</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>R_s</i>	<i>x_d</i>	<i>x'_d</i>	<i>x_q</i>	<i>x'_q</i>	<i>T'_{do}</i>	<i>T'_{qo}</i>	<i>Ka</i>	<i>Ta</i>
<i>G₁</i>	23,64	0,00	0,00	0,1460	0,0608	0,0969	0,0969	8,96	0,31	100	0,5
<i>G₂</i>	6,40	0,00	0,00	0,8958	0,1198	0,8645	0,1969	6,00	0,535	100	0,5
<i>G₃</i>	3,01	0,00	0,00	1,3125	0,1813	1,2578	0,2500	5,89	0,60	100	0,5
<i>New England 10-Makineli 39-Baralı Test Sistemi için Heffron -Philips parametreleri</i>											
<i>Generatör</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>R_s</i>	<i>x_d</i>	<i>x'_d</i>	<i>x_q</i>	<i>x'_q</i>	<i>T'_{do}</i>	<i>T'_{qo}</i>	<i>Ka</i>	<i>Ta</i>
<i>G₁</i>	500	0,00	0,00	0,0200	0,0060	0,0190	0,0080	7,00	0,70	2	0,02
<i>G₂</i>	30,3	0,00	0,00	0,2950	0,0697	0,2820	0,1700	6,56	1,50	2	0,02
<i>G₃</i>	35,8	0,00	0,00	0,2495	0,0531	0,2370	0,0876	5,70	1,50	2	0,02
<i>G₄</i>	28,6	0,00	0,00	0,2620	0,0436	0,2580	0,1660	5,69	1,50	2	0,02
<i>G₅</i>	26,0	0,00	0,00	0,6700	0,1320	0,6200	0,1660	5,40	0,44	2	0,02
<i>G₆</i>	34,8	0,00	0,00	0,2540	0,0500	0,2410	0,0814	7,30	0,40	2	0,02
<i>G₇</i>	26,4	0,00	0,00	0,2950	0,0490	0,2920	0,1860	5,66	1,50	2	0,02
<i>G₈</i>	24,3	0,00	0,00	0,2900	0,0570	0,2800	0,0911	6,70	0,41	2	0,02
<i>G₉</i>	34,5	0,00	0,00	0,2106	0,0570	0,2050	0,0587	4,79	1,96	2	0,02
<i>G₁₀</i>	42,0	0,00	0,00	0,1000	0,0310	0,0690	0,0080	10,20	1,50	2	0,02

Senaryo 1: Bu senaryo için arızanın temizleme süresinin $t_f = 0,15$ saniyelik (9 devir) olduğu kabul edilmiştir. Yani arızanın 1,15'inci saniyede sona erdiği varsayılmıştır.

Senaryo 2: Bu senaryo için arızanın temizleme süresi $t_f = 0,25$ saniyelik (15 devir) olduğu kabul edilmiştir. Yani arızanın 1,25'inci saniyede sona erdiği varsayılmıştır.

5.2.1.2. *Arızalı hattın düzeltilme durumu (hat açma olmadan):*

Bu arızada $t = 1$. saniye için 7 numaralı barada ve 7-5 numaralı baralar arasındaki hat sonunda üç fazlı bir arıza olduğu varsayılmıştır. Arızalı 7-5 numaralı baralar arasındaki hat yeniden devreye alınarak arıza giderilmiştir.

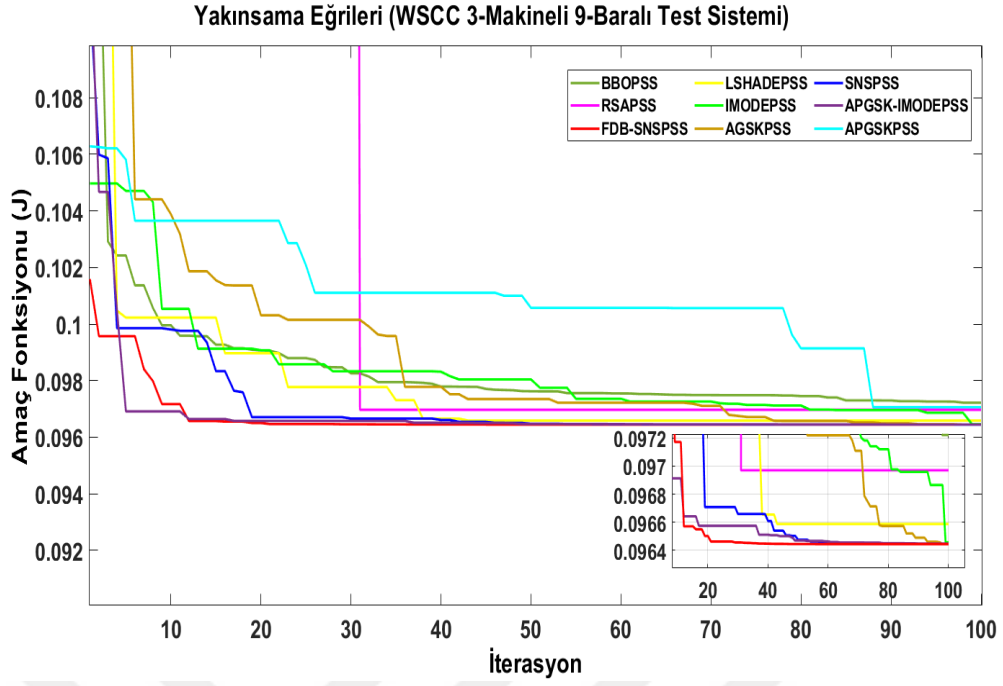
Senaryo 3: Bu senaryoda arızanın temizleme süresi $t_f = 0,10$ saniyelik (6 devir) olduğu kabul edilmiştir. Yani arızanın 1.10'uncu saniyede sona erdiği varsayılmıştır.

Senaryo 4: Bu senaryoda arızanın temizleme süresi $t_f = 0,20$ saniyelik (12 devir) olduğu kabul edilmiştir. Yani arızanın 1.20'nci saniyede sona erdiği varsayılmıştır.

Buna göre, senaryoların tamamı için Denklem (3.9)'da yer alan J amaç fonksiyonunun değeri hesaplanarak PSS parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Test sistemi 1 için gerçekleştirilen deneysel çalışmada, test edilen 11 farklı algoritma (PSO, ABC, LSHADE, IMODE, AGSK, APGSK, APGSK-IMODE, BBO, RSA, SNS ve FDBSNS) kullanılarak elde edilen en uygun PSS parametrelerinin değerleri Çizelge 5.5'te verilmiştir. Test sistemi 1 için, her bir algoritma için J amaç fonksiyonunun yakınsama karakteristiği ise Şekil 5.2'de sunulmuştur. Yakınsama karakteristiklerinden açıkça görülebileceği gibi, FDBSNS algoritması karşılaştırılan 10 farklı algoritmaya kıyasla daha iyi bir yakınsama oranına sahiptir ve belirlenen amaç fonksiyonu için minimum uygunluk değerine daha erken iterasyon sayısı ile ulaşmaktadır.

Çizelge 5.5. Test sistemi 1 için elde edilen en uygun PSS parametreleri.

Gen.	PSS Par.	PSO [47]	ABC [47]	AGSK	APGSK	APGSK - IMODE	BBO	IMODE	LSHADE	RSA	SNS	FDBSNS
G_2	K_p	11,5714	7,7360	26,9268	21,2648	26,7395	21,3995	27,0168	24,8017	39,1820	26,8872	26,7766
	T_1	0,8778	0,2948	0,1094	0,1546	0,1209	0,1407	0,1245	0,1098	0,1147	0,1099	0,1111
	T_2	0,4070	0,1852	0,0111	0,0258	0,0128	0,0378	0,0137	0,0134	0,0100	0,0111	0,0129
	T_3	0,8695	0,5240	0,1120	0,1100	0,1029	0,1548	0,1055	0,1274	0,1188	0,1124	0,1112
	T_4	0,0100	0,0100	0,0116	0,0102	0,0102	0,0100	0,0100	0,0104	0,0100	0,0117	0,0100



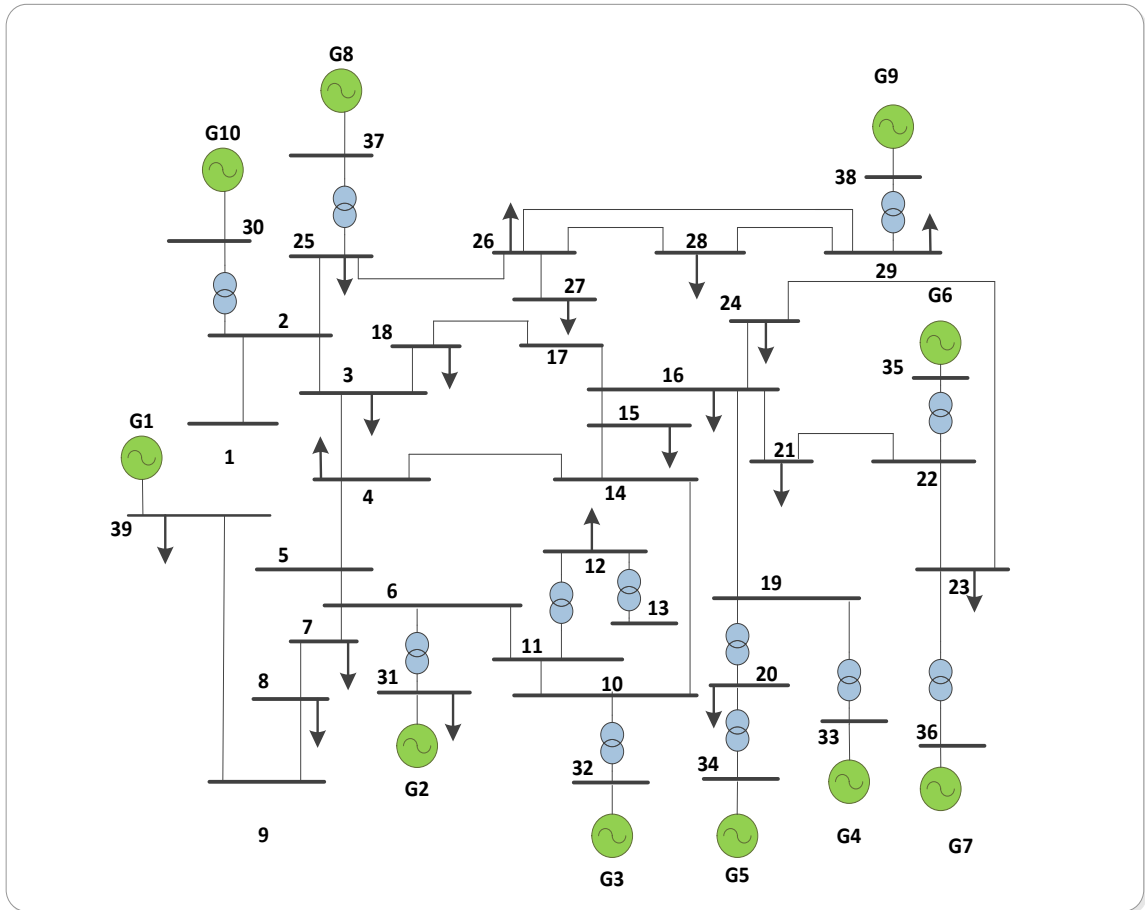
Şekil 5.2. Test Sistemi 1 için amaç fonksiyonunun (J) yakınsama eğrisi.

Test sistemi 1 için önerilen amaç fonksiyonunun minimize edilmesi için kullanılan algoritmaların 30 defa bağımsız çalıştırılması ile elde edilen minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir. Test sistemi 1 için FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK, AGSK, ABC [47] ve PSO [47] algoritmaları kullanılarak elde edilen minimum uygunluk değerleri sırasıyla **0,0964**; 0,0965; 0,0970; 0,0967; 0,0967; 0,0972; 0,0965; 0,0971; 0,0966; 0,1006 ve 0,1080 olarak elde edilmiştir. Böylece, minimum değerler açısından en iyi uygunluk değerinin **0,0964** değeri ile FDBSNS kullanılarak elde edildiği görülmüştür. Öte yandan, SNS ve APGSK-IMODE algoritmaları da FDBSNS’den sonra minimum değerler açısından diğer algoritmalarla kıyasla daha etkili sonuçlar veren algoritmalar. ABC [47] ve PSO [47] için referans olarak alınan çalışmada verilen değişken değerlerine göre yalnızca minimum uygunluk değerleri hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla bu iki algoritma ile elde edilen değişken değerlerine göre hesaplanan uygunluk değerinin maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri bu tez çalışmasında yer almamaktadır. Maksimum uygunluk değerleri açısından karşılaştırma yapıldığında FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK, AGSK algoritmaları kullanılarak sırasıyla **0,0964**; 0,0984; 0,1061; 0,0998; 0,0975; 0,1063; 0,0987; 0,1032 ve 0,1017 değerleri elde edilmiştir. Test sistemi 1 için elde edilen maksimum uygunluk değerleri amaç fonksiyonunun minimizasyon işlemi

açısından karşılaştırıldığında en iyi uygunluk değerinin **0,0964** değeri ile yine FDBSNS kullanılarak elde edildiği görülmüştür. Sonrasında ise 0,0975 ve 0,0984 değerleriyle IMODE ve SNS algoritmaları ikinci ve üçüncü sıralarda yer almaktadır. FDBSNS algoritması kullanılarak minimum ve maksimum değerler açısından etkili sonuçlar elde edilmesine rağmen, algoritmaların 30 defa bağımsız çalıştırılması sonucunda elde edilen ortalama değerlerin karşılaştırılması, FDBSNS algoritmasının performansı açısından daha önemli bir fikir sağlamaktadır. Test sistemi 1 için FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK ve AGSK algoritmaları kullanılarak elde edilen ortalama uygunluk değerleri sırasıyla **0,0964**; 0,0970; 0,1006; 0,0976; 0,0968; 0,1006; 0,0969; 0,1002 ve 0,0970 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, FDBSNS algoritmasının ortalama değerler açısından rakip algoritmalara kıyasla en etkili çözüm veren algoritma olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Medyan değerleri açısından elde edilen sonuçlar FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK ve AGSK algoritmaları kullanılarak sırasıyla **0,0964**; 0,0967; 0,0999; 0,0975; 0,0966; 0,1002; 0,0967; 0,1002 ve 0,0966 olarak sunulmuştur. Elde edilen bu sonuçlar, medyan değerleri açısından da FDBSNS algoritmasının karşılaştırılan algoritmalar arasında en iyi sonucu verdiğini göstermektedir. Test sistemi 1 için 30 defa bağımsız çalışma sonucunda elde edilen uygunluk değerleri standart sapma değerleri açısından karşılaştırıldığında ise FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK ve AGSK algoritmaları kullanılarak sırasıyla **$1,56 \times 10^{-7}$** ; $6,00 \times 10^{-4}$; $2,20 \times 10^{-3}$; $8,00 \times 10^{-4}$; $3,00 \times 10^{-4}$; $2,70 \times 10^{-3}$; $6,00 \times 10^{-4}$; $1,50 \times 10^{-3}$ ve $1,20 \times 10^{-3}$ değerleri elde edilmiştir. Standart sapma açısından elde edilen sonuçlar 30 bağımsız çalıştırma için en iyi çözümlerin en istikrarlı ve en başarılı şekilde FDBSNS algoritması tarafından elde edildiğini göstermektedir. Test sistemi 1 için elde edilen sonuçlar genel olarak incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri açısından karşılaştırılan diğer tüm algoritmalarından daha iyi sonuçlar sunduğu görülmüştür. Bununla birlikte, önerilen FDBSNS algoritmasının daha kapsamlı bir güç sistemindeki performansını incelemek için bir sonraki test çalışmasında New England 10-Makinelili 39-Baralı test sistemi kullanılmıştır.

5.2.2. Test Sistemi 2: New England 10-Makineli 39-Baralı Test Sistemi

Çalışmanın bu alt bölümünde, FDBSNS algoritması geçici durum kararlılık analizinde en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, New England 10-Makineli 39-Baralı güç sistemi üzerinde test edilmiştir. Belirlenen amaç fonksiyonuna göre elde edilen sonuçlar, rakip MSA algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.3'te New England 10-Makineli 39-Baralı Test Sistemi verilmiştir. [47]'de yer alan referans çalışmada gerçekleştirilen katılım faktörü analizine göre test sistemi için, güç sisteminde yer alan tüm generatörlere PSS dahil edilmiştir. Test sistemi 2 için en uygun değerleri belirlenen PSS parametreleri K_{pss} , T_{pss1} , T_{pss2} , T_{pss3} ve T_{pss4} olup, her bir generatöre bağlı olan PSS'ler için toplamda en uygun değerleri belirlenen 50 parametre mevcuttur. Bu kapsamlı optimizasyon probleminde, amaç fonksiyonunun minimize edilmesi iki farklı arıza durumu için 4 farklı senaryo dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3. New England 10-Makineli 39-Baralı test sistemi.

5.2.2.1. Arızalı hattın hat açması:

Bu kritik arıza durumunda $t=1$. saniyede 22 numaralı bara ile 21-22 numaralı hatların sonunda üç fazlı bir arıza meydana geldiği varsayılmıştır. Daha sonra 21-22 numaralı hatlar açılarak arızanın giderildiği kabul edilmiştir.

Senaryo 1: Bu senaryoda arızanın temizleme süresinin $tf = 0,05$ saniyelik (3 devir) olduğu kabul edilmiştir. Buna göre, 1,05 saniye sonunda arızanın giderildiği varsayılmıştır. Arıza olan yere en yakın generatörler salınımlardan daha fazla etkilenebilir. Bu nedenle, tez çalışmasında G_6 ve G_7 generatörlerine ait sistem cevapları verilmiştir.

Senaryo 2: Bu senaryo için, meydana gelen arızanın temizleme süresinin $tf = 0,10$ saniyelik (6 devir) olduğu kabul edilmiştir. Buna göre, 1,10 saniye sonunda arızanın giderildiği varsayılmıştır.

5.2.2.2. Arızalı hattın düzeltilme durumu (hat açma olmadan):

Bu kritik arıza durumunda ise $t=1$. saniye için 2 numaralı barada ve 2-3 numaralı baraların arasındaki hattın sonunda üç fazlı bir arıza olduğu varsayılmıştır. 2-3 hattı yeniden devreye sokularak (hat açma olmadan) arıza giderilmiştir. Arıza olan yere en yakın generatörler olmaları nedeniyle dolayı tez çalışmasında G_8 ve G_{10} generatörlerine ait sistem cevapları verilmiştir.

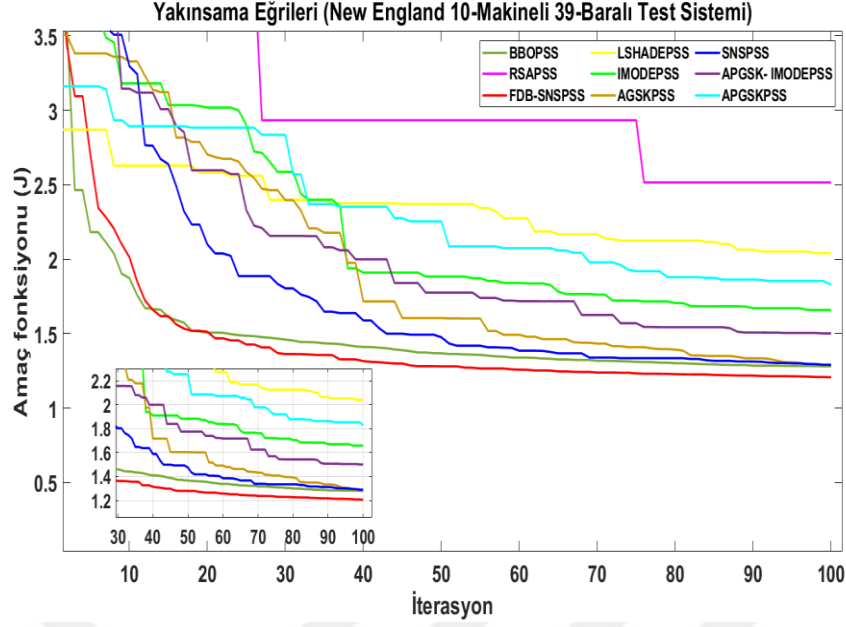
Senaryo 3: Bu senaryoda arızanın temizleme süresinin $tf = 0,10$ saniye olduğu kabul edilmiştir (6 döngü). Buna göre arızanın 1,10'uncu saniyede bittiği düşünülmüştür.

Senaryo 4: Bu senaryo için arızanın temizleme süresinin $tf = 0,20$ saniye olduğu kabul edilmiştir (12 döngü). Buna göre arızanın 1,20'nci saniyede bittiği düşünülmüştür.

Genel olarak tüm senaryolar göz önüne alındığında, Denklem (3.9)'da önerilen amaç fonksiyonunu minimum seviyeye indirmek için PSS parametrelerinin en uygun değerleri belirlenmiştir. Test sistemi 2 için, problemin çözümünde kullanılan 11 farklı algoritma ile en uygun değerleri elde edilen PSS parametreleri Çizelge 5.6'da verilmiştir. J amaç fonksiyonunun PSO, ABC, LSHADE, IMODE, AGSK, APGSK, APGSK-IMODE, BBO, RSA, SNS ve FDBSNS tabanlı yakınsama eğrileri Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının diğer algoritmalara kıyasla daha etkili bir performans sergilediği ve iterasyonlar sonucunda minimum uygunluk değeri sunan algoritma olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.6. Test sistemi 2 için elde edilen en uygun PSS parametreleri.

Generatör	PSS Parametreleri	PSO [47]	ABC [47]	AGSK	APGSK	APGSK - IMODE	BBO	IMODE	LSHADE	RSA	SNS	FDBSNS
G₁	K_P	100,00	100,00	68,5366	36,1282	79,9343	58,4431	60,3497	88,3649	95,6856	71,6689	91,5830
	T₁	1	1	0,9702	0,8725	0,6742	0,4495	0,3108	0,5032	1	0,4485	0,5096
	T₂	0,38645	0,28694	0,0511	0,8342	0,2817	0,2202	0,4122	0,3132	0,1056	0,01847	0,0988
	T₃	1	0,5930	0,1250	0,4873	0,9053	0,6841	0,9648	0,1676	0,3888	0,9223	0,9946
	T₄	0,0729	0,0186	0,1104	0,3897	0,2313	0,1242	0,2841	0,0619	0,1870	0,6091	0,3018
G₂	K_P	77,505	43,233	73,8476	48,5242	58,8320	88,1025	43,4655	95,1592	52,50923	99,9347	74,1244
	T₁	1	1	0,9997	0,5916	0,9218	0,7701	0,7197	0,0394	0,1519	0,9535	0,9927
	T₂	0,10055	0,1733	0,1200	0,07155	0,1889	0,1809	0,1714	0,0938	0,2464	0,3764	0,1882
	T₃	0,6323	0,6999	0,1627	0,5914	0,6667	0,8913	0,4122	0,3437	0,6531	0,9386	0,8761
	T₄	0,7681	0,2715	0,0291	0,3287	0,2007	0,2198	0,0999	0,5637	0,2486	0,0443	0,2289
G₃	K_P	31,518	24,755	97,7271	37,8085	65,8691	71,6493	67,5065	59,4566	21,6396	93,3872	61,2178
	T₁	0,80803	1	0,9726	0,3509	0,5369	1	0,4521	0,3630	0,1031	0,9279	1
	T₂	0,098689	0,44825	0,6806	0,1100	0,1298	0,2100	0,1212	0,3970	1	0,2777	0,1547
	T₃	0,9167	0,9283	0,9442	0,6327	0,5383	0,8036	0,6944	0,6215	0,3622	0,8924	0,9971
	T₄	0,5595	0,0100	0,0166	0,1116	0,1586	0,2131	0,4840	0,0540	0,5825	0,2276	0,3280
G₄	K_P	79,386	71,977	85,3704	50,5014	47,7175	59,0733	36,5571	89,5507	95,4121	93,2764	100
	T₁	1	0,33579	0,9807	0,5978	0,2665	0,8701	0,5460	0,2385	0,5183	0,8837	1
	T₂	0,016357	0,01	0,2397	0,2450	0,1587	0,2763	0,4104	0,1350	0,1034	0,3827	0,3512
	T₃	1	0,3585	0,6987	0,9872	0,8514	0,7460	0,9063	0,3811	0,8891	0,9954	0,9948
	T₄	0,8549	0,0474	0,2709	0,2702	0,1959	0,2119	0,1564	0,0645	0,5056	0,1909	0,2303
G₅	K_P	91,917	76,217	43,4361	65,1600	66,7780	43,8169	36,8562	21,2402	66,4484	87,4261	85,5953
	T₁	0,80115	0,57291	0,9824	0,9569	0,5769	0,8546	0,8588	0,4702	0,4399	0,9409	0,9986
	T₂	0,01	0,25835	0,2444	0,4812	0,1167	0,2551	0,2247	0,03789	0,0258	0,3030	0,3059
	T₃	0,4007	0,9718	0,8808	0,4006	0,8480	0,8476	0,7175	0,6277	0,3575	0,9778	0,8526
	T₄	0,3878	0,1517	0,1471	0,0157	0,2047	0,1042	0,2056	0,1709	0,2518	0,0920	0,1036
G₆	K_P	24,653	68,883	82,8906	37,5596	85,2383	65,9891	37,4364	95,0258	85,2540	60,0910	49,3989
	T₁	0,60633	1	0,9884	0,3474	0,6377	0,9950	0,6247	0,2610	0,3846	0,8990	0,9952
	T₂	0,043319	0,24508	0,2027	0,2532	0,1715	0,2980	0,1426	0,1990	0,5120	0,5182	0,3572
	T₃	0,5844	0,8981	0,9995	0,7105	0,8368	0,8406	0,6044	0,4753	0,8085	0,8859	0,9817
	T₄	0,3418	0,4970	0,4267	0,1416	0,3816	0,2773	0,3309	0,0298	0,1144	0,1437	0,2623
G₇	K_P	99,557	65,874	94,4961	67,0245	89,7921	85,9882	86,6765	73,9278	80,9954	87,7652	96,7632
	T₁	1	0,56192	0,9924	0,8506	0,6221	0,8682	0,6775	0,3246	0,2895	0,8354	0,9731
	T₂	0,10659	0,054116	0,0326	0,0906	0,2529	0,5646	0,3252	0,0661	0,5084	0,1233	0,4918
	T₃	1	0,8959	0,0130	0,1480	0,8513	0,8675	0,9979	0,6692	1	0,8464	0,9904
	T₄	0,2686	0,5687	0,0584	0,1215	0,2474	0,1314	0,1593	0,3233	0,1495	0,5700	0,1889
G₈	K_P	14,569	100	94,8962	54,6232	27,3030	45,3538	26,7984	94,5153	27,9879	62,2387	59,3307
	T₁	0,24737	0,33206	0,9899	0,4338	0,6367	0,5866	0,7236	0,1626	0,1739	0,9419	0,4414
	T₂	0,25424	0,023192	0,0323	0,5118	0,1016	0,3469	0,2142	0,0379	0,0597	0,0350	0,0373
	T₃	0,9103	0,9525	0,9999	0,6376	0,7715	0,9050	0,2187	0,7936	0,2874	0,4599	0,6882
	T₄	0,1161	0,0100	0,5896	0,0284	0,1856	0,0497	0,0100	0,0979	0,0372	0,4830	0,2564
G₉	K_P	14,225	35,22	85,9847	39,6886	71,9640	72,7320	62,9077	70,4109	40,6961	90,2592	58,2093
	T₁	0,86266	0,89393	0,9960	0,9956	0,8894	1	0,8854	0,5720	0,3906	0,8779	0,9874
	T₂	0,029662	0,38001	0,2515	0,1304	0,4323	0,1970	0,1731	0,0857	0,1055	0,2777	0,2210
	T₃	0,9479	1	0,9192	0,3730	0,9982	1	0,8199	0,9419	1	0,9600	0,9964
	T₄	0,0970	0,0100	0,1977	0,2096	0,1592	0,2945	0,2489	0,3304	0,2200	0,1709	0,2511
G₁₀	K_P	65,739	25,311	97,9084	63,5430	67,1149	95,2493	71,4854	24,6675	40,2012	78,8942	73,4430
	T₁	0,26253	0,064381	0,5212	0,0963	0,3594	0,7053	0,6934	0,2033	0,0989	0,8569	0,3162
	T₂	0,60206	1	0,0217	0,5573	0,7612	0,0118	0,1188	0,5495	0,7058	0,0116	0,0384
	T₃	0,2150	0,1804	0,2742	0,8146	0,5636	0,4360	0,2761	0,9773	0,1714	0,4363	0,4404
	T₄	0,8810	0,9503	0,0128	0,7384	0,1557	0,7738	0,0944	0,0502	0,1042	0,0692	0,0100



Şekil 5.4. Test sistemi 2 için amaç fonksiyonunun (J) yakınsama eğrisi.

Test sistemi 2 için, algoritmaların 30 defa bağımsız olarak çalıştırılması sonucunda elde edilen minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir. Bu test sistemi için FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK, AGSK, ABC [47] ve PSO [47] algoritmaları tarafından elde edilen minimum uygunluk değerleri sırasıyla **1,2060**; 1,2903; 2,5158; 2,0405; 1,6587; 1,2800; 1,5009; 1,8284; 1,2905; 2,4378 ve 3,8808’dir. Test sistemi 2 için elde edilen bu sonuçlar incelendiğinde, minimum değerler açısından en iyi uygunluk değerinin **1,2060** değeri ile FDBSNS algoritması kullanılarak elde edildiği görülmüştür. Öte yandan, BBO ve SNS algoritmaları da FDBSNS algoritmasından sonra minimum değerler açısından ikinci ve üçüncü sırada en iyi sonuç veren algoritmalarlardır. Bir önceki test sistemine benzer şekilde, bu test sisteminde de ABC [47] ve PSO [47] için referans olarak alınan çalışmada verilen değişken değerlerine göre yalnızca minimum uygunluk değerleri hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla bu iki algoritma ile elde edilen değişken değerlerine göre hesaplanan uygunluk değerinin maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri bu tez çalışmasında yer almamaktadır. Maksimum uygunluk değerleri açısından karşılaştırma yapıldığında ise FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK, AGSK algoritmaları kullanılarak sırasıyla, **1,3965**; 1,5291; 4,2003; 3,5641; 1,9708; 1,4865; 1,8172; 2,3530 ve 1,9942 değerleri elde edilmiştir. Böylece, elde edilen maksimum değerler amaç fonksiyonunun minimizasyon işlemi açısından karşılaştırıldığında FDBSNS algoritmasının **1,3965** değeriyle en etkili algoritma olduğu

görülmektedir. Bununla birlikte, FDBSNS algoritmasının ardından, SNS ve BBO algoritmaları da maksimum değerler açısından diğer algoritmalarla kıyasla daha etkili olan algoritmalar. Test sistemi 2 için, FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK ve AGSK algoritmaları kullanılarak 30 bağımsız çalıştırma sonucunda ortalama uygunluk değerleri sırasıyla, **1,2628**; 1,4029; 3,1858; 2,8000; 1,8046; 1,3522; 1,6164; 2,0717 ve 1,5523 olarak elde edilmiştir. Böylece, 30 bağımsız çalıştırma sonucunda elde edilen ortalama uygunluk değerleri açısından karşılaştırma yapıldığında FDBSNS algoritmasının **1,2628** değeriyle en etkili sonuç veren algoritma olmasının yanı sıra, problemin çözümünde en istikrarlı çözüm sunan algoritma olduğu da görülmektedir. Ayrıca, sırasıyla BBO ve SNS algoritmaları da FDBSNS algoritmasından sonra etkili sonuç veren algoritmalar. 30 bağımsız çalıştırma sonucunda elde edilen uygunluk değerlerinin medyan değeri incelendiğinde ise; FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK ve AGSK algoritmaları kullanılarak sırasıyla **1,2587**; 1,3981; 3,1674; 2,8133; 1,8017; 1,3453; 1,6190; 2,0753 ve 1,5125 değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Buna göre, **1,2587** değeriyle uygunluk değerlerinin medyanı açısından da en iyi sonucu veren algoritma bir kez daha FDBSNS olmuştur. Bununla birlikte, sırasıyla BBO ve SNS algoritmaları da bu karşılaştırma açısından ikinci ve üçüncü sırada en iyi sonuç veren algoritmalar olmuştur. Son olarak, bu test sisteminde 30 bağımsız çalıştırma sonucunda elde edilen uygunluk değerleri standart sapma değerleri açısından incelendiğinde, FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK ve AGSK algoritmaları kullanılarak sırasıyla **$3,71 \times 10^{-2}$** ; $4,89 \times 10^{-2}$; $4,36 \times 10^{-1}$; $3,62 \times 10^{-1}$; $6,50 \times 10^{-2}$; $4,74 \times 10^{-2}$; $6,70 \times 10^{-2}$; $1,34 \times 10^{-1}$ ve $1,56 \times 10^{-1}$ değerleri elde edilmiştir. Buna göre, 30 bağımsız çalıştırma sonucunda FDBSNS algoritması ile elde edilen **$3,71 \times 10^{-2}$** standart sapma değerinin, karşılaştırılan algoritmalar ile elde edilen değerler arasında minimum standart sapma değeri olduğu görülmektedir. Böylece, FDBSNS algoritmasının New England 10-Makine 39-Baralı için problemin çözümünde en iyi çözümleri sunmasının yanı sıra en istikrarlı çözümleri de sunan algoritma olduğu açıkça görülmektedir. Buna ek olarak, Test sistemi 1 ve Test sistemi 2 için tüm MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Test sistemi 1 ve Test sistemi 2 için tüm MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri.

Algoritma / Test Sistemi	Minimum		Maksimum		Ortalama		Medyan		Standart Sapma	
	WSCC 3makine- 9 bara	New England 10 makine 39 bara	WSCC 3makine- 9 bara	New England 10 makine 39 bara	WSCC 3 makine- 9 bara	New England 10 makine 39 bara	WSCC 3makine- 9 bara	New England 10 makine 39 bara	WSCC 3makine- 9 bara	New England 10 makine 39 bara
PSO [47]	0,1080	3,8808	----	----	----	----	----	----	----	----
ABC [47]	0,1006	2,4378	----	----	----	----	----	----	----	----
AGSK	0,0966	1,2905	0,1017	1,9942	0,0970	1,5523	0,0966	1,5125	$1,20 \times 10^{-3}$	$1,56 \times 10^{-1}$
APGSK	0,0971	1,8284	0,1032	2,3530	0,1002	2,0717	0,1002	2,0753	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,34 \times 10^{-1}$
APGSK- IMODE	0,0965	1,5009	0,0987	1,8172	0,0969	1,6164	0,0967	1,6190	$6,00 \times 10^{-4}$	$6,70 \times 10^{-2}$
BBO	0,0972	1,2800	0,1063	1,4865	0,1006	1,3522	0,1002	1,3453	$2,70 \times 10^{-3}$	$4,74 \times 10^{-2}$
IMODE	0,0967	1,6587	0,0975	1,9708	0,0968	1,8046	0,0966	1,8017	$3,00 \times 10^{-4}$	$6,50 \times 10^{-2}$
LSHADE	0,0967	2,0405	0,0998	3,5641	0,0976	2,8000	0,0975	2,8133	$8,00 \times 10^{-4}$	$3,62 \times 10^{-1}$
RSA	0,0970	2,5158	0,1061	4,2003	0,1006	3,1858	0,0999	3,1674	$2,20 \times 10^{-3}$	$4,36 \times 10^{-1}$
SNS	0,0965	1,2903	0,0984	1,5291	0,0970	1,4029	0,0967	1,3981	$6,00 \times 10^{-4}$	$4,89 \times 10^{-2}$
FDBSNS	0,0964	1,2060	0,0964	1,3965	0,0964	1,2628	0,0964	1,2587	$1,56 \times 10^{-7}$	$3,71 \times 10^{-2}$

Bir önceki alt bölümde yer alan test çalışması ile karşılaştırıldığında, daha kapsamlı bir güç sistemi üzerinde test edilen ve daha fazla parametrenin optimizasyon işleminin gerçekleştirildiği Test sistemi 2’de minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri açısından karşılaştırma yapıldığında FDBSNS algoritmasının diğer tüm algoritmalarla kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği ve daha etkili bir performans ortaya koyduğu görülmektedir. Bununla birlikte, geliştirilen FDBSNS algoritmasının en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi konusunda göstermiş olduğu performansı daha açık bir şekilde ortaya koyabilmek amacıyla, elde edilen sonuçlar bir sonraki alt bölümde çeşitli istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır.

5.2.3. Test Sistemi 1 ve Test Sistemi 2 için İstatistiksel Analiz Sonuçları

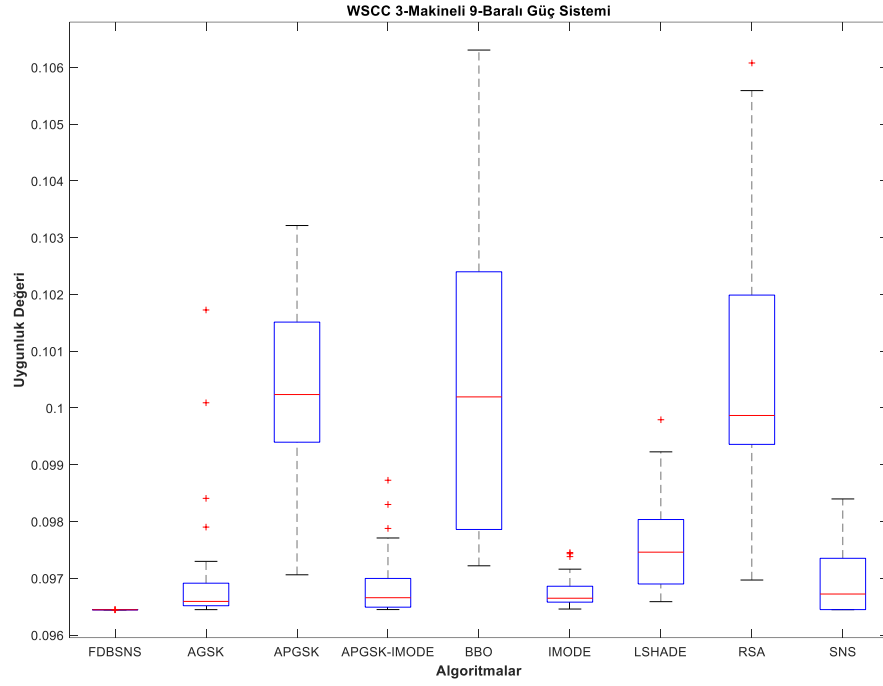
En uygun PSS parametrelerinin belirlenmesine yönelik en etkili MSA algoritmasının tespit edilmesi amacıyla, önemli istatistiksel analiz yöntemlerinden bir tanesi olan Friedman istatistiksel analiz testi gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analiz sonuçları, FDBSNS algoritmasının hem her iki test sistemi için ayrı ayrı puanlama yapıldığında hem de ortalama puan değeri dikkate alındığında, deneysel çalışmada karşılaştırılan algoritmaların tamamı arasında ilk sırada yer aldığını göstermektedir. Algoritmaların her iki test çalışması için elde ettiği en iyi Friedman skorları Çizelge 5.8’de verilmiştir. Her iki test sistemi için elde edilen puan değerleri incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının

rakip MSA algoritmalarına kıyasla keşif, sömürü ve dengeli arama yetenekleri açısından üstün olduğu çıkarımı yapılabilir.

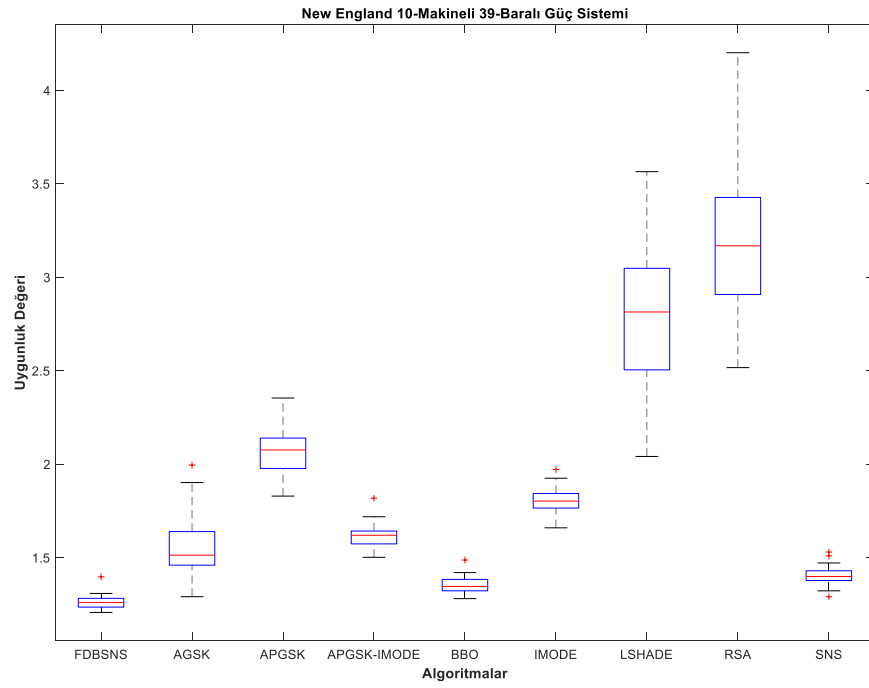
Çizelge 5.8. FDBSNS ve rakip MSA algoritmaları için Friedman puanları.

Algoritmalar	Puan Değeri (Test Sistemi 1)	Puan Değeri (Test Sistemi 2)	Ortalama Puan Değeri (Test Sistemi 1 & Test Sistemi 2)
FDBSNS	1	1,066	1,0333
SNS	3,9	3	3,45
AGSK	3,7	4,13	3,9166
APGSK_IMODE	3,93	4,73	4,33
BBO	7,53	2,2	4,8666
IMODE	3,83	5,9	4,8666
LSHADE	5,33	8,13	6,7333
APGSK	7,9	7	7,45
RSA	7,87	8,83	8,35

Bu analize ek olarak, kutu grafikleri de algoritmaların keşif ve sömürü yeteneklerini analiz etmek için kullanılan bir başka etkili değerlendirme yöntemidir. Kutu grafiklerinde her bir kutuda, ortadaki işaret medyan değerini gösterir. Kesikli olarak yer alan çizgiler aykırı değer olarak kabul edilmeyen en uç veri noktalarına kadar uzanır ve aykırı değerler “+” işaret sembolü kullanılarak ayrı ayrı çizilir. Kutu grafiklerinin değerlendirmesi yapılırken, 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma sonucunda elde edilen sonuçların değişim aralığının sıfıra yakın olması istenmektedir. Değişim aralığının sıfıra yaklaşması veri setinin daha fazla kümelenmesi anlamına gelir. Bu durum, algoritmanın her bir çalışmada daha kararlı sonuç verdiğini gösterir. Şekil 5.5’te yer alan kutu grafikleri sırasıyla Test sistemi 1 ve Test sistemi 2 için minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değişim aralıklarını göstermektedir. En uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümünde karşılaştırılan algoritmaların sıfır değişim aralığına yakınsama durumları ele alınmıştır. Her iki test sistemi için kutu grafikleri incelendiğinde, sıfır değişim aralığına en yakın sonuçlar FDBSNS algoritması ile elde edilirken, en uzak sonuçların ise RSA algoritması ile elde edildiği görülmektedir. Kullanılan diğer algoritmaların FDBSNS algoritmasına göre sıfır değişim aralığına daha uzak olduğu görülmektedir. Ayrıca, FDBSNS algoritması ile elde edilen uygunluk değerinin her iki test sisteminde de minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri açısından en küçük olduğu kutu grafiklerinde görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.5. Test Sistemi 1 (a) ve Test Sistemi 2 (b) için kutu grafikleri.

Sonuç olarak, kutu grafiklerine göre, FDBSNS algoritmasının arama uzayında kararlı bir arama yeteneğine, erken yakınsama problemlerinden kaçınmak için güçlü bir keşif yeteneğine ve çözüm adaylarının komşuluğunda etkili bir sömürü yeteneğine sahip olduğu söylenebilir. İstatistiksel analiz sonuçları incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının karşılaştırılan diğer algoritmalara kıyasla üstünlüğü açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, önerilen algoritmanın en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesindeki başarılı performansının kesin olarak kanıtlanması amacıyla optimizasyon işlemiyle elde edilen parametrelere göre, elde edilen doğrusal olmayan zaman alanı sonuçları da incelenmelidir. Bir sonraki alt bölümde, her iki test sisteminde belirlenen arıza senaryoları için FDBSNS algoritmasının ve karşılaştırılan diğer algoritmaların doğrusal olmayan zaman alanı simülasyonu yanıtları verilmiştir.

5.2.4. Test Sistemleri için Elde Edilen Sistem Yanıtları

Bu alt bölümde, Bölüm 5.2.1 ve 5.2.2’de ifade edilen toplam sekiz arıza senaryosu dikkate alınarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan zaman alanı simülasyonlarına ait sistem yanıtları yer almaktadır. Bu arıza senaryolarından ilk dört tanesi WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sisteminde, kalan dört tanesi ise New England 10-Makineli 39-Baralı test sisteminde gerçekleştirilmiştir.

5.2.4.1. Test Sistemi 1 için Sistem Yanıtları:

Test sistemi 1 için [47]’de yer alan Simulink tabanlı modeller, WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sisteminin geçici durum kararlılık çalışmalarında kullanılmıştır. Bu alt bölümde, Bölüm 5.2.1’de bahsedilen dört farklı senaryo ve en uygun parametre değerleri belirlenen PSS kullanılarak zaman alanı analizi gerçekleştirilmiş ve FDBSNS tabanlı PSS denetleyicisinin problemin çözümündeki etkisi ve başarılı performansı vurgulanmıştır. Simulink modelinde diferansiyel denklemlerin sayısal entegrasyonu için Runge-Kutta-4 yöntemi kullanılmış ve adım zamanı $\Delta t=0,005$ s olarak seçilmiştir. Bu güç sistemi için, 10 saniyelik (t_{sim}) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Test sisteminde G_1 generatörü, referans generatör olarak belirlenmiştir. Buna göre, Senaryo 1 ve Senaryo 2 arıza koşulları için G_2 ve G_3 generatörlerinin δ_2 - δ_1 ve δ_3 - δ_1 bağıl rotor açısı tepkileri ile ω_2 - ω_1 ve ω_3 - ω_1 rotor hızı sapma yanıtları sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.8’de yer almaktadır. Her iki arıza senaryosu için Pe_1 , Pe_2 ve Pe_3 elektriksel güç çıkışları ise Şekil 5.7 ve Şekil 5.9’da verilmiştir. Senaryo 3 ve Senaryo 4 arıza koşulları için, G_2 ve G_3 generatörlerinin δ_2 - δ_1 ve δ_3 - δ_1 bağıl rotor açısı yanıtları ile ω_2 - ω_1 ve ω_3 - ω_1 rotor hızı sapması yanıtları

sırasıyla Şekil 5.10 ve Şekil 5.12’de yer almaktadır. Buna ek olarak, Senaryo 3 ve Senaryo 4 arıza koşulları için $Pe1$, $Pe2$ ve $Pe3$ elektriksel güç çıkışları ise Şekil 5.11 ve Şekil 5.13’te yer almaktadır.

Senaryo 1, 2, 3 ve 4’te, PSS’nin kullanılmadığı ve PSS’nin 11-farklı optimizasyon algoritması ile kontrol edildiği durumlardaki salınım sönümlmeleri incelenmiştir. Senkron generatörlere ait açı, açısal hız ve aktif güçler arasındaki değişimler detaylı olarak incelendiğinde, geçici durum arızalarında salınım sönümlmesinden en çok etkilenen parametrenin senkron generatör açısı olduğu görülmektedir. WSCC 3-Makineli 9-Baralı güç sisteminde, PSS kullanılmadığında sistemin kararsız olduğu ve sistemde oluşan salınımların sönümlenmediği görülmektedir. Bununla birlikte, en uygun parametre değerlerinin MSA algoritmaları kullanılarak belirlendiği PSS kullanımı ile sistem kararlı hale gelmekte ve sistemdeki salınımlar sönümlenmektedir. PSS sisteme uygulanırken, optimum çalışma değerlerini belirlemek için FDBSNS algoritması ve karşılaştırılan rakip MSA algoritmaları kullanılmıştır. Karşılaştırılan tüm algoritmalar senkron generatör açısı bakımından incelendiğinde, elde edilen grafiklerden FDBSNS algoritmasının salınımları en kısa sürede sönümllediği, PSO algoritmasının ise tüm senaryolar için salınımların sönümlenmesi bakımından en kötü sonuçları sunduğu görülmektedir. Ayrıca, açı, açısal hız ve aktif güç süresi yanıtlarının yakınlştırılmış görünümü Şekil 5.6 ve Şekil 5.13 arasında yer alan grafiklerde görülmektedir. Çalışmada kullanılan tüm algoritmalar maksimum-minimum aşım değerleri ve oturma süreleri açısından incelendiğinde, geliştirilen FDBSNS algoritmasının diğer algoritmalara kıyasla genel olarak daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bununla birlikte, bazı durum ve senaryolarda salınımları bazı algoritmalara göre yeterince erken sönümlmesine rağmen, kararlı hale gelmesi için daha fazla zamana ihtiyacı vardır. Ancak yine de maksimum-minimum aşım değerleri veya oturma süresi gibi kriterlerin tamamı performans indekslerine bağlı olarak daha etkili bir şekilde değerlendirilmektedir. Buna göre, test edilen tüm algoritmalar performans indeksleri açısından değerlendirildiğinde, geliştirilen FDBSNS algoritmasının diğer algoritmalara kıyasla problemin çözümünde en iyi sonuçları sunduğu görülmektedir. PSS’nin kullanıldığı ilk üç senaryoda salınımların arıza sonrası süreçte hızlı bir şekilde tepe seviyeye ulaştığı ve ardından sönümlendiği gözlenirken, Senaryo 4’te ise salınımların tepe değerine kadar kademeli olarak arttığı ve ardından sönümlendiği gözlenmiştir. Geçici durum arızası sırasında, salınım aralığında tüm senaryolar değerlendirildiğinde en geniş limit aralığı Senaryo 4’te, en dar limit aralığı ise

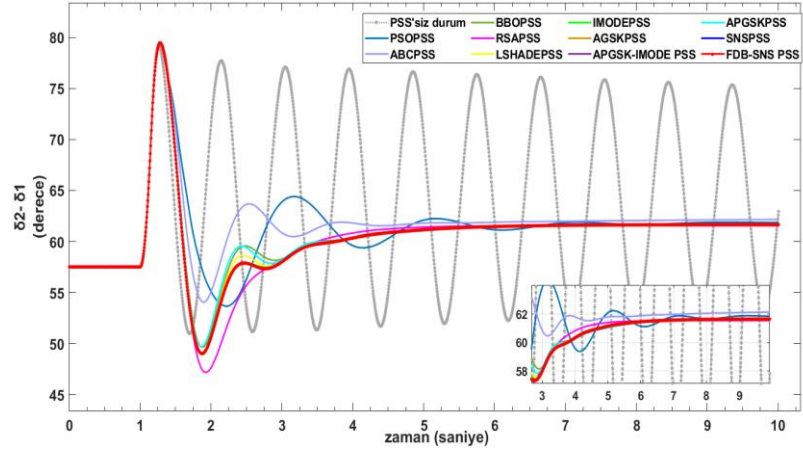
Senaryo 1’de belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 5.6 ve Şekil 5.13 arasında yer zaman alanı analizlerinde, geliştirilen FDBSNS algoritmasının başarılı performansını sayısal verilerle de desteklemek amacıyla, dört farklı test senaryosunun toplamına göre elde edilen hata değerlerine göre çizdirilen çıkış sinyallerinin türevi alınarak, elde edilen değerler Çizelge 5.9’da sunulmuştur. Açık sapması bakımından hata sinyalinin türev değeri, karşılaştırılan algoritmalar arasında **1943,1222** değeri ile FDBSNS tarafından minimum değerde elde edilmiştir. FDBSNS algoritmasını sırasıyla BBO ve SNS algoritmaları takip etmektedir. Açık hız bakımından hata sinyalinin türev değeri dikkate alındığında **0,7174** ile FDBSNS ilk sırada yer alırken; ardından SNS ve BBO algoritmaları yer almaktadır. Elektriksel çıkış gücü açısından karşılaştırma yapıldığında ise 83,1994 değeri SNS algoritması ilk sırada yer alırken FDBSNS algoritması **85,8430** değeriyle ikinci sırada yer almaktadır. Üçüncü sırada ise 85,9069 değeriyle BBO algoritması bulunmaktadır.

Çizelge 5.9. Test sistemi 1 için zaman alanı analizinde minimum hata sinyalinin türev değerleri.

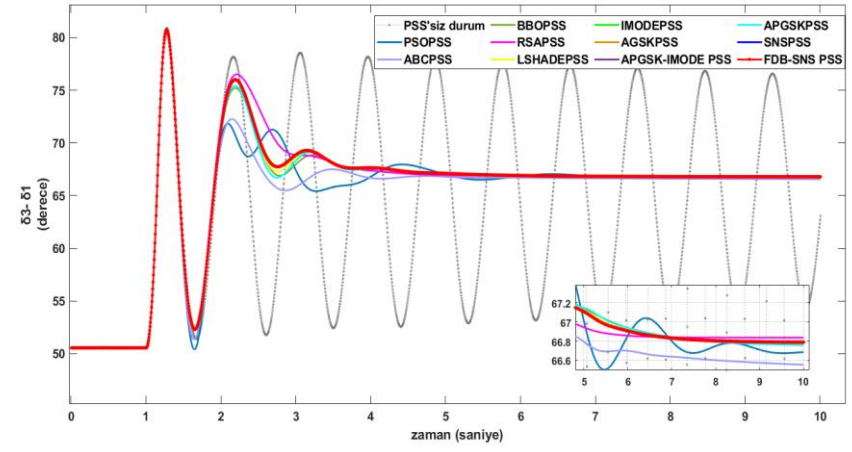
WSCC 3- Makineli 9-Baralı Test Sistemi							
Algoritmalar	δ (Açı Sapması)	Sıra	ω (Açısal Hız)	Sıra	P_e (Elektiksel Çıkış Gücü)	Sıra	Genel Ortalama Sıralama Değeri
FDBSNS	1943,1222	1	0,7174	1	85,8430	2	1,3333
SNS	1943,8541	3	0,7309	2	83,1994	1	2
BBO	1943,6709	2	0,7315	3	85,9069	3	2,6666
IMODE	1944,1116	6	0,7346	4	86,1293	4	4,6666
APGSK-IMODE	1944,0415	4	0,7358	5	86,2511	6	5
AGSK	1944,0860	5	0,73609	9	86,2948	4	6
APGSK	1949,6753	7	0,7358	6	86,2426	5	6
ABC	1952,1758	8	0,73609	8	86,2906	8	8
RSA	1954,7071	10	0,73600	7	86,2829	7	8
LSHADE	1954,2735	9	0,7369	10	86,3118	10	9,6666
PSO	2049,5440	11	0,7578	11	90,7489	11	11
PSS’siz	87046,0651	12	5,4216	12	3765,8024	12	12

Buna göre, üç hata değeri açısından da elde edilen sıralamaların ortalama değeri incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının **1,3333** genel ortalama sıralama değeri ile, karşılaştırılan 11 algoritma ve PSS'nin kullanılmadığı durum açısından zaman alanı analizi yanıtları ile ilgili olarak en iyi çözüm sunan algoritma olduğu bir kez daha kanıtlanmıştır. FDBSNS algoritmasını takip eden algoritmalar ise 2 ve 2,6666 değeriyle sırasıyla SNS ve BBO olmuştur. PSS'nin kullanılmadığı durum dışında, algoritmalar arasında rakiplerine kıyasla genel ortalama sıralama değeri açısından en etkisiz performans sunan algoritma ise PSO olmuştur.

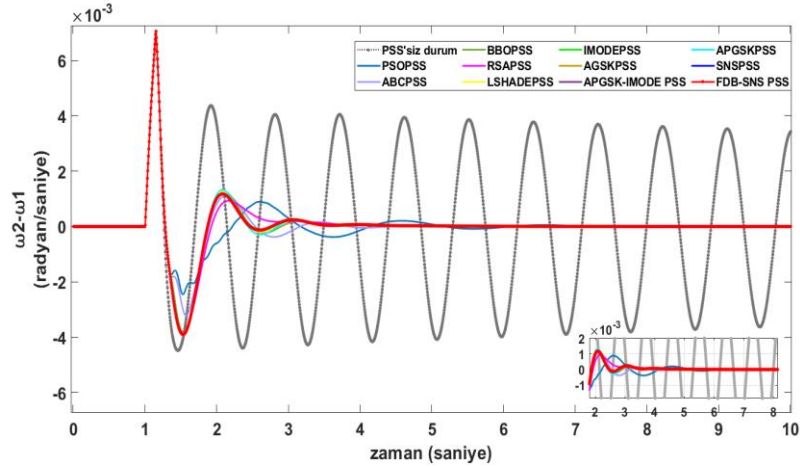




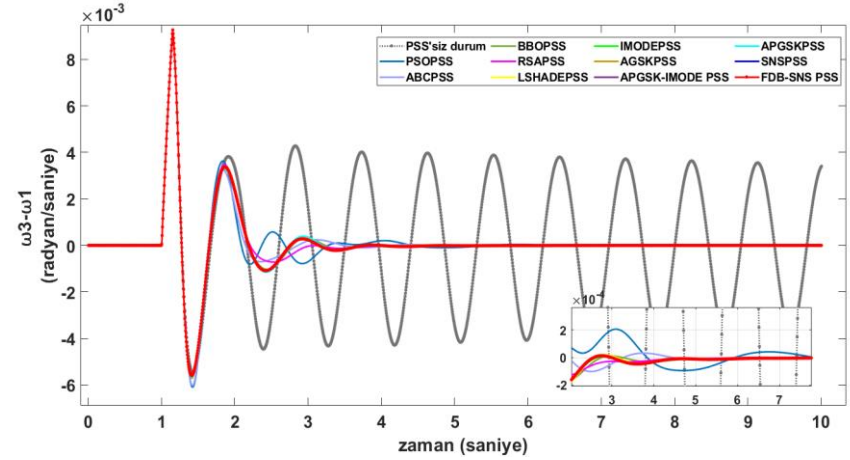
(a)



(b)

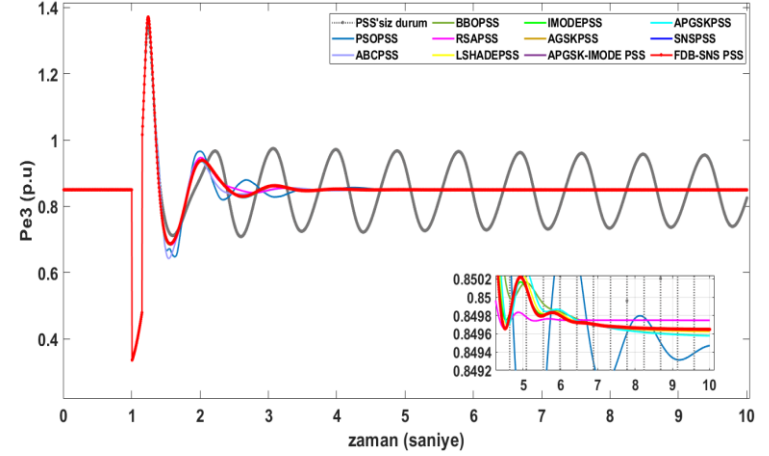
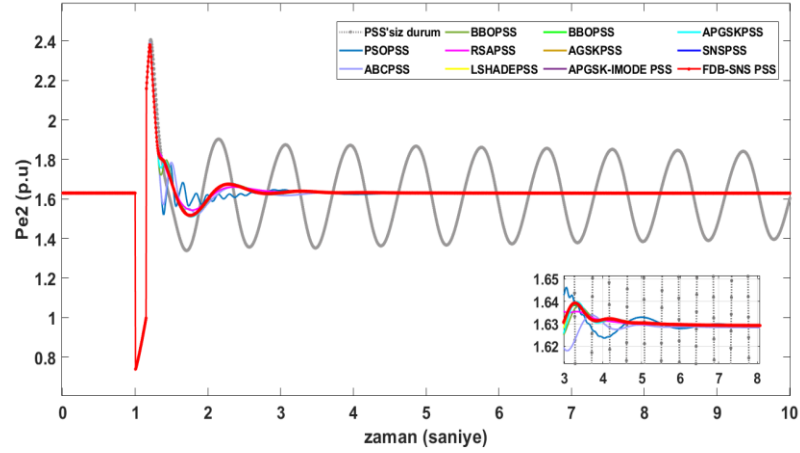
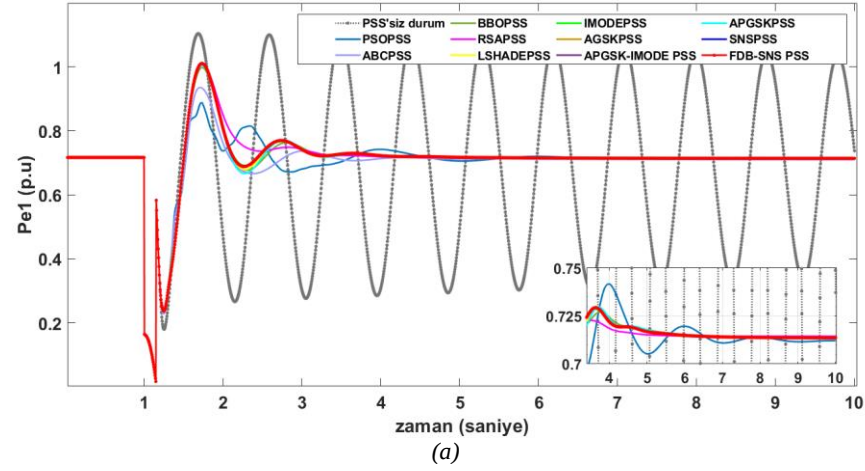


(c)

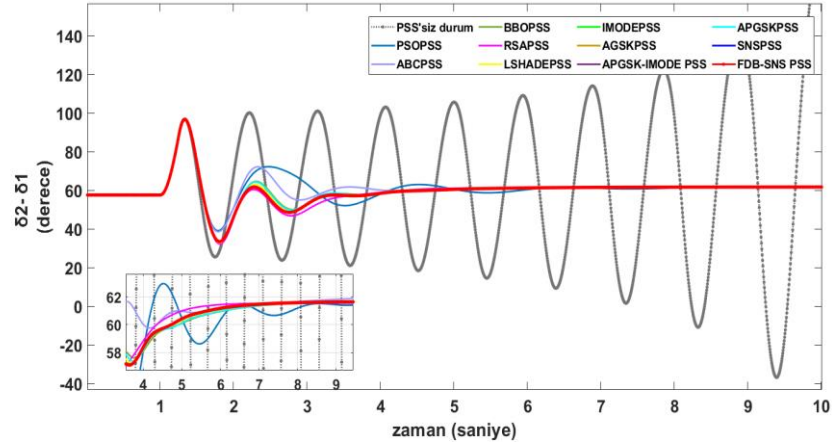


(d)

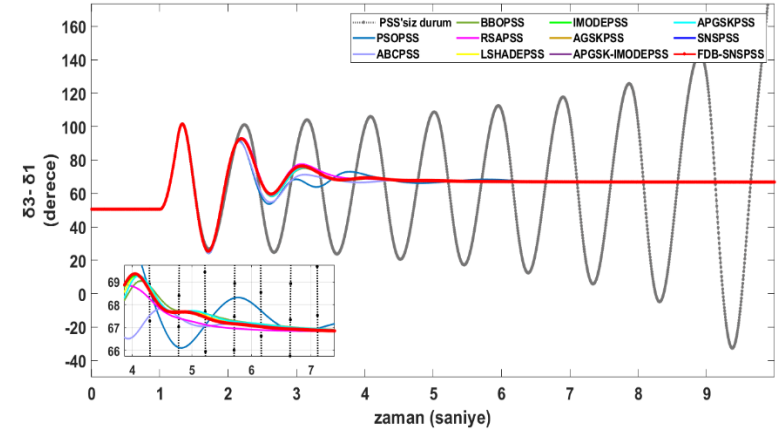
Şekil 5.6. Senaryo 1: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta_2 - \delta_1$, (b) $\delta_3 - \delta_1$, (c) $\omega_2 - \omega_1$ (d) $\omega_3 - \omega_1$.



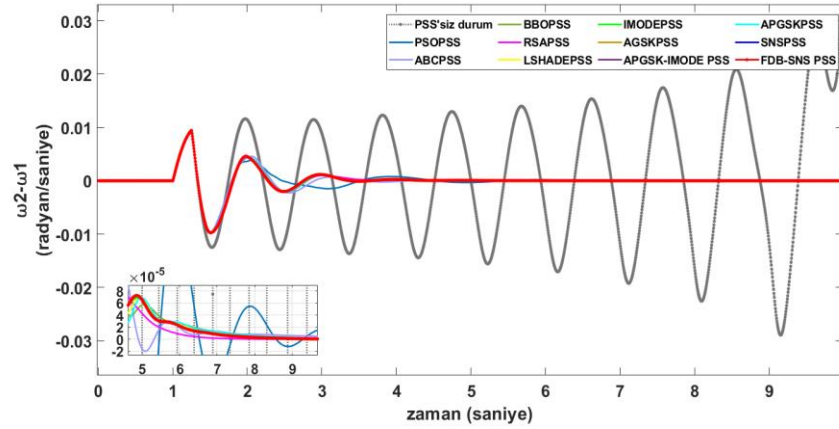
Şekil 5.7. Senaryo 1: WSCC 3-Makinelı 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) Pe_1 , (b) Pe_2 , (c) Pe_3 .



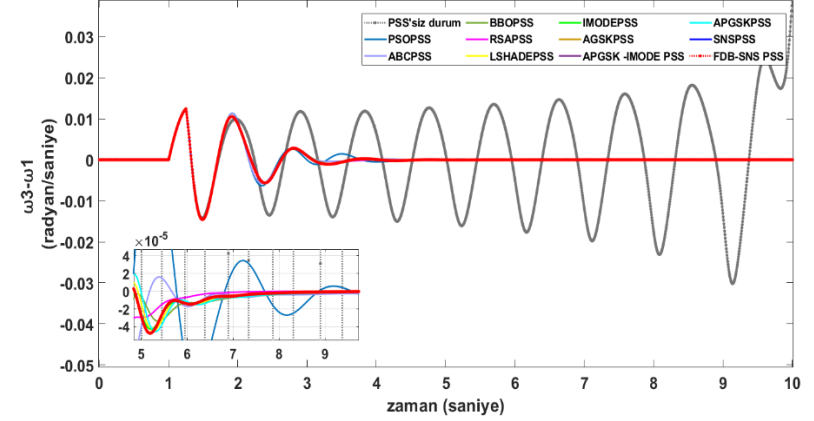
(a)



(b)

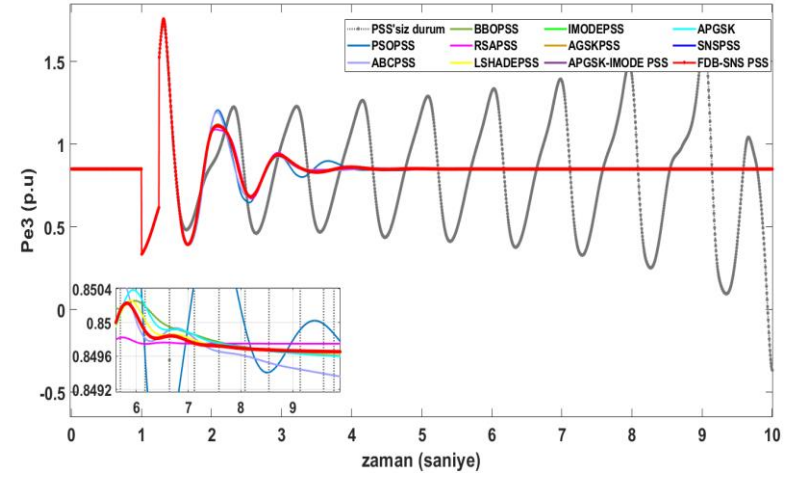
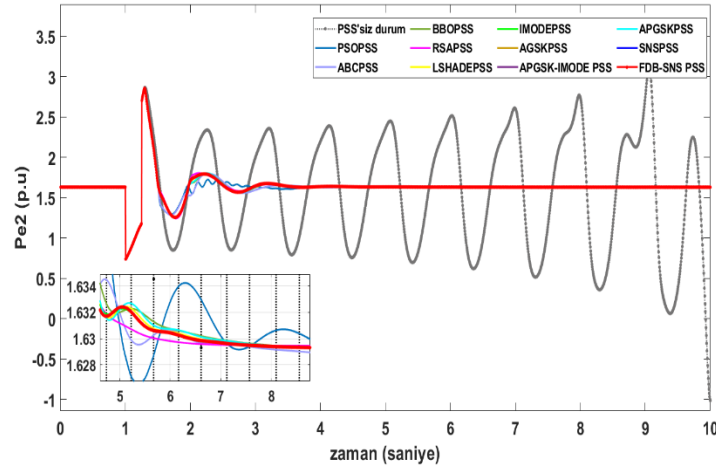
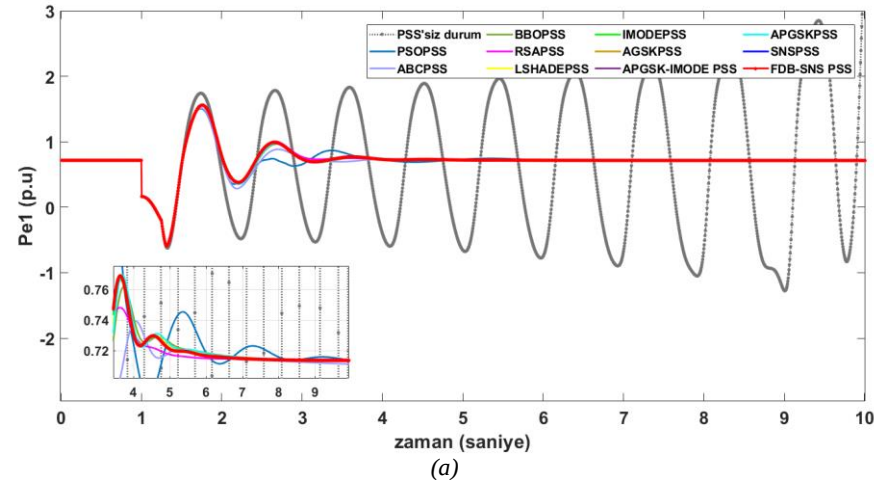


(c)

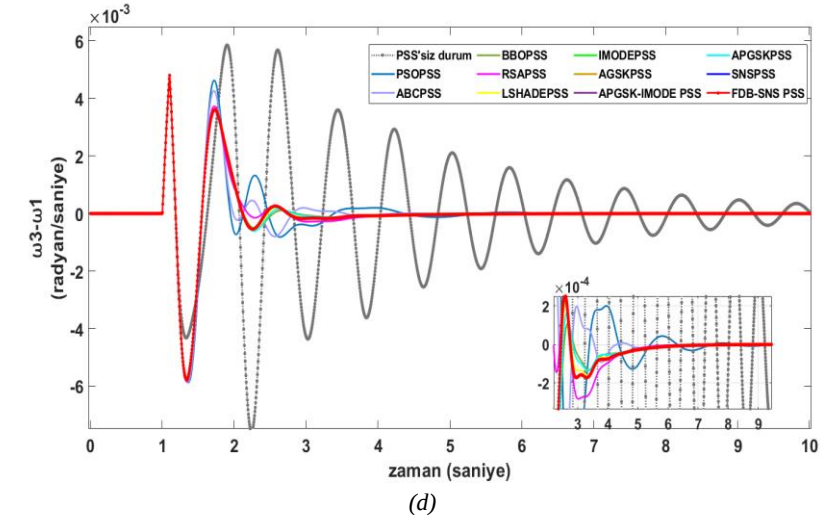
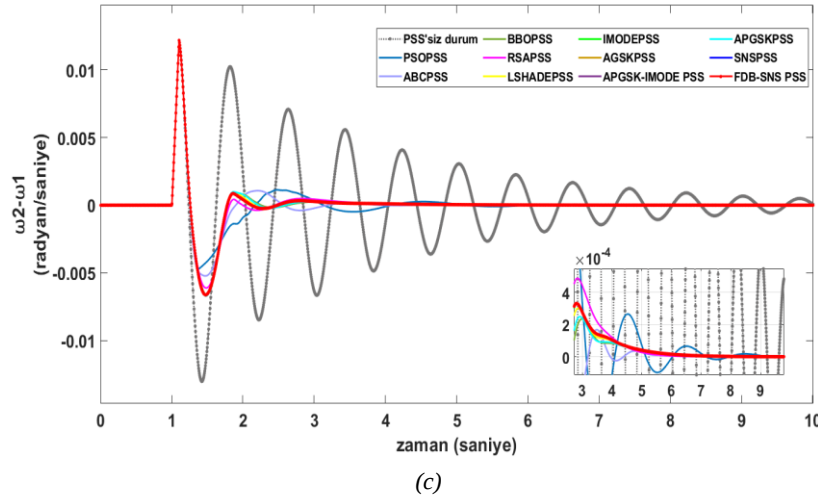
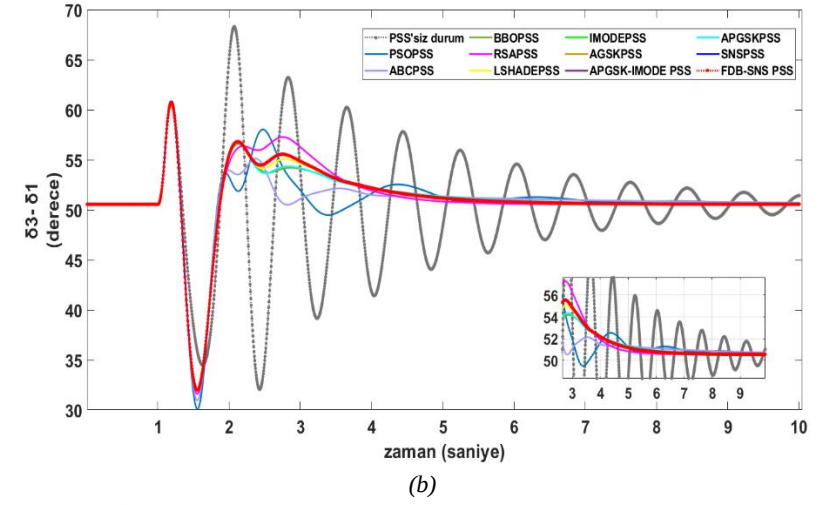
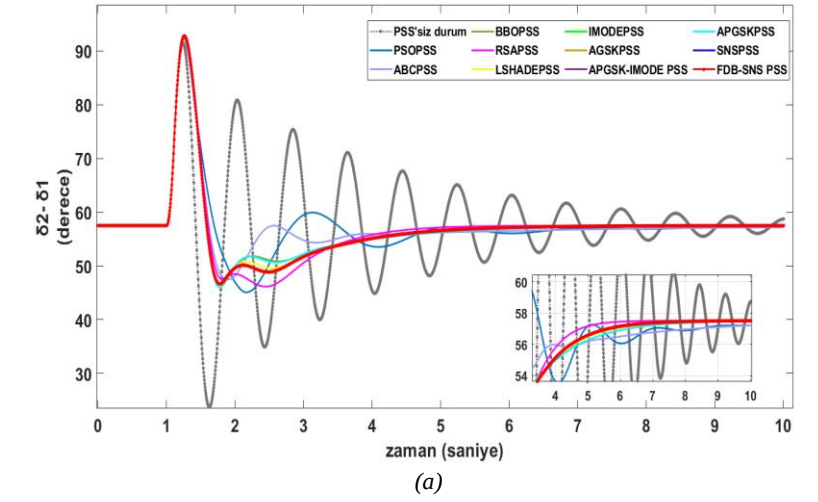


(d)

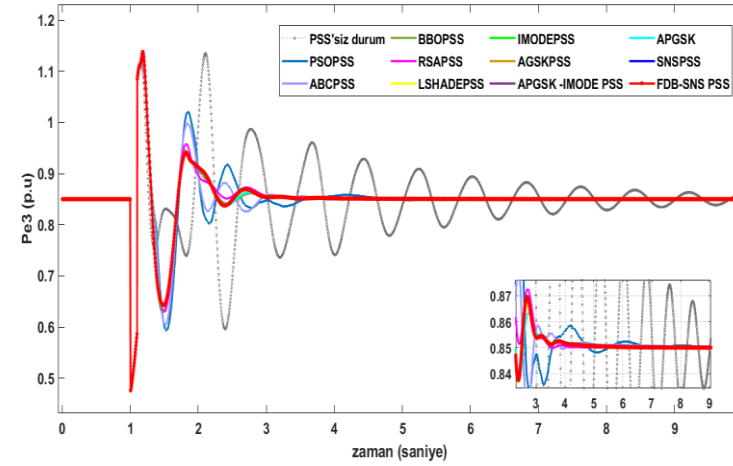
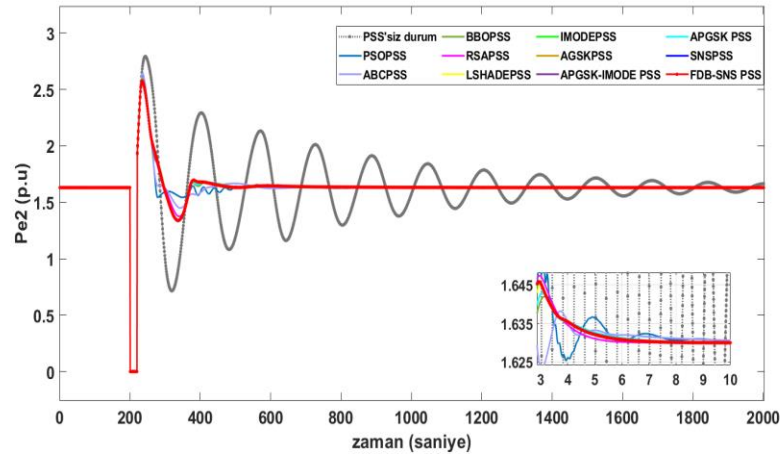
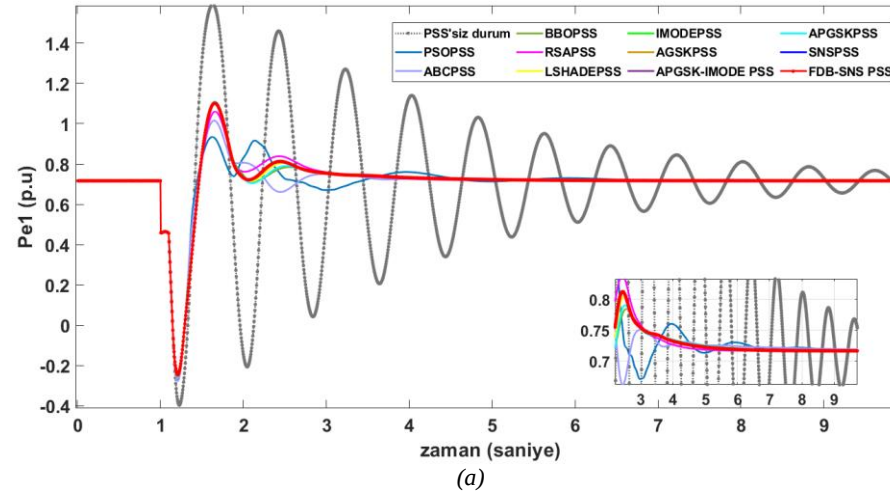
Şekil 5.8. Senaryo 2: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta_2 - \delta_1$, (b) $\delta_3 - \delta_1$, (c) $\omega_2 - \omega_1$ (d) $\omega_3 - \omega_1$.



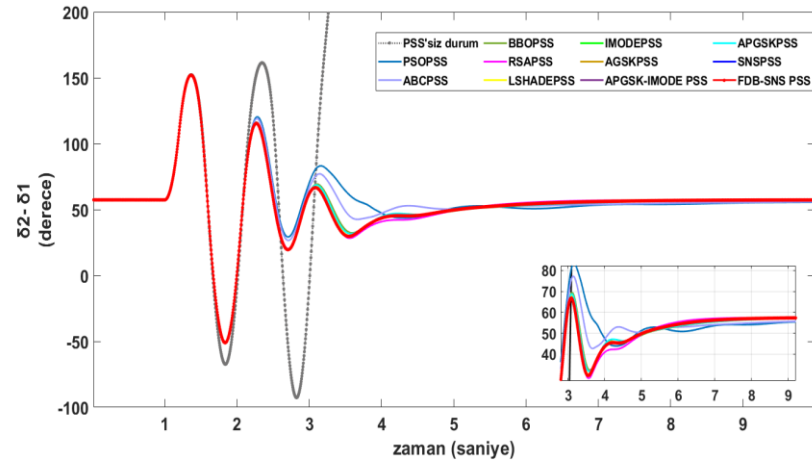
Şekil 5.9. Senaryo 2: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) Pe_1 , (b) Pe_2 , (c) Pe_3 .



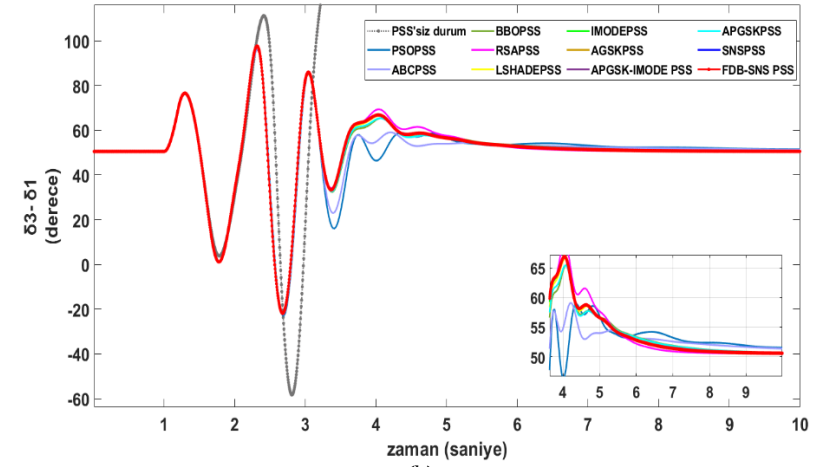
Şekil 5.10. Senaryo 3: WSCC 3-Makinelı 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta_2 - \delta_1$, (b) $\delta_3 - \delta_1$, (c) $\omega_2 - \omega_1$ (d) $\omega_3 - \omega_1$.



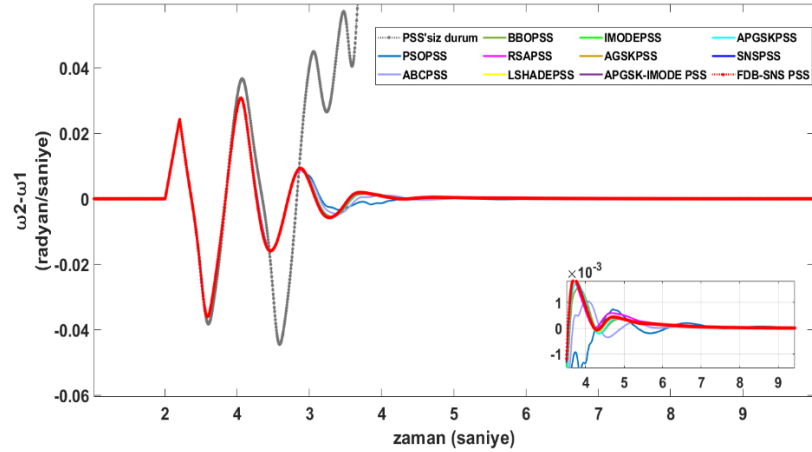
Şekil 5.11. Senaryo 3: WSCC 3-Makinelı 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) Pe_1 , (b) Pe_2 , (c) Pe_3 .



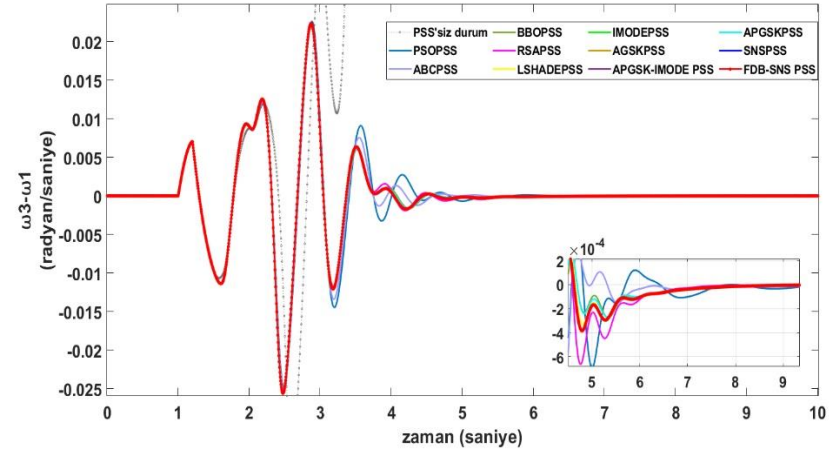
(a)



(b)

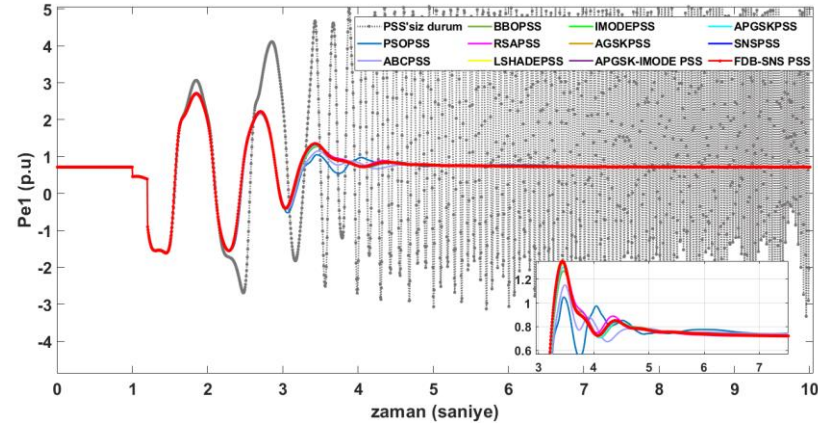


(c)

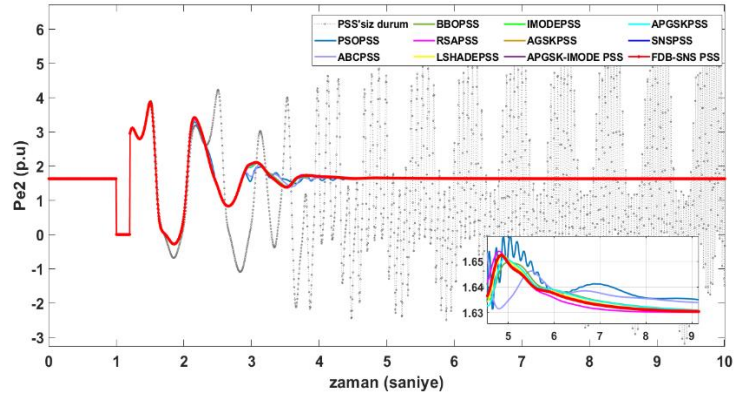


(d)

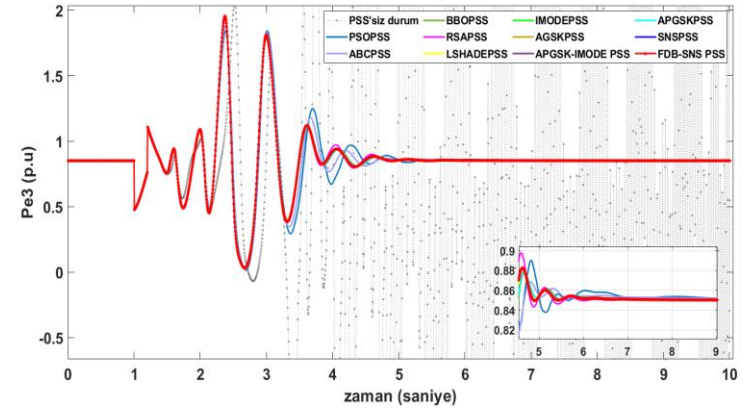
Şekil 5.12. Senaryo 4: WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta_2 - \delta_1$, (b) $\delta_3 - \delta_1$, (c) $\omega_2 - \omega_1$ (d) $\omega_3 - \omega_1$.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.13. Senaryo 4: WSCC 3-Makineli 9–Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) Pe_1 , (b) Pe_2 , (c) Pe_3 .

5.2.4.2. Test Sistemi 2 için Sistem Yanıtları:

Test sistemi 2 için [47]'de yer alan Simulink tabanlı modeller, New England 10-Makineli 39-Baralı test sisteminin geçici durum kararlılık analizlerinde kullanılmıştır. Bu alt bölümde, Bölüm 5.2.2'de bahsedilen dört farklı senaryo ve en uygun değerleri belirlenen PSS parametreleri ile zaman alanı analizi gerçekleştirilerek, FDBSNS tabanlı PSS denetleyicisinin problemin çözümündeki başarılı performansı vurgulanmıştır. Simulink modelinde, bir önceki test sistemine benzer şekilde diferansiyel denklemlerin sayısal entegrasyonu için Runge-Kutta-4 yöntemi kullanılmış ve adım zamanı $\Delta t=0,005$ s olarak seçilmiştir. Bir önceki test sisteminden farklı olarak, ikinci test sistemi için, 20 saniyelik (t_{sim}) lineer olmayan simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Test sisteminde G_1 generatörü (39 numaralı bara) referans generatör olarak seçilmiştir. Senaryo 1 ve Senaryo 2 için, arızanın meydana geldiği 21-22 numaralı baralar arasındaki hatlara en yakın ve dolayısıyla salınımların en çok etkileyeceği generatörler olmaları nedeniyle, G_6 ve G_7 generatörlerinin sistem yanıtları verilmiştir. Benzer şekilde, Senaryo 3 ve Senaryo 4'te arızanın meydana geldiği 2-3 numaralı baralar arasındaki hatlara en yakın generatörler olan G_8 ve G_{10} generatörleri için sistem yanıtları verilmiştir. Buna göre Senaryo 1 ve Senaryo 2 arıza koşulları için G_6 ve G_7 generatörlerinin $\delta 6$ - $\delta 1$ ve $\delta 7$ - $\delta 1$ bağıl rotor açısı tepkileri ile $\omega 6$ - $\omega 1$ ve $\omega 7$ - $\omega 1$ rotor hızı sapma yanıtları sırasıyla Şekil 5.14 ve Şekil 5.16'da yer almaktadır. Ayrıca Pe_6 ve Pe_7 elektriksel güç çıkışları Şekil 5.15 ve Şekil 5.17'de verilmiştir. Senaryo 3 ve Senaryo 4 arıza koşulları için ise G_8 ve G_{10} generatörlerinin $\delta 8$ - $\delta 1$ ve $\delta 10$ - $\delta 1$ bağıl rotor açısı tepkileri ile $\omega 8$ - $\omega 1$ ve $\omega 10$ - $\omega 1$ rotor hızı sapması yanıtları Şekil 5.18 ve Şekil 5.20'de verilmiştir. Ayrıca yine Senaryo 3 ve Senaryo 4 arıza koşulları için, Pe_8 ve Pe_{10} elektrik güç çıkışları ise Şekil 5.19 ve Şekil 5.21'de yer almaktadır. New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sisteminin senkron generatör açıları, açısal hızları ve aktif güçleri arasındaki değişimler kapsamlı bir şekilde incelendiğinde, PSS kullanılmadığında arıza durumunun çok uzun süre stabil olarak sürdüğü ve salınımların kararlı hale gelmediği belirlenmiştir. Senkron generatörlerde Senaryo 1, 2, 3 ve 4 arıza durumları için, 11 farklı MSA algoritması aracılığıyla parametreleri belirlenen PSS'ler denetleyici olarak kullanıldığında ise sistemin belirli bir süre sonra kararlı hale geldiği görülmektedir. Tüm algoritmalar arasında FDBSNS algoritması ile parametreleri belirlenen PSS'ler kullanıldığında sistemin daha kısa sürede kararlı hale geldiği ve salınımların etkili bir şekilde sönümlendiği görülmektedir. Şekil 5.14 ve Şekil 5.21 arasında yer alan grafiklere göre, senkron generatör açısı, geçici durum

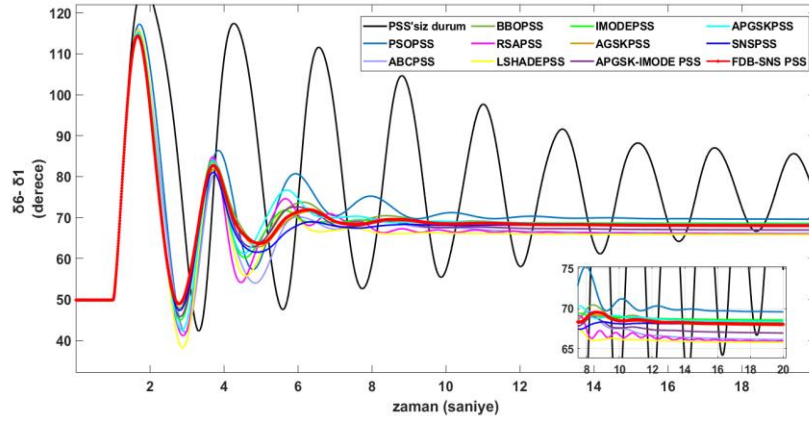
arızalarında salınım sönümlemesinden en çok etkilenen parametredir. FDBSNS, senkron generatör açısı için en kısa süreli salınım sönümlemesine sahip olan algoritmadır. Bununla birlikte, PSO algoritması senkron generatör açısı bakımından en kötü salınım sönümlemesine sahiptir. Açık, açısal hız ve aktif güç süresi tepkilerinin yakınlaştırılmış versiyonları, Şekil 5.14 ve Şekil 5.21 arasında daha ayrıntılı olarak incelenebilir. Ayrıca FDBSNS algoritması ve diğer algoritmalar maksimum-minimum aşım değerleri ve oturma süreleri açısından değerlendirilmiştir. FDBSNS, genel olarak rakip algoritmalarla kıyasla daha etkili sonuçlar vermesine rağmen, bazı senaryolar için salınımların sönümleme ve oturma süreleri bazı algoritmalarla kıyasla biraz daha uzun sürmüştür. Ancak yine de sistemin maksimum-minimum aşım değerlerinin ve oturma süresinin belirlenmesinde öncelikli olarak performans indeksleri dikkate alındığında, en iyi sonuçların FDBSNS ile elde edildiği görülmektedir. Dört senaryonun sonuçlarına göre, geçici durum arızasında salınımların tepe değere ulaştığı, ancak belirli bir süre sonra sönümlenmenin sağlandığı görülmektedir.

Ayrıca, Şekil 5.14 ve Şekil 5.21 arasında yer zaman alanı analizlerinde, geliştirilen FDBSNS algoritmasının başarılı performansını sayısal verilerle desteklemek amacıyla, dört farklı test senaryosunun toplamına göre elde edilen hata değerlerine göre çizdirilen çıkış sinyallerinin türevi alınarak, elde edilen değerler Çizelge 5.10'da sunulmuştur. Açık sapması bakımından hata sinyalinin türev değeri, karşılaştırılan algoritmalar arasında **2794,7118** değeri ile FDBSNS tarafından minimum değerde elde edilmiştir. FDBSNS algoritmasını sırasıyla 2804,0741 ve 2833,6657 değerleriyle sırasıyla SNS ve AGSK algoritmaları takip etmektedir. Açısal hız bakımından hata sinyalinin türev değeri dikkate alındığında **0,6091** değeri ile FDBSNS yine ilk sırada yer alırken; hemen ardından 0,6121 ve 0,6149 değerleriyle sırasıyla AGSK ve SNS algoritmaları yer almaktadır. Karşılaştırma elektriksel çıkış gücü sinyalinin türevi üzerinden yapıldığında ise 255,0332 değeriyle AGSK algoritması ilk sırada yer alırken, **255,4589** değeri ile FDBSNS ikinci sırada yer almakta ve 257.2008 değeri ile SNS algoritması üçüncü sırada bulunmaktadır. Buna göre, üç hata değeri açısından da elde edilen sıralamaların ortalama değerleri incelendiğinde, FDBSNS'nin bir önceki durumda olduğu gibi yine **1,3333** genel ortalama sıralama değeri ile, zaman alanı analizi yanıtları açısından karşılaştırılan 11 algoritma ve PSS'nin kullanılmadığı duruma kıyasla en iyi çözüm sunan algoritma olduğu bir kez daha görülmüştür. FDBSNS algoritmasının ardından en iyi performans gösteren algoritmalar ise sırasıyla 2 ve 2,6666 değerleriyle AGSK ve SNS olmuştur. PSS'nin

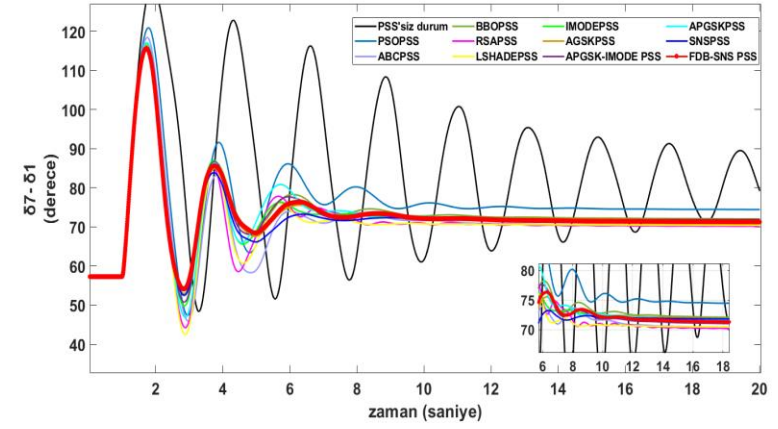
kullanılmadığı durum dışında, algoritmalar arasında rakiplerine kıyasla genel ortalama sıralama değeri açısından en etkisiz performans sunan algoritma ise yine PSO olmuştur.

Çizelge 5.10. Test sistemi 2 için zaman alanı analizinde minimum hata sinyalinin türev değerleri.

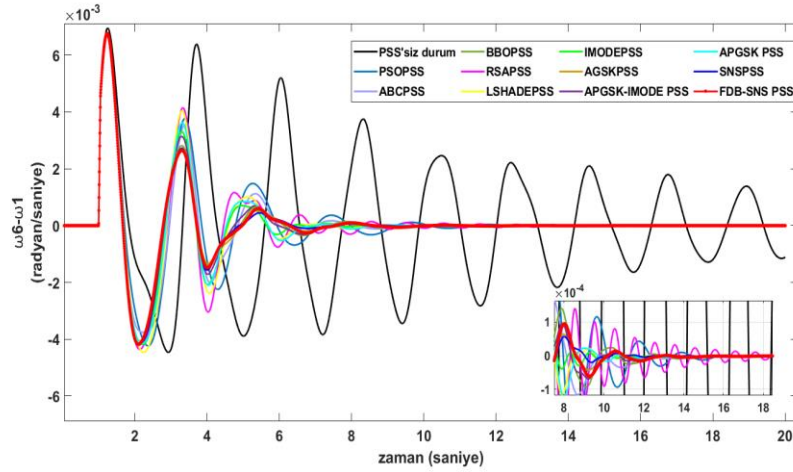
New England 10-Makine 39-Baralı Test Sistemi							
Algoritmalar	δ (Açı Sapması)	Sıra	ω (Açısal Hız)	Sıra	P_e (Elektiksel Çıkış Gücü)	Sıra	Ortalama Sıralama
FDBSNS	2794,7118	1	0,6091	1	255,4589	2	1,3333
AGSK	2833,6657	3	0,6121	2	255,0332	1	2
SNS	2804,0741	2	0,6149	3	257,2008	3	2,6666
BBO	2876,1072	4	0,6278	4	261,4495	4	4
APGSK-IMODE	3041,5151	5	0,6651	5	273,8249	5	5
IMODE	3158,7626	6	0,6891	6	283,9649	7	6,3333
ABC	3385,9639	8	0,7034	7	276,8023	6	7
APGSK	3296,9706	7	0,7222	8	295,5980	9	8
LSHADE	3397,5721	9	0,7229	9	288,8270	8	8,6666
RSA	3582,3254	10	0,7561	10	298,9106	10	10
PSO	3981,9218	11	0,8584	11	344,3829	11	11
PSS'siz	407235,0607	12	3,8050	12	11313,4365	12	12



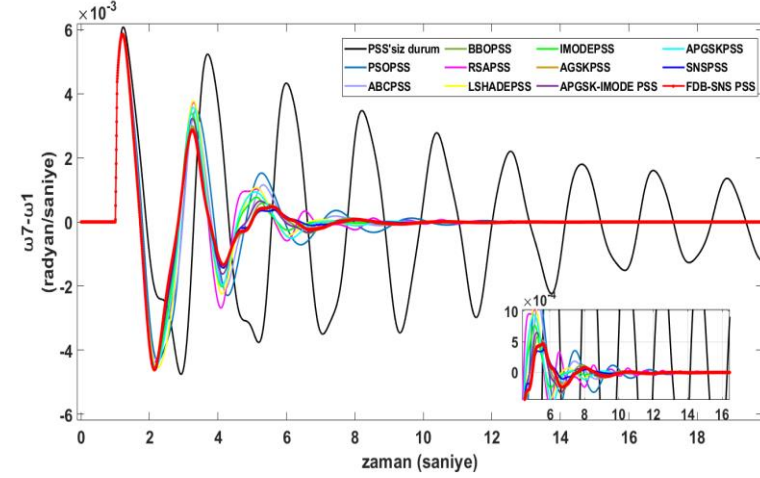
(a)



(b)

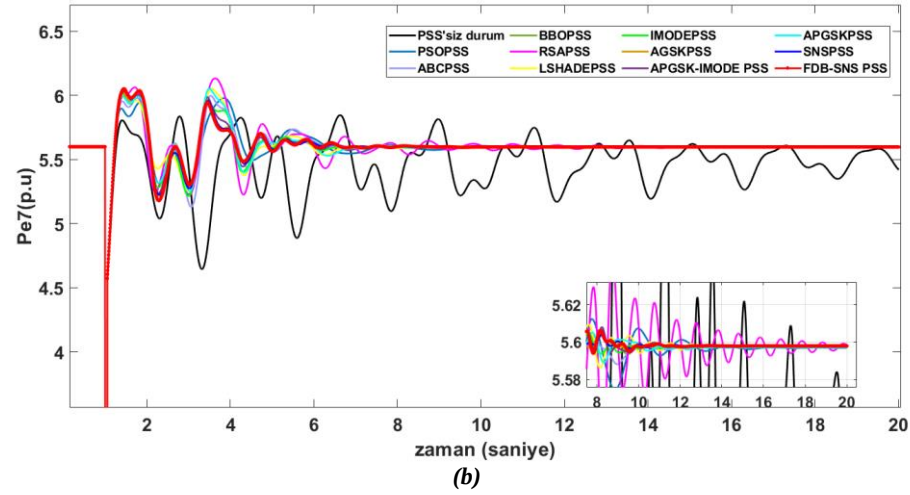
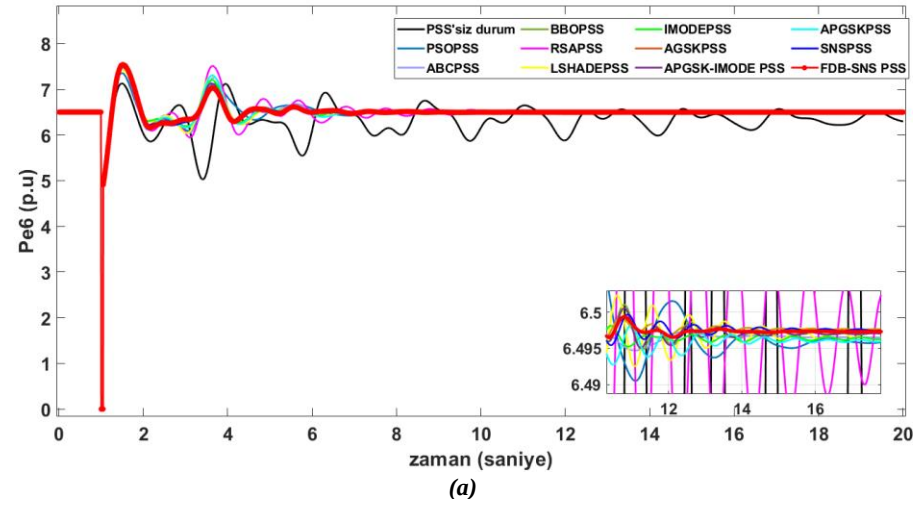


(c)

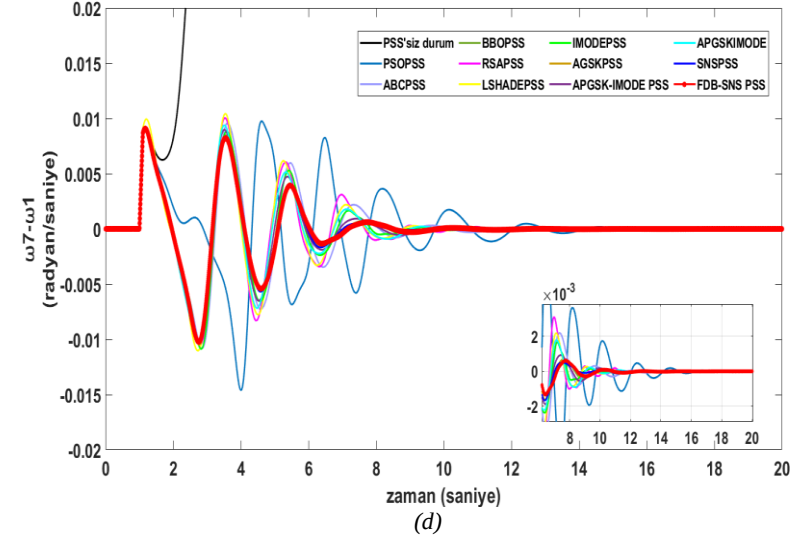
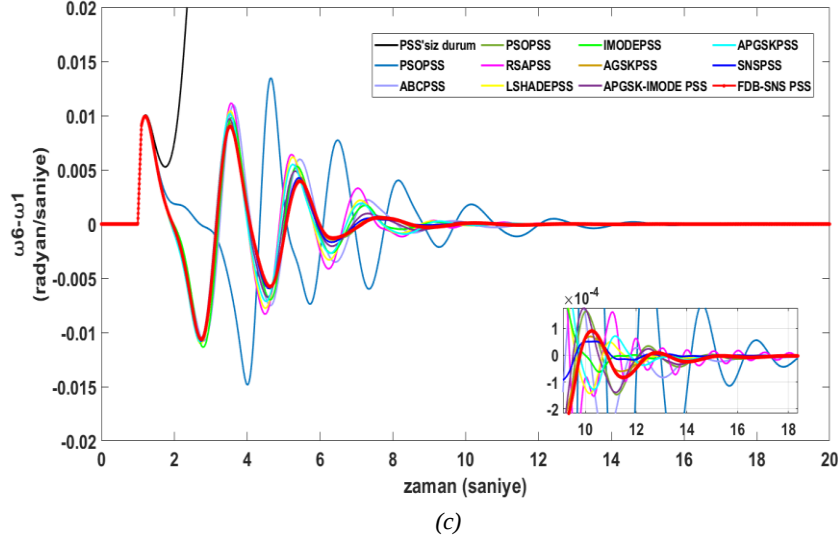
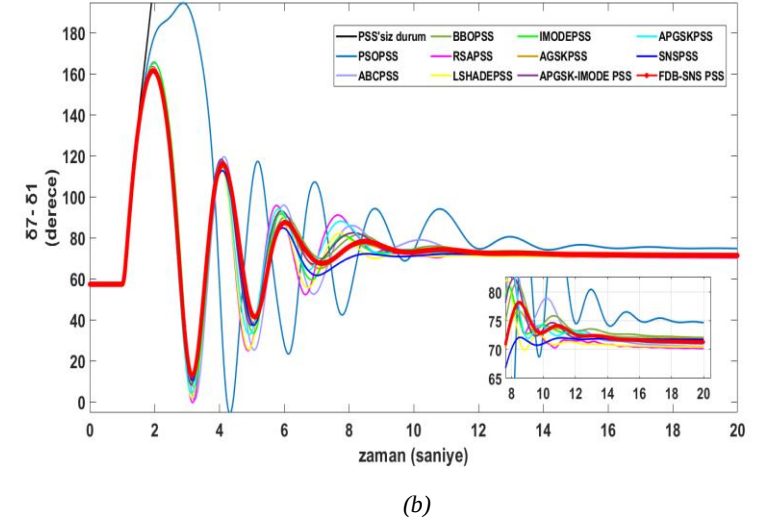
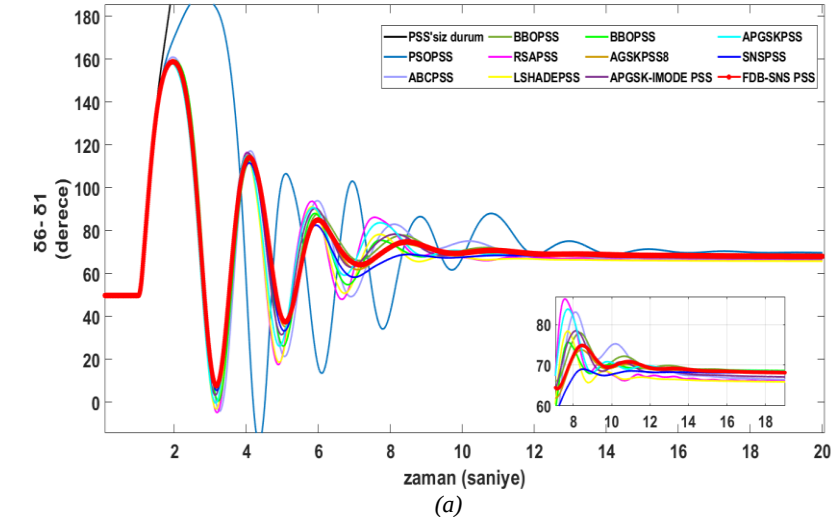


(d)

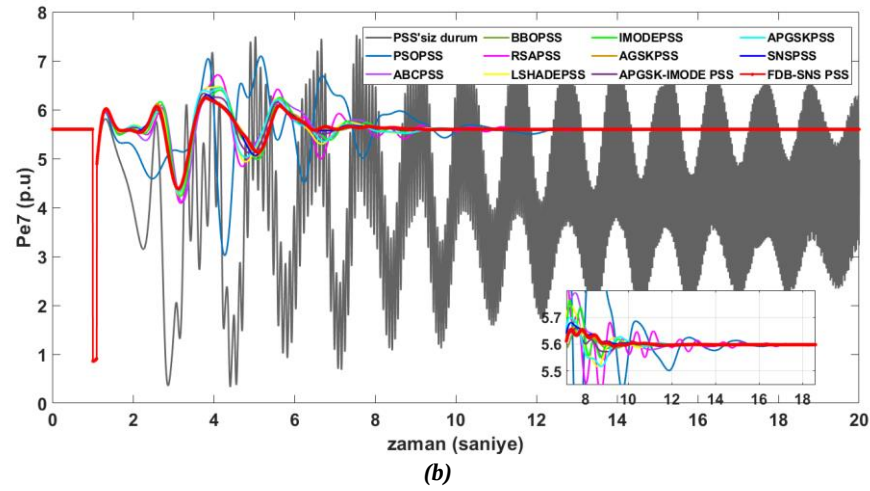
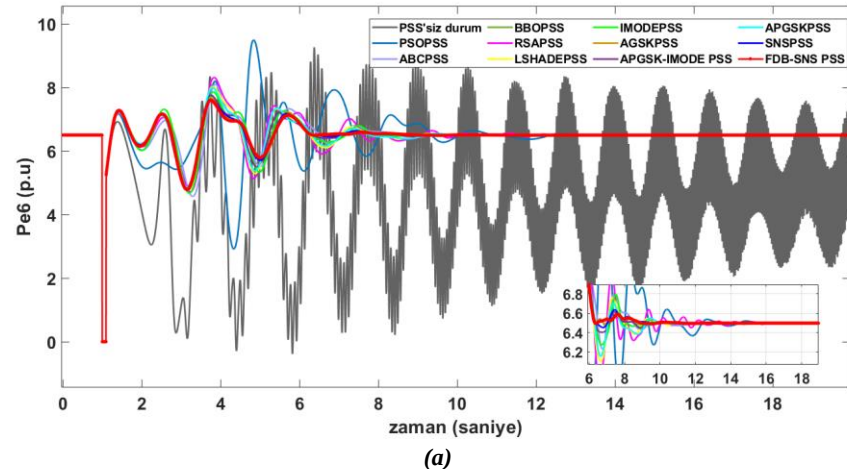
Şekil 5.14. Senaryo 1: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta_6 - \delta_1$, (b) $\delta_7 - \delta_1$, (c) $\omega_6 - \omega_1$ (d) $\omega_7 - \omega_1$.



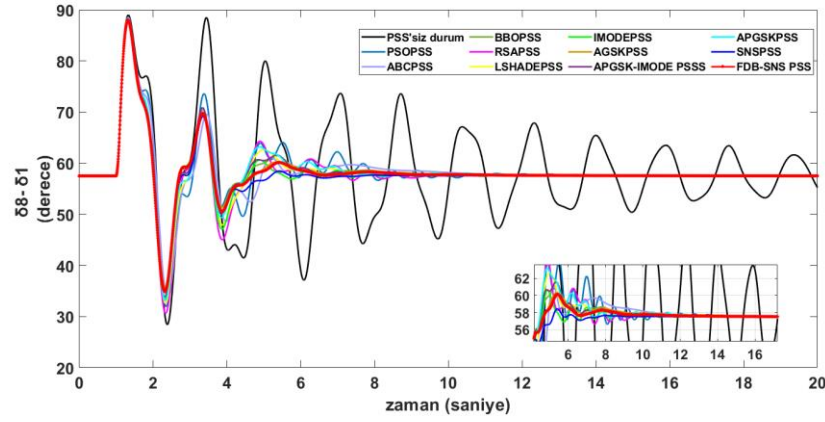
Şekil 5.15. Senaryo 1: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $Pe6$ ve (b) $Pe7$.



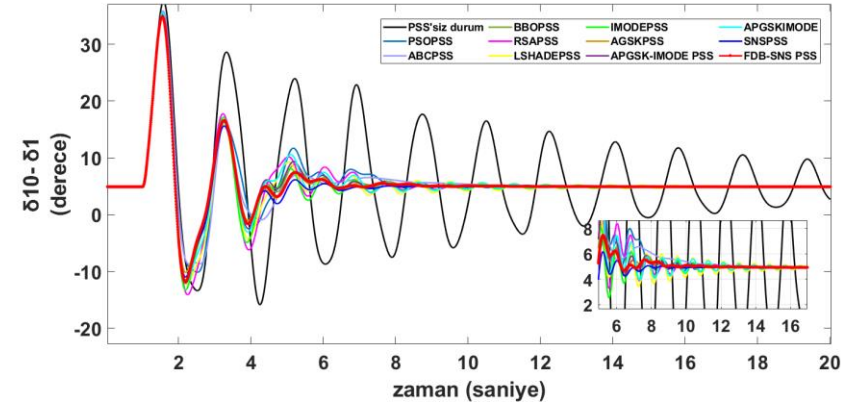
Şekil 5.16. Senaryo 2: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta_6 - \delta_1$, (b) $\delta_7 - \delta_1$, (c) $\omega_6 - \omega_1$ (d) $\omega_7 - \omega_1$.



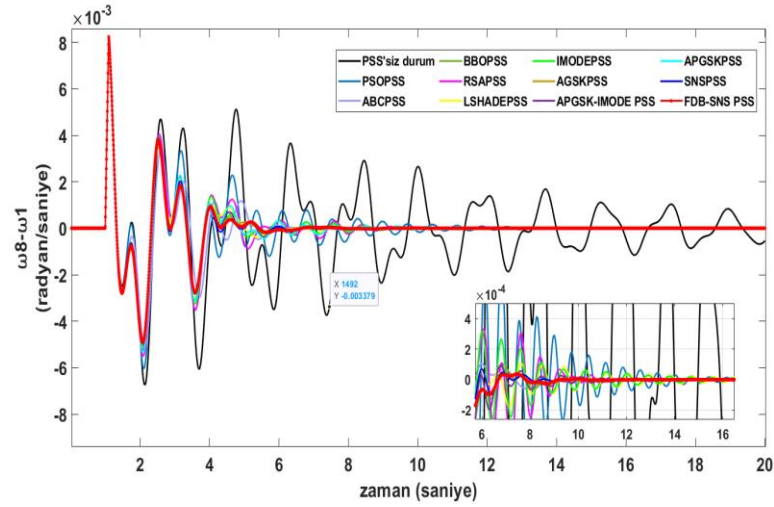
Şekil 5.17. Senaryo 2: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) Pe_6 ve (b) Pe_7 .



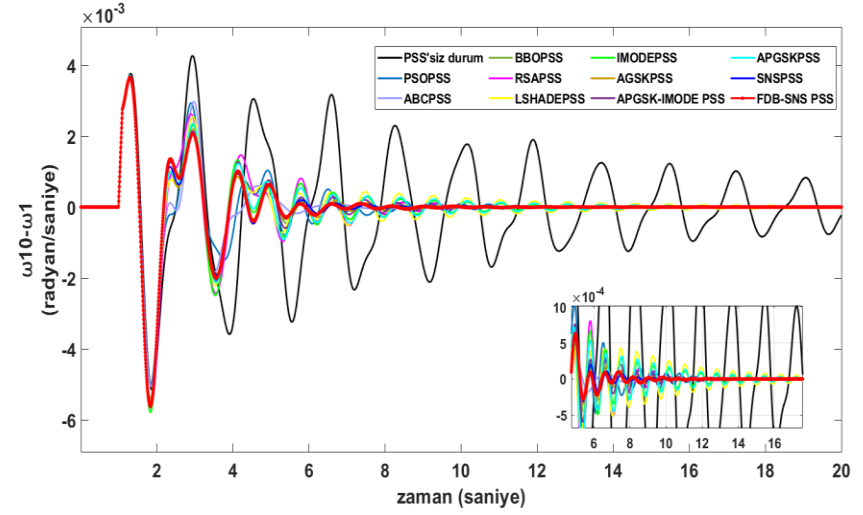
(a)



(b)

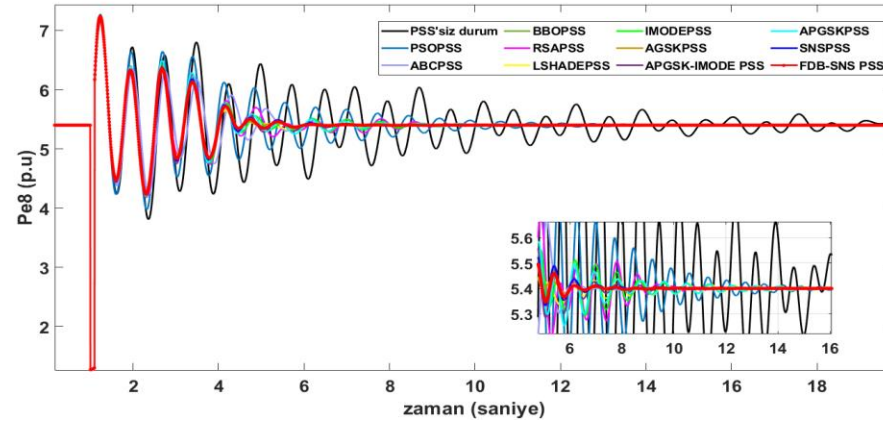


(c)

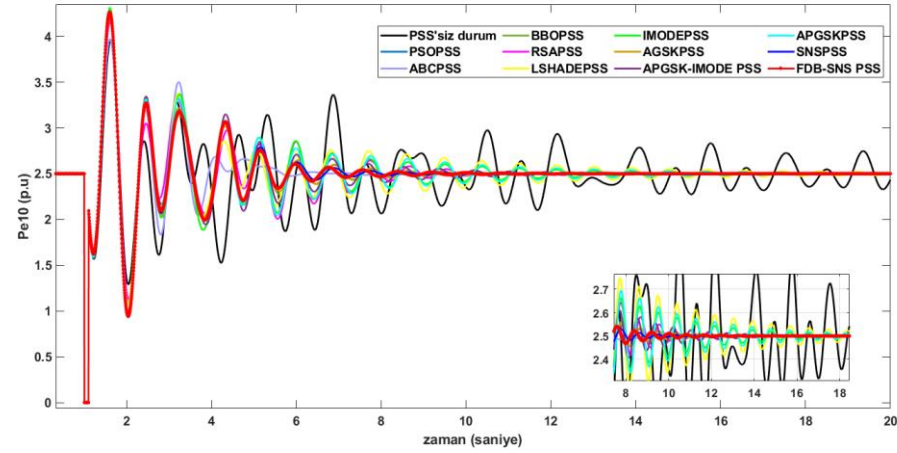


(d)

Şekil 5.18. Senaryo 3: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) $\delta 8- \delta 1$, (b) $\delta 10- \delta 1$, (c) $\omega 8- \omega 1$ (d) $\omega 10- \omega 1$.

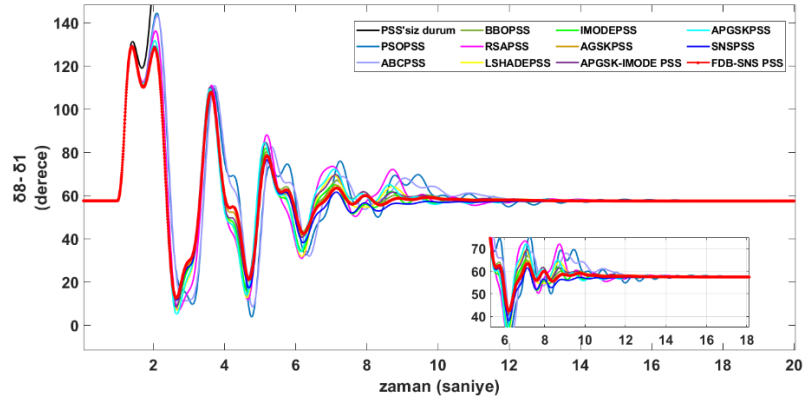


(a)

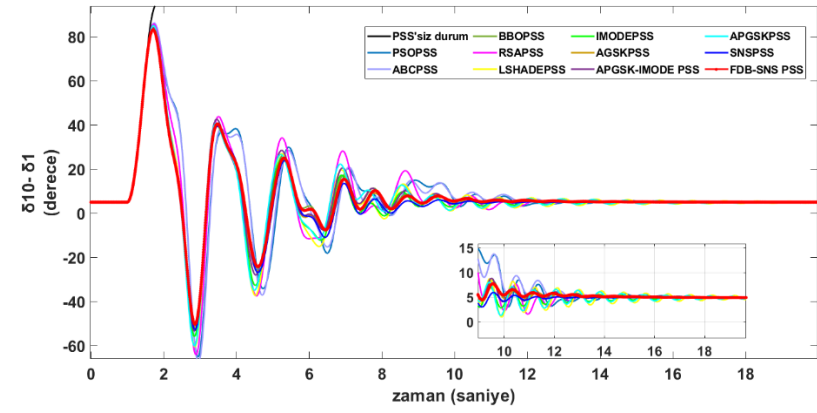


(b)

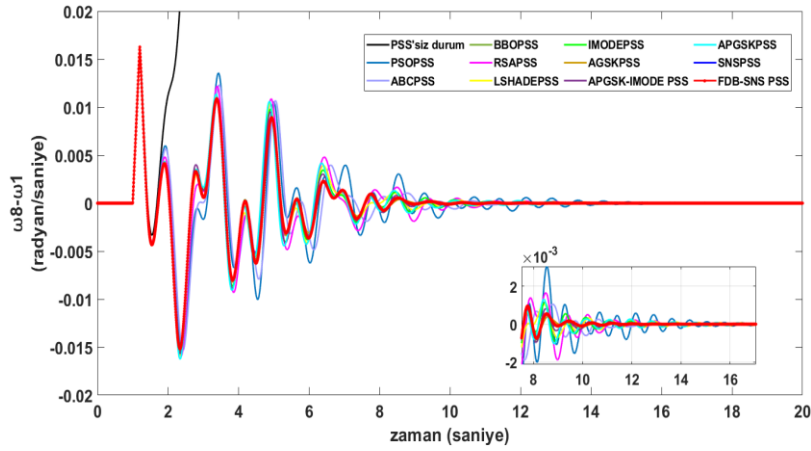
Şekil 5.19. Senaryo3: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) Pe_8 ve (b) Pe_{10} .



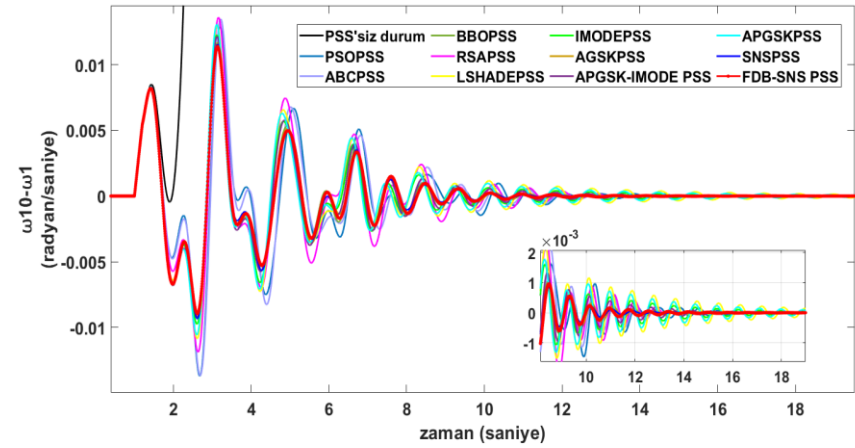
(a)



(b)

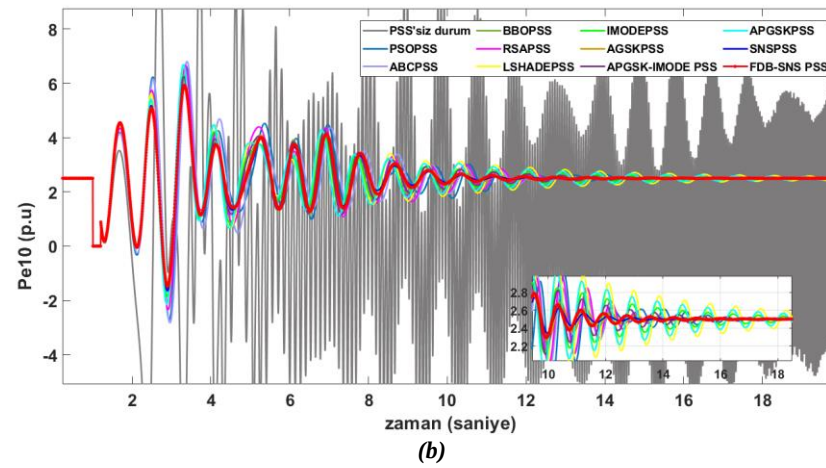
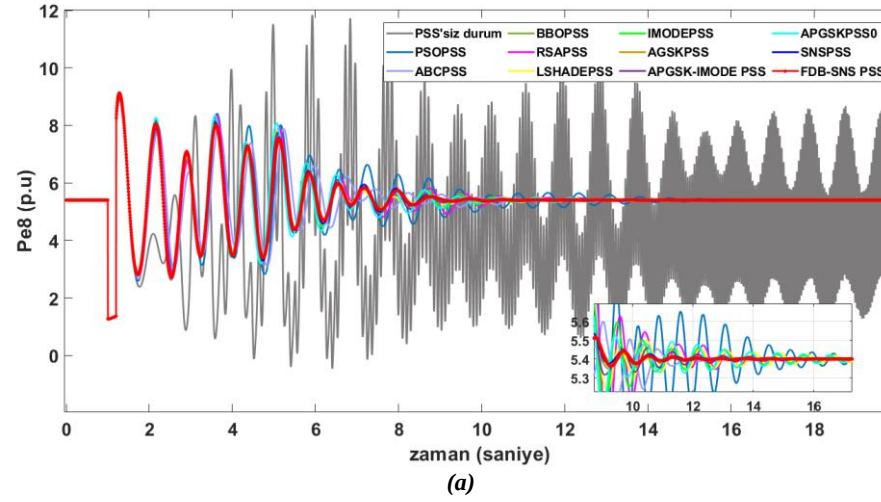


(c)



(d)

Şekil 5.20. Senaryo 4: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi zaman yanıtları (a) $\delta 8-\delta 1$, (b) $\delta 10-\delta 1$, (c) $\omega 8-\omega 1$ (d) $\omega 10-\omega 1$.



Şekil 5.21. Senaryo 4: New England 10-Makineli ve 39-Baralı test sistemi için zaman yanıtları (a) Pe_8 ve (b) Pe_{10} .

5.2.4.3. Performans İndeksleri ve Sağlamlık Analizi:

Çalışmada, önerilen PSS denetleyicisinin sağlamlığını belirtmek için bazı performans indeksleri kullanılmıştır [47]. Bu performans indekslerine dair eşitlikler Denklem (5.1)-(5.5) arasında verilmiştir:

$$PI_1 = 10^4 \times ISE = 10^4 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} (\omega_i - \omega_1)^2 dt \quad (5.1)$$

$$PI_2 = 10^2 \times IAE = 10^2 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} |\omega_i - \omega_1| dt \quad (5.2)$$

$$PI_3 = 10^2 \times ITAE = 10^2 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} t |\omega_i - \omega_1| dt \quad (5.3)$$

$$PI_4 = 10^4 \times ITSE = 10^4 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} t (\omega_i - \omega_1)^2 dt \quad (5.4)$$

$$PI_T = PI_1 + PI_2 + PI_3 + PI_4 \quad (5.5)$$

Denklem (5.1)-(5.5) arasında, WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sisteminde simülasyon süresi $t_{sim}=10$ s, ve New England 10-Makineli 39-Baralı test sisteminde $t_{sim}=20$ s olarak alınmıştır. PI_T ifadesi her bir arıza senaryosu için dört farklı performans indeksinin toplamını göstermektedir. Dört farklı performans indeksi ile dört farklı arıza senaryosu için kullanılan tüm algoritmaların sistem performanslarının sayısal sonuçları sırasıyla Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12’de yer almaktadır. Tez çalışmasında, 4 farklı arıza senaryosunun tamamı dikkate alınarak gerçekleştirilen optimizasyon işleminde, WSCC 3-Makineli 9 Baralı test sisteminde FDBSNS algoritması tüm senaryolar için hesaplanan performans indekslerine göre algoritmalar arasında problemin çözümünde genel olarak en iyi sonuç veren MSA algoritmasıdır. Senaryo 1 için hesaplanan performans indeksi sıralamasında ABC [47] algoritması **1,5017** değeriyle ilk sırada yer almasına rağmen, FDBSNS algoritması Senaryo 2’de **5,7071** değeriyle; Senaryo 3’te SNS ile birlikte **1,9172** değeriyle ve Senaryo 4’te ise **25,9995** değeriyle performans indeksi değerleri bakımından ilk sırada yer almıştır.

Özellikle daha büyük bir güç sistemi olan New England 10-Makineli 39-Baralı test sisteminde analizin gerçekleştirilmesiyle ve parametre sayısının daha fazla olmasıyla birlikte FDBSNS algoritmasının etkisi daha açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. FDBSNS algoritması, tüm senaryolar için hesaplanan performans indekslerine göre Senaryo 1 için, **18,6055**; Senaryo 2 için **80,0876**; Senaryo 3 için **18,2035** ve Senaryo 4 için **114,9711** değerleriyle karşılaştırılan algoritmalar arasında problemin çözümü açısından en iyi sonuç veren algoritmadır. Ayrıca dört farklı senaryo için performans indeksi değerlerinin tamamı toplandığında da FDBSNS algoritmasının Test Sistemi 1 ve Test Sistemi 2 için en iyi çözüm veren algoritma olduğu görülebilir.

Çizelge 5.11. Test sistemi 1’deki tüm algoritmalar için performans indeksi değerleri.

Senaryo	PI	PSO [47]	ABC [47]	BBO	RSA	LSHADE	IMODE	AGSK	APGSK- IMODE	APGSK	SNS	FDBSNS
S1	PI₁	0,2639	0,2632	0,2759	0,2792	0,2789	0,2780	0,2782	0,2780	0,2774	0,2782	0.2782
	PI₂	0,7719	0,7075	0,7441	0,7462	0,7516	0,7427	0,7441	0,7438	0,7529	0,7444	0.7442
	PI₃	0,6687	0,4396	0,4793	0,4651	0,4865	0,4712	0,4742	0,4739	0,4938	0,4748	0.4743
	PI₄	0,0981	0,0914	0,1017	0,1030	0,1040	0,1027	0,1030	0,1028	0,1034	0,1030	0.1030
	PI_T	1,8026	1,5017	1,6010	1,5935	1,6210	1,5946	1,5995	1,5985	1,6275	1,6004	1.5997
S2	PI₁	1,3941	1,3887	1,3792	1,3725	1,3777	1,3703	1,3685	1,3689	1,3805	1,3689	1.3689
	PI₂	2,0468	1,9186	1,9324	1,9256	1,9394	1,9190	1,9166	1,9171	1,9442	1,9175	1.9173
	PI₃	2,0739	1,5785	1,6178	1,5978	1,6349	1,5979	1,5981	1,5976	1,6463	1,5986	1.5980
	PI₄	0,8716	0,8437	0,8331	0,8275	0,8344	0,8244	0,8245	0,8238	0,8366	0,8230	0.8229
	PI_T	6,3864	5,7295	5,7625	5,7234	5,7864	5,7116	5,7077	5,7074	5,8076	5,7080	5,7071
S3	PI₁	0,4306	0,4247	0,4188	0,4157	0,4162	0,4138	0,4129	0,4129	0,4178	0,4128	0.4128
	PI₂	0,9999	0,8948	0,8624	0,8510	0,8533	0,8491	0,8480	0,8482	0,8582	0,8482	0.8481
	PI₃	0,8642	0,5616	0,5168	0,4977	0,5023	0,5010	0,5019	0,5017	0,5097	0,5017	0.5018
	PI₄	0,1810	0,1677	0,1587	0,1554	0,1562	0,1549	0,1545	0,1545	0,1578	0,1545	0.1545
	PI_T	2,4757	2,0488	1,9567	1,9198	1,9280	1,9188	1,9173	1,9173	1,9435	1,9172	1,9172
S4	PI₁	8,0539	7,9705	7,8945	7,8754	7,8670	7,8639	7,8632	7,8633	7,8866	7,8632	7.8631
	PI₂	5,3767	5,1613	5,1223	5,1520	5,1102	5,1091	5,1044	5,1048	5,1116	5,1048	5.1043
	PI₃	6,6603	5,8610	5,8029	5,9053	5,7807	5,7836	5,7714	5,7717	5,7740	5,7714	5.7699
	PI₄	7,6757	7,4584	7,3037	7,2800	7,2625	7,2621	7,2635	7,2625	7,2911	7,2623	7.2622
	PI_T	27,7666	26,4512	26,1234	26,2127	26,0204	26,0187	26,0025	26,0023	26,0633	26,0017	25,9995

Çizelge 5.12. Test sistemi 2’deki tüm algoritmalar için performans indeksi değerleri.

Senaryo	PI	PSO [48]	ABC [48]	BBO	RSA	LSHAD E	IMODE	AGSK	APGSK - IMODE	APGSK	SNS	FDBSNS
S1	PI ₁	1,8684	1,6709	1,3696	1,9226	1,8660	1,5394	1,3353	1,4724	1,6644	1,3356	1,3243
	PI ₂	8,0827	7,0851	5,9320	7,4939	7,1335	6,1831	5,6964	6,1283	6,6422	5,6758	5,6025
	PI ₃	19,984	14,9327	11,0338	15,5352	13,7905	10,9830	9,9714	11,2598	12,5176	9,5450	10,0443
	PI ₄	3,0337	2,4337	1,7446	2,9704	2,7467	2,0660	1,6533	1,9252	2,3207	1,6428	1,6344
	PI _T	32,9684	26,1224	20,0800	27,9221	25,5364	20,7715	18,6564	20,7857	23,1449	18,1992	18,6055
S2	PI ₁	12,3759	11,0746	7,8677	11,1744	10,3398	8,9751	7,9084	8,7111	9,4513	7,8753	7,5930
	PI ₂	26,3690	21,8872	16,4421	20,8837	19,7305	18,1056	16,4910	17,4960	18,4822	16,4196	16,0705
	PI ₃	118,249	68,2937	41,7201	59,3602	54,2704	48,9586	41,9143	45,2509	48,9914	41,4612	40,2649
	PI ₄	46,7168	27,9686	16,9369	27,7047	24,6466	20,8756	17,1450	19,2183	21,4139	17,0049	16,1592
	PI _T	203,711	129,224	82,9668	119,123	108,987	96,9149	83,4587	90,6763	98,3388	82,7610	80,0876
S3	PI ₁	2,0421	1,8603	1,8033	2,3016	2,0677	2,0237	1,7339	1,8980	1,9630	1,7990	1,7449
	PI ₂	7,5946	6,6856	6,3413	7,9135	7,1867	6,9792	6,1168	6,5560	6,9187	6,0437	6,2547
	PI ₃	15,0874	10,8872	9,4694	14,1899	12,0023	11,1426	8,7843	9,8929	11,3084	9,0607	8,4104
	PI ₄	2,4653	1,9912	1,8134	2,8363	2,3384	2,2314	1,7015	1,9749	2,1452	1,7014	1,7935
	PI _T	27,1894	21,4243	19,4274	27,2413	23,5951	22,3769	18,3365	20,3218	22,3353	18,6048	18,2035
S4	PI ₁	19,9125	19,6490	14,6382	20,7335	18,5782	16,4583	14,7114	16,0783	18,3264	14,6995	14,1538
	PI ₂	29,9787	28,9964	22,6931	28,7473	26,6650	24,7660	22,7647	24,1714	26,2474	22,7878	22,1704
	PI ₃	95,9221	87,1586	54,2314	78,8526	69,6111	62,4708	54,4033	59,5203	67,3200	54,6568	52,1763
	PI ₄	46,8345	45,0363	27,7983	47,6061	39,8104	33,3863	28,0429	31,8087	38,3961	28,1055	26,4706
	PI _T	192,647	180,840	119,361	175,939	154,664	137,081	119,922	131,578	150,289	120,249	114,971

Bu sonuçlara göre, FDBSNS tabanlı PSS kullanılarak tüm generatörlerde sistem yanıtının oturma süresi ve aşımı ile hız sapmalarının ($\Delta\omega$) azaltıldığı kanıtlanmıştır. Literatürdeki çoğu çalışmanın aksine, bu kapsamlı gerçek dünya mühendislik problemi, tekrar eden 30 bağımsız çalıştırma ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çeşitli istatistiksel analiz yöntemleri, kutu grafikleri ve çeşitli performans indeksleri kullanılarak analiz edilmiştir. Böylece, FDBSNS algoritmasının karşılaştırılan 10 rakip MSA algoritmasına kıyasla en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesinde ve geçici durum kararlılık analizinde en üstün performansa sahip olan ve en istikrarlı çözümler sunan algoritma olduğu doğrulanmıştır.

5.3. ÖNERİLEN ALGORİTMANIN TCSC TABANLI DENETLEYİCİLERİN EN UYGUN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ PROBLEMİ İÇİN TEST EDİLMESİ

Bu alt bölümde, FDBSNS algoritmasının TCSC tabanlı denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesindeki performansı, kapsamlı bir deneysel çalışma ile test edilmiştir. Denetleyici yapıları olarak LL ve PID kullanılmıştır. Bu alt bölüm dört alt deneysel çalışmadan oluşmaktadır: İlk iki deneysel çalışmada (Durum 1 ve Durum 2), geçici durum kararlılığı için TCSC tabanlı denetleyicilerin en uygun parametreleri, FDBSNS algoritması kullanılarak SMIB güç sisteminde [91]'de verilen amaç fonksiyonu için tek bir yüklenme koşulu ve arıza durumu dikkate alınarak belirlenmiştir. Üçüncü ve dördüncü deneysel çalışmada ise (Durum 3 ve Durum 4) , tıpkı bir önceki bölümde yer alan güç sistemi probleminde olduğu gibi, farklı senaryoların (yüklenme koşullarının) tamamı için ortak bir optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Arıza durumu ise Durum 1 ve Durum 2 ile aynıdır.

Bu alt bölümde, deneysel çalışmalar için belirlenen deneysel kriterler şu şekilde verilmektedir:

- Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm algoritmalar için (FDBSNS, DE [91] , PSO, ABC, AGSK, APGSK, APGSK-IMODE, BBO, IMODE, LSHADE, RSA, SNS) popülasyon büyüklüğü 30, iterasyon sayısı ise 200 olarak kabul edilmiştir. Ek olarak, kullanılan algoritmalarının tamamı ile her bir deneysel çalışma için 30 defa bağımsız çalıştırma için gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırılan algoritmaların tüm spesifik ve ayarlanabilir parametreleri, bu algoritmaların orijinal makalelerinde verildiği gibi kullanılmıştır [47]–[54], [91]. Önerilen FDBSNS yönteminin ayarlanabilir parametreleri ise referans olarak alınan orijinal SNS çalışmasındaki değerlerle aynıdır [44].
- [91]'de yer alan Matlab/Simulink modeli, tez çalışmasının bu bölümünde referans olarak alınmıştır. Sistem bileşenlerinin güç akışından hesaplanan başlangıç değerleri ve sistemin matematiksel modeli referans çalışmada mevcuttur. Ayrıca çalışmada kullanılan güç sisteminin generatör, iletim hatları uyartım ve TCSC parametreleri Çizelge 5.13'te verilmiştir.
- Deneysel sonuçların istatistiksel doğruluğunu göstermek ve FDBSNS algoritmasının başarılı performansını kanıtlamak için Friedman ve Wilcoxon [57], [127] istatistiksel test yöntemleri ve kutu grafikleri ile analizler gerçekleştirilmiştir.

- Belirlenen amaç fonksiyonuna göre en uygun parametre değerleri belirlenen TCSC tabanlı LL ve PID denetleyiciler kullanılarak zaman alanı simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sistem yanıtlarına göre değerlendirmeler yapılmıştır.

Çizelge 5.13. SMIB güç sistemi verileri [91].

Generatör										
M	D	X_d	X_q	X_d'	T_{d0}'	f	V_T	P_e	Q_e	δ_0
8 s	4,4	1,0	0,8	0,3	5,044	60 Hz	1,0 p.u	0,9 p.u	0,1513 p.u	51,796 °
Uyartım Sistemi (IEEE Tip-ST1)										
$K_A=10$						$T_A=0.01\text{ s}$				
İletim Hattı ve Transformatör										
$X=0,6$			$X_T=0,1$			$R_a=0$		$G+jB=0+j0$		
TCSC Denetleyicisi										
T_{TCSC}	X_{TCSC0}	α	X_c	X_p	k	$X_{TCSCmax}$	$X_{TCSCmin}$			
15 ms	0,3369	158°	$X_c=0,5X$	$X_p=0,25X_c$	2	0,8 X	0			

Tez çalışmasının bu bölümünde gerçekleştirilen çalışmalar dört aşamadan oluşmaktadır. Dört arıza durumu için de $t = 1$. saniyede generatör barasına uygulanan 3-fazlı ve 100 ms'lik kendisini temizleyen bir arıza durumunda; 2 numaralı paralel hattın devre dışı kaldığı, sistemde yer alan TCSC'nin kapasitif bir reaktans olarak modellendiği ve denetleyicinin kapasitif bölgede çalıştığı varsayılmıştır.

Durum 1: $t = 1$. saniyede generatör barasına uygulanan 3-fazlı ve 100 ms'lik kendisini temizleyen bir arıza durumunda nominal yüklenme koşulları senaryosu dikkate alınarak TCSC tabanlı LL denetleyicisinin parametreleri belirlenmiştir.

Durum 2: $t = 1$. saniyede generatör barasına uygulanan 3-fazlı ve 100 ms'lik kendisini temizleyen bir arıza durumunda nominal yüklenme koşulları senaryosu dikkate alınarak TCSC tabanlı PID denetleyicisinin parametreleri belirlenmiştir.

Durum 3: $t = 1$. saniyede generatör barasına uygulanan 3-fazlı ve 100 ms'lik kendisini temizleyen bir arıza durumunda hafif, nominal ve ağır yüklenme koşulları senaryosunun tamamı dikkate alınarak TCSC tabanlı LL denetleyicisinin parametreleri belirlenmiştir.

Durum 4: $t = 1$. saniyede generatör barasına uygulanan 3-fazlı ve 100 ms'lik kendisini temizleyen bir arıza durumu için hafif, nominal ve ağır yüklenme koşulları senaryosunun tamamı dikkate alınarak TCSC tabanlı PID denetleyicisinin parametreleri belirlenmiştir.

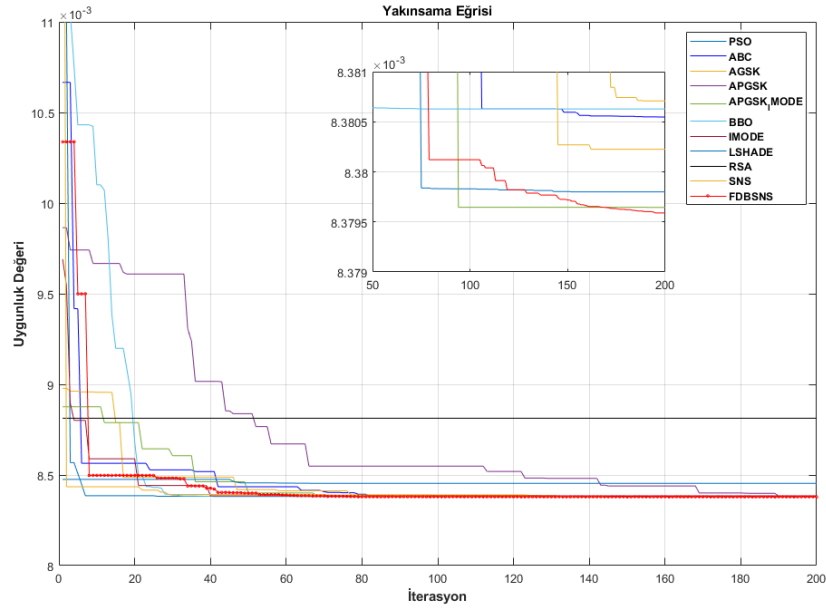
Buna göre, Çizelge 5.13'te yer alan sistem parametreleri aynı kalmak koşuluyla, yüklenme koşulları Çizelge 5.14'te verilmiştir.

Çizelge 5.14. Deneysel çalışmada kullanılan farklı yüklenme koşulları.

Yüklenme Koşulları	$P_e (p.u)$	$Q_e (p.u)$
Nominal yüklenme	0,9	0,1513
Hafif yüklenme	0,5	0,0457
Ağır yüklenme	1,1	0,2294

5.3.1. Durum 1: TCSC Tabanlı LL Denetleyicisi (Nominal Yüklenme Koşulu)

Şekil 4.2'de verilen, TCSC tabanlı LL denetleyici yapısında kontrol parametrelerinin en uygun değerleri Denklem (4.15)'te verilen ITAE amaç fonksiyonu dikkate alınarak belirlenmiştir. TCSC tabanlı LL denetleyicisinin parametrelerinin optimizasyonu $t = 1$ saniyede 3-fazlı ve 100 ms'lik kendisini temizleyen bir arıza durumu için gerçekleştirilmiştir. Arıza giderildikten sonra orijinal sistem yeniden yüklenmektedir. Bu aşamada yüklenme koşulu olarak nominal yük koşulları ($P_e=0,9$ ve $Q_e=0,1513$) dikkate alınmıştır [91]. Optimizasyon işlemi 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma koşulu için gerçekleştirilmiş olup, elde edilen en iyi uygunluk değerine karşılık gelen parametreler, denetleyici parametreleri olarak belirlenmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde, optimizasyon işlemine bağlı olarak FDBSNS ve rakip MSA algoritmalarıyla elde edilen K_{LL} denetleyici kazancı ve T_{LL1} ve T_{LL3} zaman sabiti parametrelerinin değerleri ve 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma sonucunda tez çalışmasında kullanılan MSA algoritmaları ile elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri Çizelge 5.15'te verilmiştir. Ayrıca Durum 1 için minimize edilen J amaç fonksiyonunun FDBSNS ve rakip algoritmalar ile edilen minimum uygunluk değerine yakınsama eğrileri Şekil 5.22'de verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının rakip algoritmalara kıyasla daha etkili bir performans sergilediği ve uygunluk değeri açısından minimum değer sunan algoritma olduğu görülmektedir.

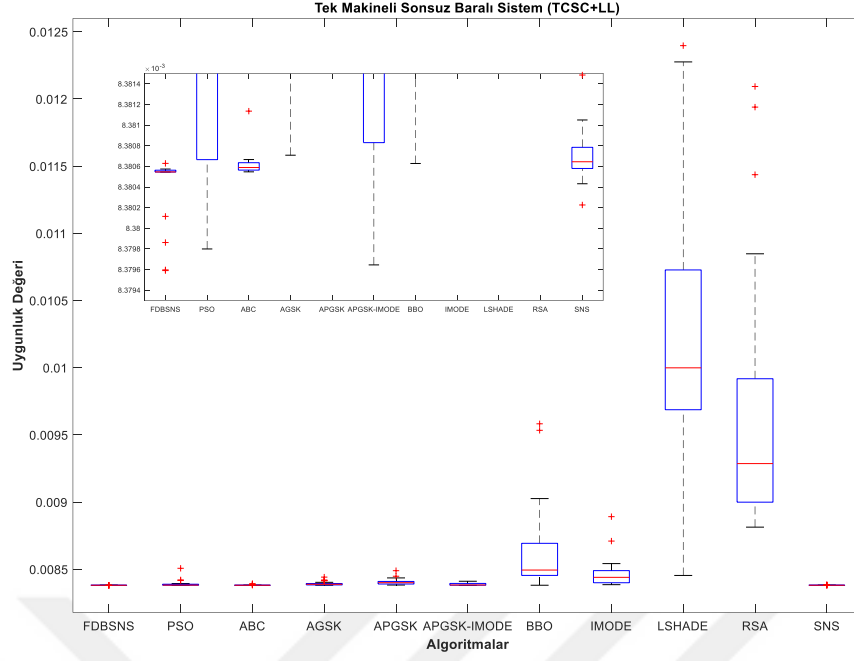


Şekil 5.22. Durum 1 için uygunluk değerinin yakınsama eğrisi.

Çizelge 5.15. Durum 1 için optimum parametrelere bağlı olarak hesaplanan uygunluk değerleri.

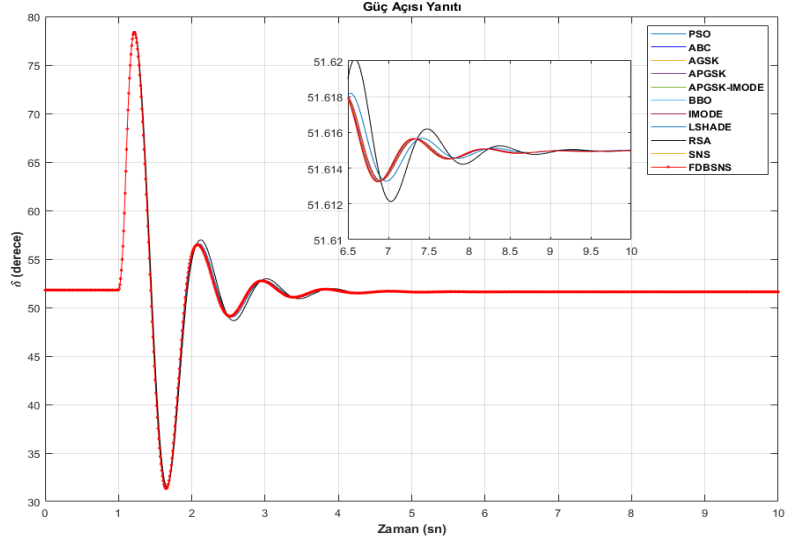
Algoritma	K_{LL}	T_{LL1}	T_{LL3}	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
DE [91]	68,288100	0,273600	0,011800	0,008435	-	-	-
PSO	69,012219	0,010000	0,273183	0,008380	0,008507	0,008390	$2,41 \times 10^{-5}$
ABC	67,078197	0,010000	0,283150	0,008381	0,008393	0,008382	$2,82 \times 10^{-6}$
AGSK	66,873389	0,010000	0,284235	0,008381	0,008441	0,008393	$1,44 \times 10^{-5}$
APGSK	68,221761	0,277084	0,010041	0,008382	0,008489	0,008405	$2,24 \times 10^{-5}$
APGSK_ IMODE	68,904871	0,273722	0,010000	0,008380	0,008410	0,008387	$8,98 \times 10^{-6}$
BBO	69,210378	0,272167	0,010031	0,008381	0,009582	0,008619	$2,97 \times 10^{-4}$
IMODE	66,049036	0,288392	0,010000	0,008385	0,008891	0,008465	$1,05 \times 10^{-4}$
LSHADE	59,730988	0,010000	0,321995	0,008453	0,012396	0,010194	$9,69 \times 10^{-4}$
RSA	59,118769	0,019015	0,310535	0,008813	0,012092	0,009670	$9,20 \times 10^{-4}$
SNS	69,237265	0,010002	0,272058	0,008380	0,008384	0,008381	$7,41 \times 10^{-7}$
FDBSNS	68,864588	0,010000	0,273924	0,008380	0,008381	0,008380	$2,77 \times 10^{-7}$

Çizelge 5.15'e göre, Durum 1 için minimum değerler açısından en iyi uygunluk değerinin **0,008380** değeriyle FDBSNS, SNS ve APGSK-IMODE algoritmaları tarafından elde edildiği görülmektedir. Bu üç algoritma minimum değerler açısından benzer sonuçlar vermesine rağmen 30 tekrar eden çalışma için elde edilen maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri de problemin çözümünde en kararlı olan algoritmanın belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Minimum uygunluk değeri açısından RSA ise 0,008813 değeriyle en kötü sonuç veren algoritma olmuştur. Durum 1'de yer alan test sisteminde DE [91] için referans olarak alınan çalışma verilen değişkenlere göre yalnızca minimum uygunluk değerleri hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla bu algoritma ile elde edilen değişken değerlerine göre hesaplanan uygunluk değerinin maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri bu tez çalışmasında yer almamaktadır. Maksimum uygunluk değerleri açısından karşılaştırma yapıldığında; FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK, AGSK, ABC ve PSO algoritmaları kullanılarak sırasıyla, **0,008381**; 0,008384; 0,012092; 0,012396; 0,008891; 0,009582; 0,008410; 0,008489; 0,008441; 0,008393 ve 0,008507 değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla amaç fonksiyonunun minimizasyon işlemi açısından elde edilen maksimum değerler karşılaştırıldığında FDBSNS algoritmasının **0.008381** değeriyle en etkili sonuç veren algoritma olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte FDBSNS'nin ardından etkili sonuçlar veren algoritmalar 0,008384 değeriyle SNS ve 0,008393 değeriyle ABC olmuştur. En kötü sonuç veren MSA algoritması ise 0,012396 değeriyle LSHADE olmuştur. Elde edilen sonuçlar, ortalama değerler açısından incelendiğinde FDBSNS algoritması **0,008380** değeriyle en iyi sonuç veren algoritma olurken, SNS 0,008381 değeriyle ikinci sırada ve APGSK-IMODE 0,008387 değeriyle üçüncü sıradadır. Standart sapma değerleri açısından karşılaştırma yapıldığında; FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK, AGSK, ABC ve PSO algoritmaları ile elde edilen değerlerin sırasıyla $2,77 \times 10^{-7}$; $7,41 \times 10^{-7}$; $9,20 \times 10^{-4}$; $9,69 \times 10^{-4}$; $1,05 \times 10^{-4}$; $2,97 \times 10^{-4}$; $8,98 \times 10^{-6}$; $2,24 \times 10^{-5}$; $1,44 \times 10^{-5}$; $2,82 \times 10^{-6}$ ve $2,41 \times 10^{-5}$ şeklinde olduğu görülmektedir. Standart sapma değerleri açısından verilen bu sonuçlar incelendiğinde, problemin çözümünde en istikrarlı sonuçların FDBSNS algoritması ile elde edildiği görülmektedir. Buna göre, Durum 1 için genel değerlendirme yapılacak olursa, FDBSNS algoritmasının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri açısından karşılaştırılan rakip MSA algoritmalarına üstünlük sağladığı açık bir şekilde görülmektedir. Bu karşılaştırmalara ek olarak 30 bağımsız çalıştırma için elde edilen değerlere göre çizdirilen kutu grafikleri de Şekil 5.23'te verilmiştir.

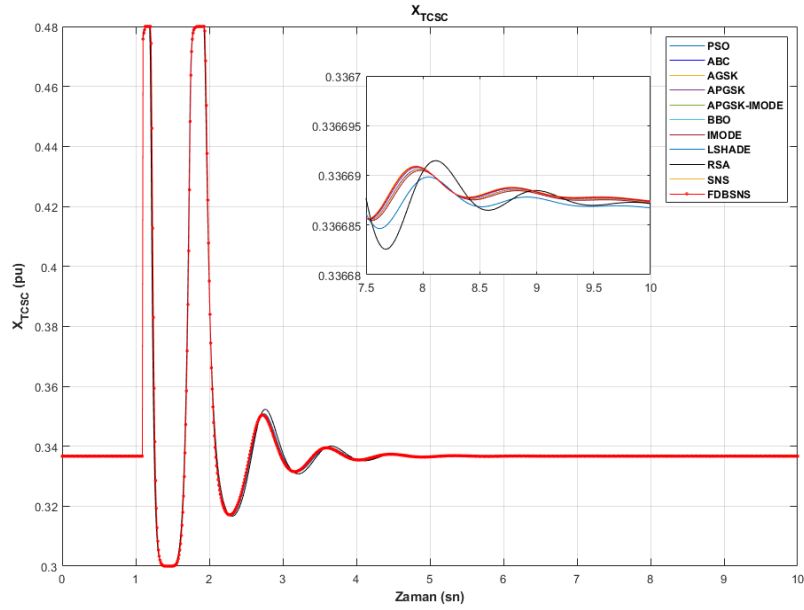


Şekil 5.23. Durum 1 için kutu grafikleri.

Buna göre, sıfır değişim aralığına en yakın sonuçların FDBSNS, SNS ve ABC algoritmaları tarafından elde edildiği görülmektedir. Bu algoritmalar ile 30 tekrar eden bağımsız çalışma için elde edilen çözümler yaklaşık olarak benzer değerlerde kümelenmiştir. Bununla birlikte, FDBSNS ve SNS minimum değerler açısından ABC'den biraz daha iyi performans sunmuştur. PSO, AGSK, APGSK, APGSK-IMODE gibi algoritmalar ise etkili sonuçlar vermelerine rağmen “+” işareti sembolünden de anlaşılacağı üzere, az miktarda da olsa aykırı değerler sunan algoritmalar olmuşlardır. IMODE, BBO, RSA ve LSHADE ise aykırı değerler sunan ve sıfır değişim aralığına en uzak sonuçlara sahip olan algoritmalar olmuştur. Önerilen yöntemin bu üstünlüklerine ek olarak, optimizasyon sonucunda belirlenen amaç fonksiyonuna göre elde edilen parametrelerin geçici durum kararlılığına olan etkisini inceleyebilmek amacıyla, [91]'de yer alan Simulink tabanlı modeller kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sistem yanıtları elde edilmiştir. TCSC tabanlı LL denetleyicisi ile SMIB bir güç sisteminde gerçekleştirilen zaman alanı analizinde, FDBSNS ile parametreleri belirlenen TCSC tabanlı LL denetleyicinin, Durum 1 için problemin çözümündeki etkisi ve başarılı performansı vurgulanmıştır. Buna göre, nominal yüklenme koşullarında ve belirlenen arıza durumu senaryosunda FDBSNS ve rakip algoritmalarla parametreleri belirlenen TCSC tabanlı LL denetleyicisinin geçici durum kararlılığına olan etkisi Şekil 5.24'te verilen güç açısı yanıtı (δ) ve TCSC reaktansı (X_{TCSC}) grafiklerinden incelenebilir:



(a)



(b)

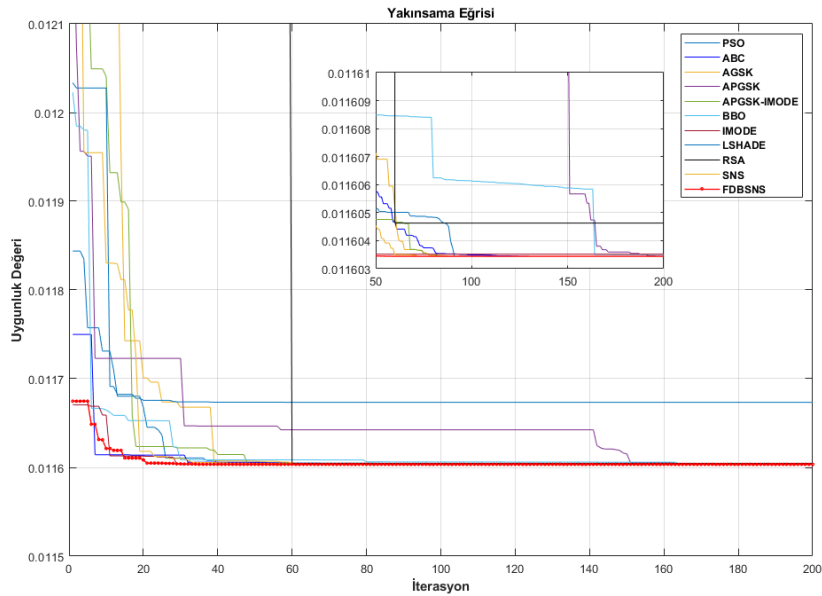
Şekil 5.24. Durum 1 için güç açısı (δ) yanıtı (a) ve X_{TCSC} grafiği (b).

Şekil 5.24'e göre, önerilen FDBSNS kontrollü TCSC tabanlı LL denetleyicisinin güç açısındaki salınımları diğer algoritmaların kullanıldığı denetleyicilere kıyasla daha güçlü bir şekilde bastırdığı özellikle ikinci ve üçüncü salınımlardan görülmektedir. Ayrıca FDBSNS kontrollü denetleyicinin sistemi hızlı bir şekilde kararlı hale getirerek düşük frekanslı salınımlar karşısında iyi sönümleme özelliği sağladığı da grafikten yapılabilecek çıkarımlar arasındadır. Bununla birlikte, beklenmedik bir arıza durumu için TCSC

tarafından sunulan reaktans yanıtı incelendiğinde, FDBSNS kontrollü denetleyici yapısında TCSC'nin reaktans yanıtının, diğer algoritmalarla en uygun parametreleri belirlenen denetleyici yapılarına kıyasla hızlı bir şekilde kararlılık sınırlarına girdiği görülmektedir.

5.3.2. Durum 2: TCSC Tabanlı PID Denetleyicisi (Nominal Yüklenme Koşulu)

Şekil 4.3'te yer alan TCSC tabanlı PID denetleyici yapısında kontrol parametrelerinin en uygun değerleri Denklem (4.15)'te verilen ITAE amaç fonksiyonu dikkate alınarak belirlenmiştir. Durum 1 ile benzer şekilde, TCSC tabanlı PID denetleyicisinin parametrelerinin optimizasyon işlemi de $t = 1$ saniyede 3-fazlı, 100 ms'lik kendisini temizleyen bir arıza durumu düşünülmüş ve yüklenme koşulu olarak ise yine nominal yük koşulları ($P_e=0,9$ ve $Q_e=0,1513$) dikkate alınmıştır [91]. 30 tekrar eden bağımsız çalışma sonucunda en iyi uygunluk değerine karşılık gelen K_P , K_i ve K_D parametreleri FDBSNS ve rakip algoritmalar tarafından belirlenmiştir. Bu parametrelere ve amaç fonksiyonuna bağlı olarak elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri Çizelge 5.16'da verilmiştir. Ayrıca Durum 2 için minimize edilen J amaç fonksiyonunun FDBSNS ve rakip algoritmalar ile edilen minimum uygunluk değerine yakınsama eğrileri Şekil 5.25'te verilmiştir.



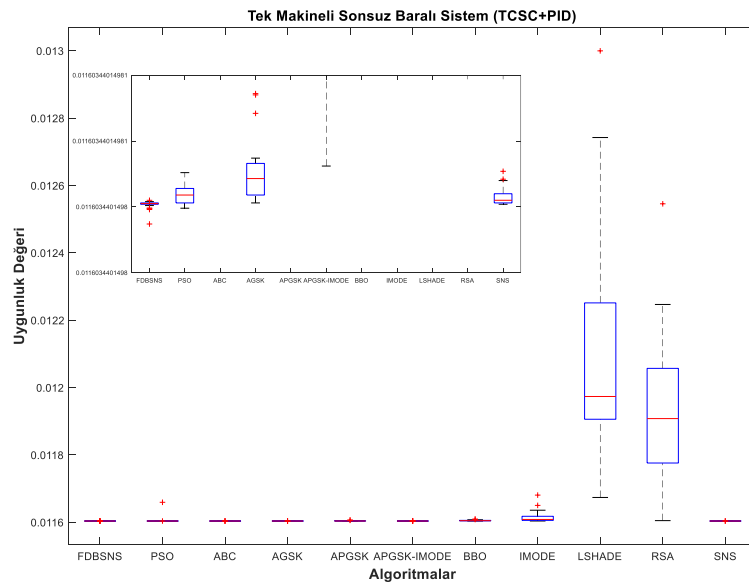
Şekil 5.25. Durum 2 için uygunluk değerinin yakınsama eğrisi.

Çizelge 5.16. Durum 2 için optimum parametrelere bağlı olarak hesaplanan uygunluk değerleri.

<i>Algoritma</i>	<i>Kp</i>	<i>Ki</i>	<i>Kd</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maksimum</i>	<i>Ortalama</i>	<i>Standart Sapma</i>
DE [91]	71,505200	0,329500	0,136200	0,012315093	-	-	-
PSO	73,742101	0,010000	0,010000	0,011603442	0,011659021	0,011605293	$1,015 \times 10^{-5}$
ABC	73,742101	0,010000	0,010000	0,011603442	0,011603443	0,011603442	$4,810 \times 10^{-10}$
AGSK	73,742101	0,010000	0,010000	0,011603445	0,011603445	0,011603445	$2,163 \times 10^{-15}$
APGSK	73,742068	0,010020	0,010000	0,011603445	0,011606549	0,011603798	$6,549 \times 10^{-7}$
APGSK-IMODE	73,742101	0,010000	0,010000	0,011603440	0,011604239	0,011603492	$1,598 \times 10^{-7}$
BBO	73,741699	0,010000	0,010000	0,011603501	0,011609353	0,011604844	$1,385 \times 10^{-6}$
IMODE	73,741599	0,010000	0,010000	0,011603516	0,011680376	0,011614390	$1,626 \times 10^{-5}$
LSHADE	73,288959	0,010000	0,010000	0,011673374	0,012999581	0,012084735	$3,125 \times 10^{-4}$
RSA	73,734304	0,010000	0,010000	0,011604626	0,012545389	0,011929705	$2,217 \times 10^{-4}$
SNS	73,742101	0,010000	0,010000	0,011603442	0,011603442	0,011603442	$6,386 \times 10^{-16}$
FDBSNS	73,742101	0,010000	0,010000	0,011603440	0,011603440	0,011603440	$3,154 \times 10^{-16}$

Şekil 5.25’te verilen yakınsama eğrileri incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının rakip algoritmalara kıyasla daha etkili bir performans sergilediği, minimum değerlere rakip algoritmalara kıyasla daha düşük iterasyon sayılarında yakınsadığı ve uygunluk değeri açısından karşılaştırılan algoritmalar arasında minimum değer sunan algoritma olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, Çizelge 5.16’da verilen sonuçlar doğrultusunda, Durum 2 için verilen minimum değerler açısından karşılaştırma yapıldığında **0,011603440** değeriyle FDBSNS ve APGSK-IMODE algoritmalarının problemin çözümünde en iyi sonuç veren algoritmalar olduğu görülmektedir. Bununla birlikte SNS ve ABC algoritmaları da minimum değerler bakımından en iyi değerlere yakın sonuçlar sunan algoritmalar olmuştur. Öte yandan, DE algoritması 0,012315093 değeriyle Durum 2 için diğer algoritmalara kıyasla daha kötü çözüm performansı sunan algoritma olmuştur. Durum 1’de yer alan test sisteminde DE [91] için referans olarak alınan çalışma verilen değişkenlere göre yalnızca minimum uygunluk değerleri hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla bu algoritma ile elde edilen değişken değerlerine ait maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri bu tez çalışmasında yer almamaktadır. Maksimum uygunluk değerleri karşılaştırıldığında; FDBSNS, SNS, RSA, LSHADE, IMODE, BBO, APGSK-IMODE, APGSK, AGSK, ABC ve PSO algoritmaları kullanılarak elde edilen sonuçlar

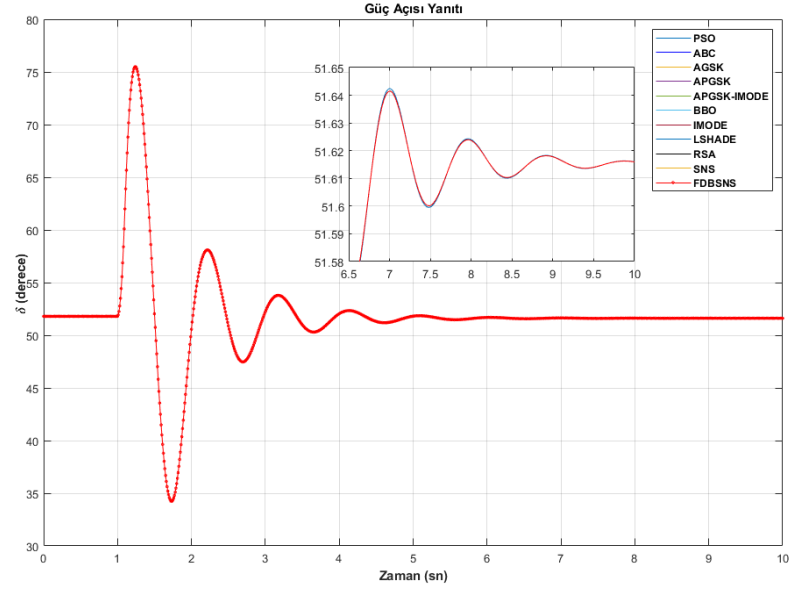
arasında FDBSNS algoritması yine **0,011603440** değeriyle karşılaştırılan algoritmalar arasında amaç fonksiyonunun minimizasyon işlemi açısından en iyi çözüm sunan algoritma olmuştur. Bununla birlikte, FDBSNS'nin ardından SNS ve ABC algoritmaları sırasıyla en etkili sonuçlar sunan diğer algoritmalar olmuştur. LSHADE algoritması ise **0,012999581** değeriyle diğer algoritmalarla kıyasla daha kötü performans sunan algoritma olmuştur. Ortalama değerler açısından karşılaştırma yapıldığında ise, **0,011603440** değeriyle FDBSNS algoritması yine en etkili sonuç veren algoritma olmuştur. SNS ve ABC algoritmaları elde etmiş oldukları 0,011603442 değeriyle FDBSNS'nin ardından en etkili sonuç veren ikinci ve üçüncü algoritmalarlardır. Ortalama değerler açısından en kötü sonuç veren algoritmalar ise sırasıyla 0,011929705 ve 0,012084735 değerleriyle RSA ve LSHADE algoritmaları olmuştur. Problemin çözümünde bir diğer etkili karşılaştırma yöntemi olan minimum standart sapma değeri açısından ise FDBSNS algoritması kullanılarak **$3,154 \times 10^{-16}$** değeri elde edilmiştir. Bu değer, FDBSNS algoritmasının problemin çözümünde 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma için diğer algoritmalarla kıyasla istikrarlı bir şekilde daha başarılı olduğunu göstermektedir. Problemin çözümünde, 30 çalıştırma sonucunda en istikrarsız sonuçları veren algoritmalar ise $2,217 \times 10^{-4}$ ve $3,125 \times 10^{-4}$ değerleriyle RSA ve LSHADE algoritmaları olmuştur. Buna göre, Durum 2 için genel değerlendirme yapılacak olursa; FDBSNS algoritması minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri açısından rakip MSA algoritmalarına kıyasla daha etkili bir performans ortaya koymuştur. Bu karşılaştırmalara ek olarak, 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma için çizdirilen kutu grafikleri de Şekil 5.26'da verilmiştir.



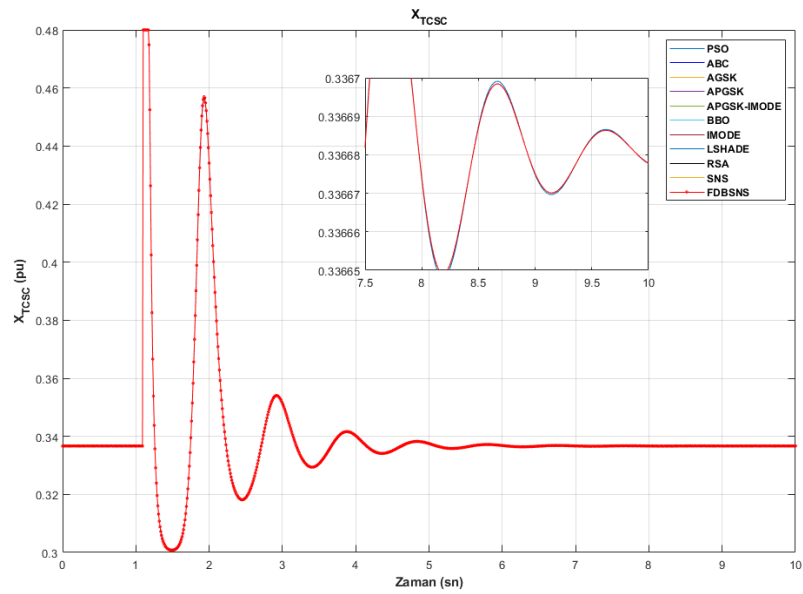
Şekil 5.26. Durum 2 için kutu grafikleri .

Buna göre, sıfır değişim aralığına en yakın sonuçların FDBSNS, SNS, ABC, AGSK, APGSK, APGSK-IMODE gibi algoritmalar tarafından elde edildiği görölmektedir. Öte yandan PSO, BBO ve IMODE algoritmaları tarafından da etkili sonuçlar sunulmasına rağmen, “+” işareti sembolünden de görüldüğü üzere, bu algoritmalar az da olsa aykırı değerler sunmuştur. RSA ve LSHADE algoritmaları ise geniş çözüm aralığından da anlaşılacağı üzere, Durum 2 için problemin çözümünde istenilen performansı sağlayamayan algoritmalarlardır. Durum 2’de gerçekleştirilen test çalışmasının bir sonraki aşamasında, belirlenen amaç fonksiyonuna göre en uygun değerleri elde edilen parametrelerin geçici durum kararlılığına etkisini görebilmek amacıyla, [91]’de yer alan Simulink tabanlı modeller kullanılarak zaman alanı simülasyonları gerçekleştirilmiştir. SMIB güç sisteminde gerçekleştirilen zaman alanı analizinde, FDBSNS ile parametreleri belirlenen TCSC tabanlı PID denetleyicinin, problemin çözümündeki etkisi incelenmiştir. Buna göre, nominal yüklenme koşullarında ve belirlenen arıza durumu senaryosunda FDBSNS ve rakip algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilen TCSC tabanlı PID denetleyicisinin parametrelerinin optimizasyonu işleminin geçici durum kararlılığına olan etkisi Şekil 5.27’de verilen güç açısı yanıtı (δ) ve TCSC reaktansı (X_{TCSC}) grafiklerinden incelenebilir. Şekil 5.27’ye göre, FDBSNS kontrollü TCSC tabanlı PID denetleyicisinin güç açısındaki salınımların bastırılmasında diğer algoritmalarla parametreleri belirlenen denetleyicilere kıyasla nispeten daha etkili performans sunduğu yakınlştırılmış görüntü aracılığıyla görölmektedir. Bununla birlikte, Şekil 5.27’ye göre, Durum 2 için X_{TCSC} değişimi incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının sönümleme konusunda pozitif anlamda etkisinin az da olsa daha fazla olduğu söylenebilir. Durum 1 ve Durum 2 için genel bir değerlendirme yapılacak olursa, FDBSNS kontrollü denetleyicileri yapıları, rakip MSA algoritmaları ile kontrol edilen denetleyici yapılarına kıyasla gerek istatistiksel analiz sonuçları gerekse zaman alanı simülasyonu sonuçları bakımından daha üstündür. Bununla birlikte, [91]’de yer alan sonuçlara benzer şekilde, TCSC tabanlı LL denetleyicisi yapısı, TCSC tabanlı PID denetleyicisine kıyasla salınımların sönümlenmesi açısından daha etkilidir. Dolayısıyla, FDBSNS ile kontrol edilen denetleyici yapılarından her ikisi için de zaman alanı simülasyonları açısından, FDBSNS diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında daha etkili performans göstermiş olmasına rağmen, önerilen algoritmanın performans artışıdaki etkisi TCSC tabanlı LL denetleyici yapısında daha belirgin bir şekilde görölmektedir. Öte yandan optimizasyon işleminde; parametre sayısı, popölasyon sayısı, değişken sınırları gibi özellikler her iki denetleyici yapısı için de aynı olmasına rağmen, FDBSNS kontrollü TCSC tabanlı LL

denetleyici yapısının FDBSNS kontrollü TCSC tabanlı PID yapısına kıyasla daha etkili sonuçlar verdiği minimum uygunluk değerleri, istatistiksel analizler ve zaman alanı simülasyonları ile elde edilen sonuçlardan görülmektedir. Ayrıca, FDBSNS kontrollü denetleyicinin sistemi nispeten hızlı bir şekilde kararlı hale getirerek düşük frekanslı salınımlar karşısında etkili sönümleme özelliği sağladığı da grafikten yapılabilecek çıkarımlar arasındadır.



(a)

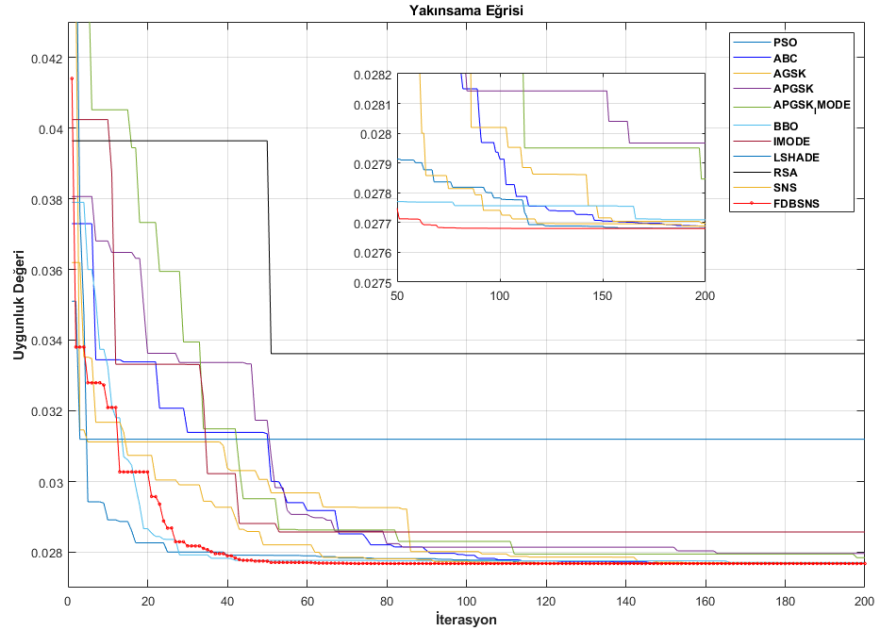


(b)

Şekil 5.27. Durum 2 için güç açısı (δ) yanıtı (a) ve X_{TCSC} grafiği (b).

5.3.3. Durum 3: TCSC Tabanlı LL Denetleyicisi (Farklı Yükleme Koşulları)

Deneysel çalışmanın bu aşamasında, TCSC tabanlı LL denetleyicisinin parametrelerinin belirlenmesi işlemi Denklem (4.15)'te verilen ITAE amaç fonksiyonu dikkate alınarak, $t = 1$ saniyede 3-fazlı ve 100 ms'lik kendisini temizleyen bir arıza durumu için, Durum 1 ve Durum 2'den farklı olarak hafif, nominal ve ağır yükleme koşulları senaryosunun tamamının dikkate alındığı bir optimizasyon sürecine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Yani bir başka ifadeyle, Durum 1'den farklı olarak Denklem (4.15)'te yer alan NS ifadesi (senaryo sayısı) üç olarak düşünülmüştür. Bu amaç fonksiyonu yaklaşımında asıl hedeflenen durum, parametrelerin en uygun değerleri belirlenirken farklı yükleme senaryolarının tamamı için etkili sonuçlar verebilecek parametre değerlerinin belirlenmesini sağlamaktır. Bu aşamada, yükleme koşulu olarak Çizelge 5.14'te verilen yük koşulları dikkate alınmıştır. Ayrıca, Durum 1'den farklı olarak bu aşamada en uygun değerleri belirlenmesi hedeflenen LL denetleyicisi parametre sayısı K_{LL} , T_{LL1} , T_{LL2} , T_{LL3} ve T_{LL4} olmak üzere beş adettir. K_{LL} ve $T_{LL1}-T_{LL4}$ değişkenleri sırasıyla [20-100] ve [0,01-0,5] sınır aralığında belirlenmiştir. Optimizasyon işlemi, FDBSNS ve 10 farklı rakip MSA algoritması kullanılarak 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma koşulu için gerçekleştirilmiş ve en iyi uygunluk değerine karşılık gelen parametreler denetleyici parametreleri olarak elde edilmiştir. Buna göre, elde edilen K_{LL} , T_{LL1} , T_{LL2} , T_{LL3} ve T_{LL4} denetleyici parametreleri ve 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma sonucunda elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri Çizelge 5.17'de verilmiştir. Ayrıca Durum 1 için minimize edilen J amaç fonksiyonunun FDBSNS ve rakip algoritmalar ile edilen minimum uygunluk değerine yakınsama eğrileri Şekil 5.22'de verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının rakip algoritmalara kıyasla daha etkili bir performans sergilediği, daha düşük iterasyon sayıları sonunda minimum değerlere yakınsadığı ve uygunluk değeri açısından ise minimum değer sunan algoritma olduğu görülmektedir.



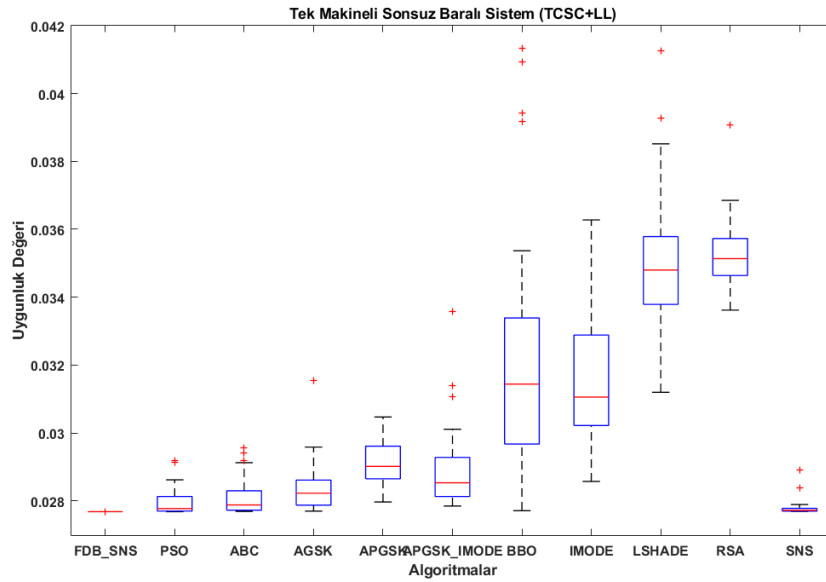
Şekil 5.28. Durum 3 için uygunluk değeri yakınsama eğrisi.

Çizelge 5.17. Durum 3 için optimum parametrelere bağlı olarak hesaplanan uygunluk değerleri.

Algoritma	K_{LL}	T_{LL1}	T_{LL2}	T_{LL3}	T_{LL4}	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
PSO	45,88272	0,50000	0,12814	0,01095	0,13087	0,027686	0,029185	0,027984	$4,1960 \times 10^{-4}$
ABC	46,45716	0,49984	0,13191	0,01147	0,12996	0,027688	0,029564	0,028103	$5,4124 \times 10^{-4}$
AGSK	45,35032	0,49922	0,12780	0,01008	0,12810	0,027698	0,031548	0,028391	$7,7016 \times 10^{-4}$
APGSK	48,05002	0,49877	0,11455	0,01048	0,15639	0,027967	0,030470	0,029098	$6,9827 \times 10^{-4}$
APGSK-IMODE	44,46923	0,01031	0,12568	0,49034	0,12324	0,027846	0,033573	0,028936	$1,2370 \times 10^{-3}$
BBO	44,68888	0,50000	0,13186	0,01000	0,12125	0,027710	0,041339	0,032386	$3,6860 \times 10^{-3}$
IMODE	52,49391	0,01293	0,12165	0,40152	0,12870	0,028572	0,036276	0,031614	$1,9983 \times 10^{-3}$
LSHADE	45,07949	0,02865	0,17007	0,46052	0,10558	0,031197	0,041248	0,035059	$2,1307 \times 10^{-3}$
RSA	100,0000	0,02131	0,01000	0,01919	0,09400	0,033618	0,039062	0,035205	$1,0955 \times 10^{-3}$
SNS	46,45204	0,01155	0,12953	0,50000	0,13243	0,027688	0,028901	0,027791	$2,4471 \times 10^{-4}$
FDBSNS	45,76699	0,01057	0,12914	0,50000	0,12914	0,027680	0,027680	0,027680	$1,3868 \times 10^{-10}$

Çizelge 5.17’de verilen sonuçlar incelenerek Durum 3 için elde edilen minimum değerler açısından karşılaştırma yapıldığında, FDBSNS algoritmasının **0,027680** değeri ile etkili çözüm performansı sunan algoritma olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, PSO ve SNS algoritmaları da sırasıyla sunmuş oldukları 0,027686 ve 0,027688 değerleri ile FDBSNS algoritmasının ardından Durum 3 için minimum değer sunan ikinci ve üçüncü algoritmalarlardır. Karşılaştırılan algoritmalar arasında, RSA ise 0,033618 değeri ile diğer algoritmalara kıyasla algoritmalar arasında en kötü performans sunan yöntem olmuştur. Karşılaştırma maksimum değerler üzerinden yapılacak olursa, FDBSNS algoritmasının problemin çözümünde yine yaklaşık olarak **0,027680** değeriyle en iyi çözüm değeri sunan algoritma olduğu söylenebilir. Öte yandan sıralamada FDBSNS’yi takip eden algoritmalar sırasıyla 0,028901 ve 0,029185 değerleriyle SNS ve PSO algoritmaları olmuştur. Maksimum değerler arasında en kötü çözüm sunan algoritma ise 0,041339 değeri ile BBO olmuştur. 30 tekrar eden çalıştırma sonunda, algoritmaların problemin çözümünde sunmuş oldukları ortalama değerler açısından en iyi çözüm veren algoritma, minimum ve maksimum değerlerde yapılan karşılaştırmalarda da olduğu gibi yine **0,027680** değeri ile FDBSNS olmuştur. Ortalama değerler açısından da FDBSNS’yi sıralamada takip eden algoritmalar sırasıyla 0,027791 ve 0,027984 değeriyle yine SNS ve PSO olmuştur. Ortalama değerler açısından en kötü çözüm sunan iki algoritma ise sırasıyla 0,035059 ve 0,035205 değeriyle LSHADE ve RSA olmuştur. Algoritmaların 30 tekrar eden çalıştırma sonunda problemin çözümünde istikrarlı sonuçlar sunulmasına dair önemli bir gösterge olan standart sapma değeri açısından karşılaştırma yapıldığında ise FDBSNS algoritmasının diğer algoritmalarından farkı önemli ölçüde bu aşamada görülmektedir. Problemin çözümünde, FDBSNS tarafından elde edilen çözüm değerlerinin standart sapma değeri $1,3868 \times 10^{-10}$ iken, en yakın rakibi SNS algoritması tarafından elde edilen bu değer $2,4471 \times 10^{-4}$ olmuştur. Üçüncü sırada ise $4,1960 \times 10^{-4}$ değeri ile PSO yer almıştır. FDBSNS’nin en yakın rakipleri ile arasındaki en belirgin fark standart sapma değerleri açısından ortaya çıkmıştır. Bu durum, FDBSNS algoritmasının problemin çözümündeki istikrarlı başarısını açık bir şekilde ortaya koymaktadır ve aynı zamanda FDBSNS’nin her çalıştırmada etkili çözümler sunan bir algoritma olduğuna dair geçerli bir ölçüttür. BBO ve LSHADE algoritmaları ise 30 tekrar eden bağımsız çalıştırmanın sonucunda sırasıyla $3,6860 \times 10^{-3}$ ve $2,1307 \times 10^{-3}$ standart sapma değerleriyle problemin çözümünde en istikrarsız sonuçlar sunan algortimalar olarak görülmektedir. Buna göre, Durum 3 için genel bir değerlendirme yapılacak olursa; Çizelge 5.17’de yer alan sonuçlar detaylı olarak değerlendirildiğinde, FDBSNS algoritmasının minimum,

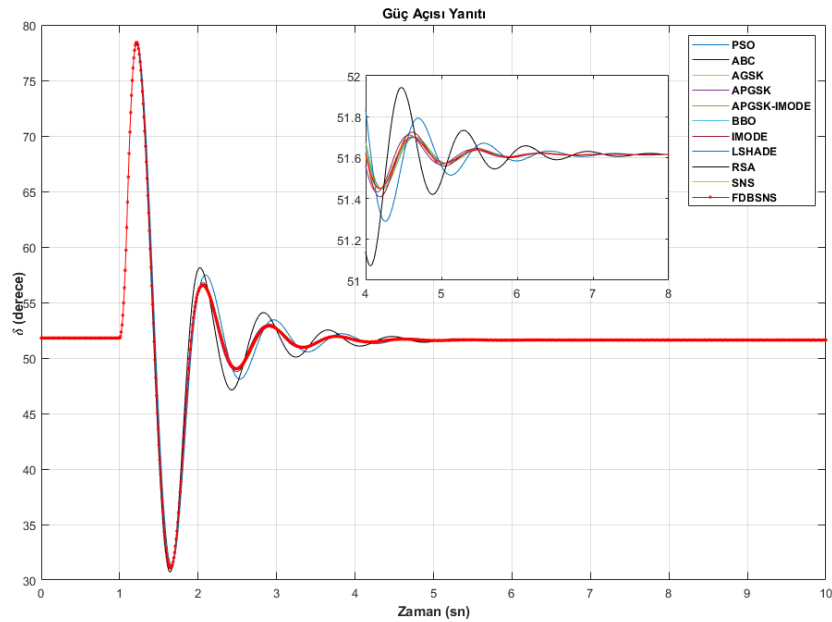
maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri açısından rakip MSA algoritmalarına kıyasla daha etkili bir performans ortaya koyduğu görülmektedir. Öte yandan Durum 1’e kıyasla Durum 3’te, elde edilen çözümler açısından FDBSNS algoritması ile diğer MSA algoritmaları arasındaki nümerik fark daha belirgin şekilde ortaya çıkmıştır. Bu farkın ortaya çıkmasında değişken sayısının beş adete yükselmesinin ve farklı yüklenme durumları için ortak bir optimizasyon sürecinin gerçekleştirilmesinin etkili olduğu düşünülmektedir. Bu karşılaştırmalara ek olarak, 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma için çizdirilen kutu grafikleri de Şekil 5.29’da verilmiştir.



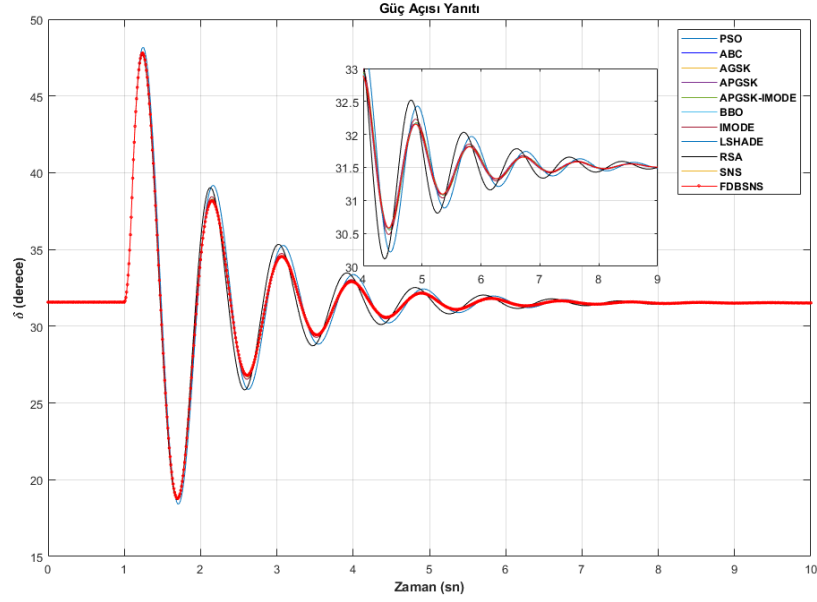
Şekil 5.29. Durum 3 için kutu grafikleri .

Şekil 5.29’a göre, Durum 3 için sıfır değişim aralığına en yakın sonuçlar sunan algoritmanın FDBSNS olduğu açık bir şekilde görülmektedir. 30 tekrar eden bağımsız çalışma için FDBSNS ile elde edilen çözümler yaklaşık olarak benzer değerlerde kümelenmiştir. FDBSNS algoritmasının ardından sıfır değişim aralığına en yakın sonuçlar sunan algoritmaların ise SNS ve PSO olduğu görülmektedir. Öte yandan, en geniş çözüm aralığına sahip olan, yani en istikrarsız çözümler sunan algoritmaların ise BBO, IMODE ve LSHADE olduğu kutu grafiklerinden görülmektedir. Özellikle, BBO ve LSHADE algoritmalarının ‘+’ sembolünden de görüldüğü üzere diğer algoritmalara kıyasla daha yüksek değerlerde aykırı değerler sundukları görülmektedir. Buna ek olarak, kutucukların ortasındaki kırmızı kesikli çizgiden de anlaşılacağı üzere medyan değeri açısından en kötü çözümler veren algoritma ise RSA olmuştur. Genel olarak kutu grafiklerinden FDBSNS algoritması ile elde edilen uygunluk değerinin minimum,

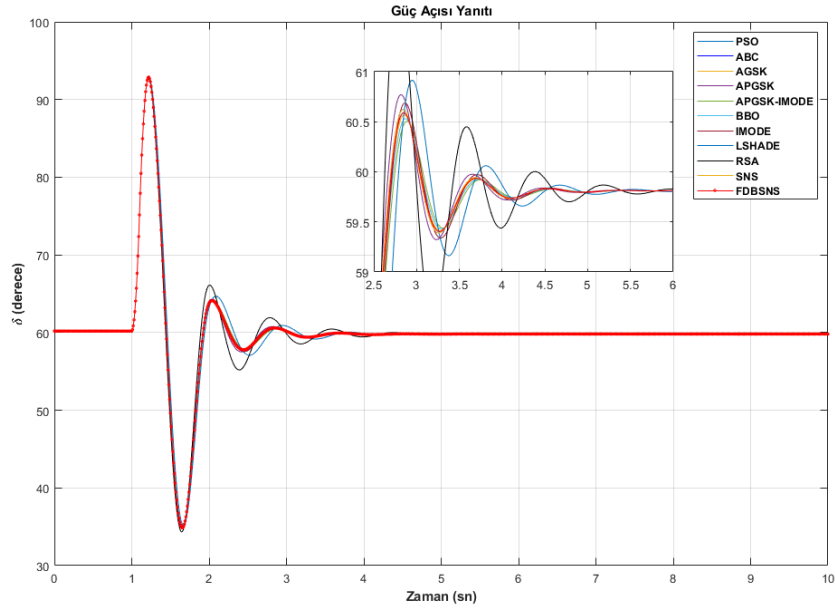
maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri açısından en küçük olduğu görülmektedir. Kutu grafiklerinden elde edilen bu sonuçlara göre, FDBSNS algoritmasının arama uzayında kararlı bir arama yeteneğine, erken yakınsama problemlerinden kaçınmak için güçlü bir keşif yeteneğine ve çözüm adaylarının komşuluğunda etkili bir sömürü yeteneğine sahip olduğu söylenebilir. Durum 3 için gerçekleştirilen test çalışmasının bir sonraki aşamasında, Denklem (4.15)'te yer alan amaç fonksiyonuna göre en uygun değerleri belirlenen parametrelerin geçici durum kararlılığının sağlanması konusundaki etkisini görebilmek amacıyla, [91]'de yer alan Simulink tabanlı modeller kullanılmış ve SMIB güç sisteminde simülasyonları gerçekleştirilerek sistem yanıtları elde edilmiştir. Ancak Durum 1 ve Durum 2'den farklı olarak optimizasyon işleminin üç farklı yüklenme senaryosunun tamamı için gerçekleştirilmesi nedeniyle Durum 3'te zaman alanı sonuçları her üç senaryo açısından incelenmiştir. Buna göre, üç farklı yüklenme koşulunda ve belirlenen arıza durumu senaryosunda FDBSNS ve rakip algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilen TCSC tabanlı LL denetleyicisinin parametrelerinin optimizasyon işleminin geçici durum kararlılığına etkisinin incelenebilmesi amacıyla, elde edilen güç açısı yanıtları (δ) Şekil 5.30 - Şekil 5.32 arasında verilmiştir.



Şekil 5.30. Durum 3 - Senaryo 1 için güç açısı (δ) yanıtı.



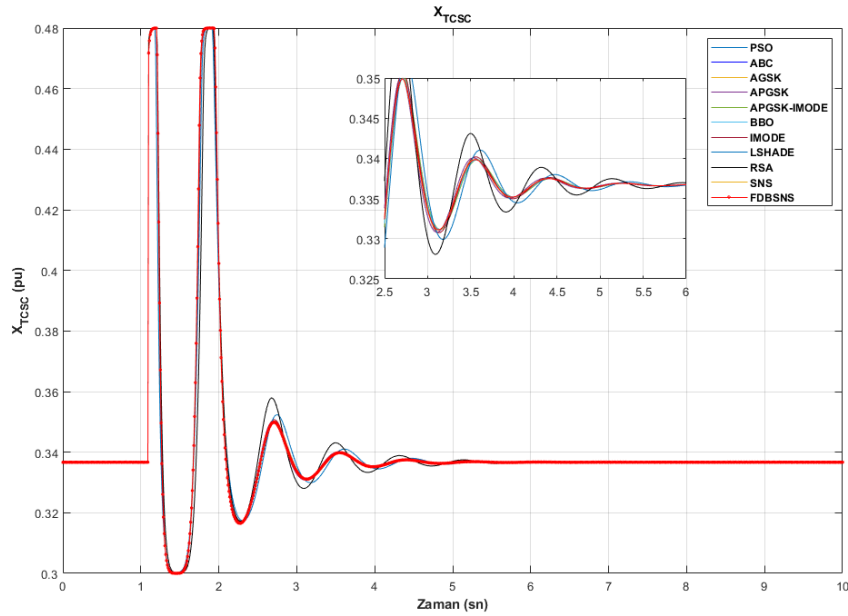
Şekil 5.31. Durum 3 - Senaryo 2 için güç açısı (δ) yanıtı.



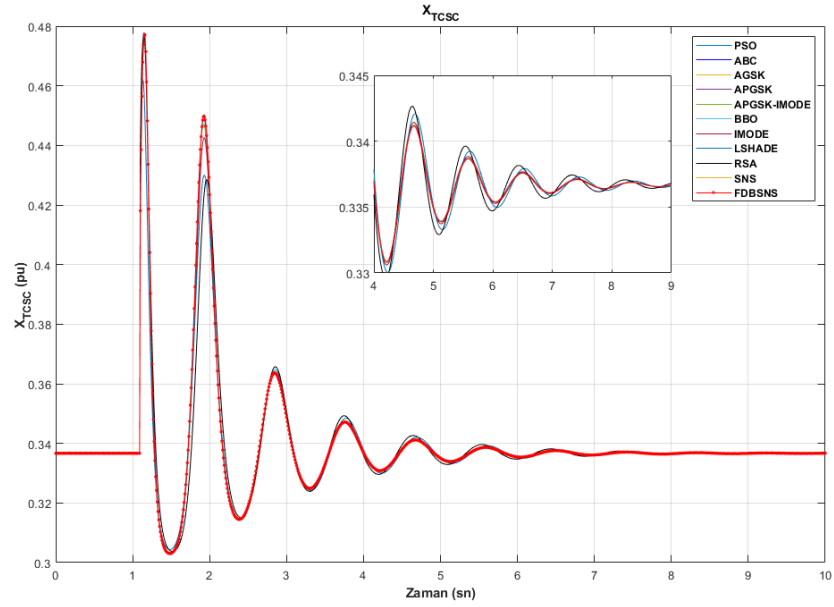
Şekil 5.32. Durum 3 - Senaryo 3 için güç açısı (δ) yanıtı.

Şekil 5.30 - Şekil 5.32’de yer alan grafiklere göre, Senaryo 1 için elde edilen güç açısı yanıtları incelendiğinde, 1.saniyede meydana gelen 3-fazlı ve 100 ms’lik bir arıza durumunda FDBSNS ve 10 farklı rakip algoritmanın birinci salınımın tepe noktası açısından benzer yanıt sunduğu görülmektedir. Ancak, özellikle ikinci ve üçüncü salınımlarda FDBSNS algoritması ile kontrol edilen TCSC tabanlı LL denetleyicisinin maksimum aşımı azalttığı ve etkili bir sönmüleme performansı ortaya koyduğu açıkça

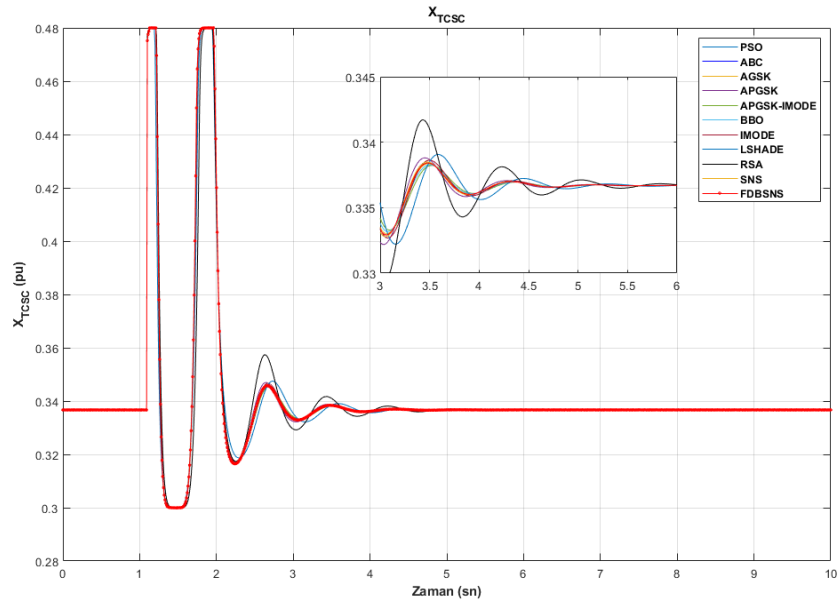
görülmektedir. Özellikle de güç açısı yanıtının yakınlştırılmış görünümünde, FDBSNS algoritması kullanılarak kontrol edilen TCSC tabanlı LL denetleyicisinin 5. saniyeden sonra, karşılaştırılan algoritmalarla kontrol edilen denetleyici yapılarına kıyasla, sistemi önemli ölçüde kararlı duruma getirdiği görülmektedir. Senaryo 2 için güç açısı yanıtları incelendiğinde, özellikle ikinci, üçüncü ve dördüncü salınımlarda FDBSNS algoritması ile kontrol edilen TCSC tabanlı LL denetleyicisinin karşılaştırılan algoritmalarla kontrol edilen denetleyici yapılarının geneline kıyasla sisteme sağladığı sönümlemenin daha fazla olduğu görülmektedir. Güç açısı yanıtının yakınlştırılmış görünümü incelendiğinde, Senaryo 2’de Senaryo 1’e kıyasla salınımların sönümlemesi biraz daha uzun sürmüştür. Ancak FDBSNS ile kontrol denetleyici yapısıyla özellikle 6. saniyeden sonra salınımların minimum düzeye indiği ve sistemin kararlı duruma geçtiği görülmektedir. Senaryo 3 için güç açısı yanıtları incelendiğinde ise ikinci ve üçüncü salınımlardan itibaren FDBSNS kontrollü denetleyici yapısıyla sistem kararlı hale gelmiştir. Bu grafiklere ek olarak, TCSC tabanlı LL denetleyicisinin parametrelerinin FDBSNS ve rakip algoritmalarla optimizasyon işleminin geçici durum kararlılığına etkisinin incelenebilmesi amacıyla, elde edilen TCSC reaktansı yanıtları Şekil 5.33 - Şekil 5.35 arasında sunulmuştur.



Şekil 5.33. Durum 3 - Senaryo 1 için X_{TCSC} grafiği.



Şekil 5.34. Durum 3 - Senaryo 2 için X_{TCSC} grafiği.



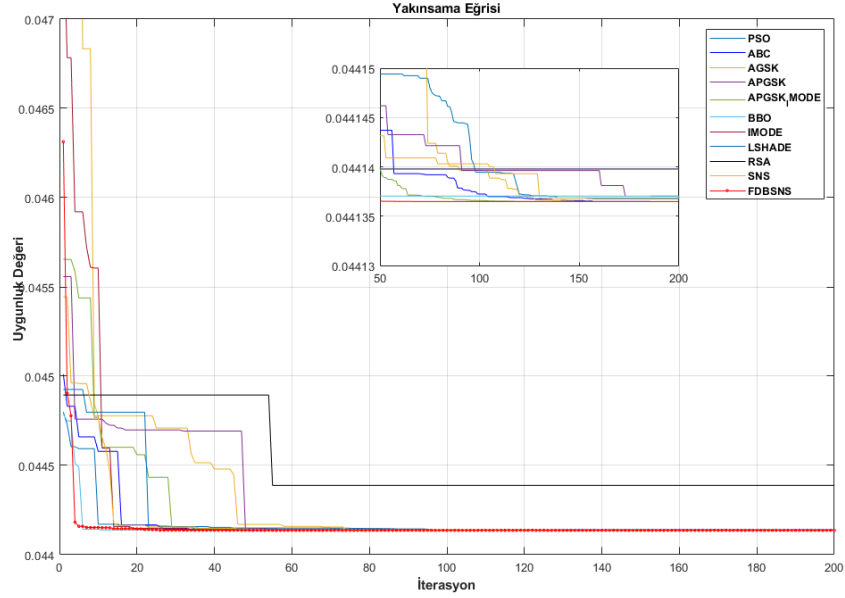
Şekil 5.35. Durum 3 - Senaryo 3 için X_{TCSC} grafiği.

Şekil 5.33 - Şekil 5.35 arasında yer alan grafiklere göre, Senaryo 1 için elde edilen TCSC reaktansı yanıtları incelendiğinde, 1.saniyede meydana gelen 3-fazlı ve 100 ms'lik bir arıza durumu için FDBSNS ve 10 farklı rakip algoritmanın birinci ve ikinci salınımın tepe noktası açısından benzer yanıtlar sunduğu ve sistemde ciddi bir salınım durumu meydana geldiği görülmektedir. Üçüncü ve dördüncü salınımlarda ise FDBSNS algoritması ile kontrol edilen TCSC tabanlı LL denetleyicisinin diğer algoritmalarla kontrol edilen

denetleyici yapılarına kıyasla salınımları nispeten daha hızlı ve belirgin şekilde iyileştirdiği söylenebilir. Senaryo 2 için TCSC reaktansının birinci ve ikinci salınımlardaki tepe noktasının FDBSNS algoritması ile kontrol edilen denetleyici yapısında diğer algoritmalarla kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak arıza durumunun ortadan kaldırılması ile beraber FDBSNS kontrollü denetleyici yapısı rakip algoritmalar ile kontrol edilen denetleyici yapılarına kıyasla daha etkili sistem cevabı sağlamıştır ve sistem kararlı duruma gelmeye başlamıştır. Özellikle Senaryo 2’de yer alan grafikten FDBSNS kontrollü TCSC tabanlı LL denetleyici yapısının yüksek aşım değerini etkili bir şekilde sönümlediği görülmektedir. Senaryo 3 incelendiğinde ise, 3.salınımdan itibaren FDBSNS kontrollü denetleyici yapısının TCSC reaktansı değişiminde daha etkili bir sistem yanıtı sunduğu sonrasında kararlı bir durum sergilediği görülmektedir.

5.3.4. Durum 4: TCSC Tabanlı PID Denetleyicisi (Farklı Yüklenme Koşulları)

Deneysel çalışmanın bu alt bölümünde, TCSC tabanlı PID denetleyicisinin parametrelerinin optimizasyon işlemi, Denklem (4.15)’te verilen ITAE amaç fonksiyonu dikkate alınarak, $t = 1$. saniyede 3-fazlı ve 100 ms’lik bir arıza durumu için, Durum 3’e benzer şekilde hafif, nominal ve ağır yüklenme koşulları senaryosunun tamamı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Durum 3’te olduğu gibi, bu amaç fonksiyonu yaklaşımında da parametrelerin optimizasyonu farklı yüklenme senaryolarının tamamının toplamı için ($NS=3$) gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, yüklenme koşulu olarak Çizelge 5.14’te verilen yüklenme koşulları dikkate alınmıştır. Ayrıca, Durum 2’ye benzer şekilde, en uygun değerlerinin belirlenmesi hedeflenen PID denetleyicisi parametre sayısı K_P , K_i , ve K_D olmak üzere üç adettir. Optimizasyon işleminin sınır aralıkları K_P için [20-100] ve K_i ile K_D değişkenleri için ise sırasıyla [0,01- 0,5] olarak belirlenmiştir. Optimizasyon işlemi, FDBSNS ve 10 farklı rakip MSA algoritması kullanılarak 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma koşulu için gerçekleştirilmiş ve en iyi uygunluk değerine karşılık gelen parametreler K_P , K_i , ve K_D parametreleri olarak elde edilmiştir. Buna göre en uygun değerleri belirlenen denetleyici parametreleri ve 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma sonucunda elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri Çizelge 5.18’de ve algoritmalar ile edilen minimum uygunluk değerine yakınsama eğrileri Şekil 5.36’da verilmiştir.



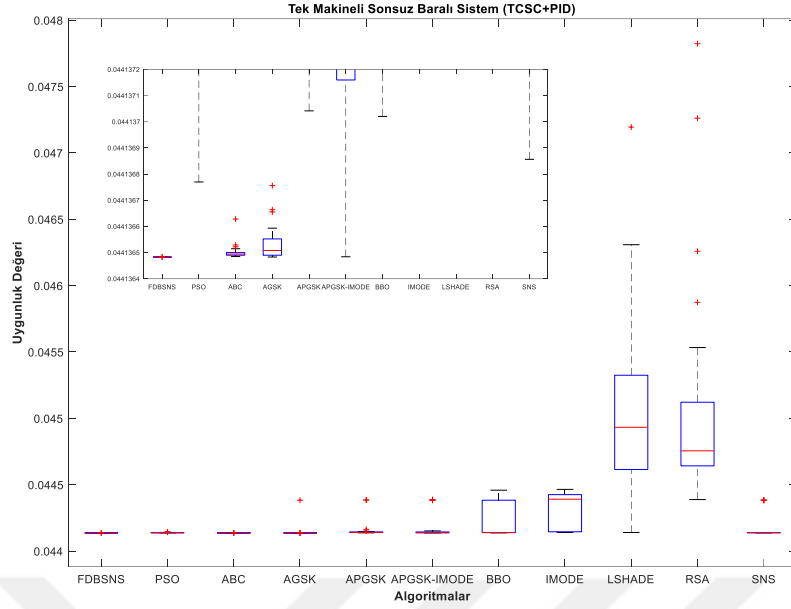
Şekil 5.36. Durum 4 için uygunluk değeri yakınsama eğrisi.

Bu eğriler incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının rakip algoritmalara kıyasla daha etkili bir performans sergilediği, daha düşük iterasyon sayıları sonunda minimum değerlere yakınsadığı ve uygunluk değeri açısından ise minimum değer sunan algoritma olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.18. Durum 4 için optimum parametrelere bağlı olarak hesaplanan uygunluk değerleri.

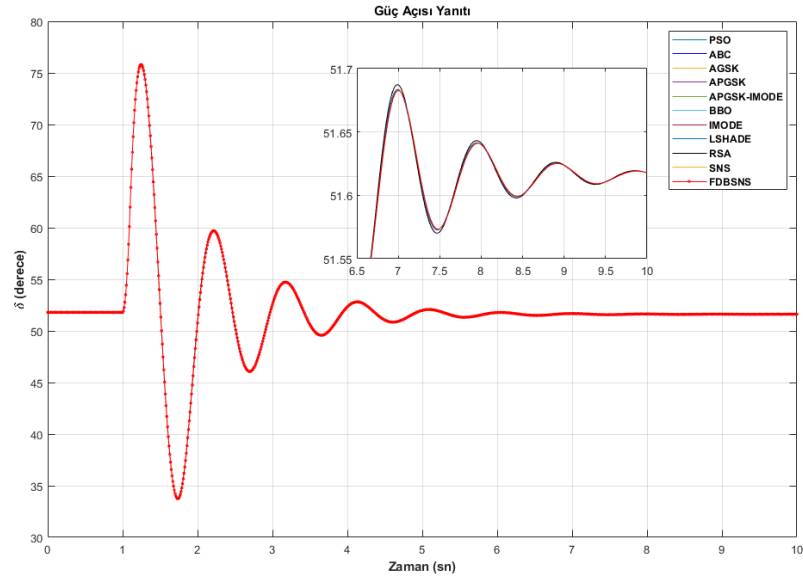
Algoritma	K_P	K_I	K_D	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
PSO	61,31856	0,01005	0,15120	0,04413677	0,04414446	0,04413858	$1,7949 \times 10^{-6}$
ABC	61,33922	0,01000	0,15936	0,04413654	0,04413663	0,04413656	$2,6092 \times 10^{-8}$
AGSK	61,33928	0,01000	0,15938	0,04413654	0,04438292	0,04414474	$4,4984 \times 10^{-5}$
APGSK	61,29874	0,01010	0,14340	0,04413704	0,04438444	0,04415794	$6,1739 \times 10^{-5}$
APGSK- IMODE	61,33925	0,01000	0,15937	0,04413648	0,04438768	0,04417263	$8,4765 \times 10^{-5}$
BBO	61,29968	0,01000	0,14377	0,04413702	0,04445847	0,04420989	$1,2086 \times 10^{-4}$
IMODE	61,08521	0,01130	0,05924	0,04413979	0,04446451	0,04431884	$1,3648 \times 10^{-4}$
LSHADE	61,04982	0,01000	0,04516	0,04413976	0,04719425	0,04501742	$6,5194 \times 10^{-4}$
RSA	60,30971	0,01000	0,01000	0,04438780	0,04782254	0,04507832	$8,0433 \times 10^{-4}$
SNS	61,31742	0,01163	0,15079	0,04413686	0,04438292	0,04417076	$8,4642 \times 10^{-5}$
FDBSNS	61,33929	0,01000	0,15939	0,04413648	0,04413648	0,04413648	$1,2884 \times 10^{-15}$

Çizelge 5.18’de verilen sonuçlar incelendiğinde, Durum 4 için elde edilen minimum değerler arasında FDBSNS ve APGSK-IMODE algoritmalarının **0,04413648** değeri ile en etkili çözüm sunan algoritmalar olduğu görülmektedir. Bu iki algoritmanın sonrasında ise 0,04413654 değeri ile ABC ve AGSK algoritmaları başarılı olan diğer algoritmalarlardır. Minimum değerler açısından, genel olarak karşılaştırılan algoritmaların tamamı yakın sonuçlar sunmasına rağmen RSA algoritması 0,04438780 değeri ile karşılaştırılan algoritmalar arasında en kötü çözüm değeri sunan algoritmadır. Karşılaştırma bu minimizasyon işlemi sonucunda elde edilen maksimum uygunluk değerleri açısından yapılacak olursa, FDBSNS algoritmasının yine **0,04413648** değeri ile en etkili çözüm sunan algoritma olduğu görülmektedir. Sonrasında ise 0,04413663 değeriyle ABC algoritması ikinci sırada etkili çözüm sunan algoritmadır. Durum 4 için maksimum değerler açısından en kötü performans gösteren algoritmalar ise sırasıyla 0,04719425 ve 0,04719425 değerleriyle LSHADE ve RSA olmuştur. 30 tekrar eden çalıştırma için elde edilen ortalama değerler açısından da **0,04413648** değeriyle FDBSNS algoritması yine ilk sırada yer alırken, ikinci ve üçüncü sırada yer alan algoritmalar sırasıyla 0,04413656 ve 0,04413858 değerleriyle ABC ve PSO algoritmaları olmuştur. Ortalama değerler açısından en kötü çözüm sunan algoritmalar ise sırasıyla 0,04501742 ve 0,04507832 değerleriyle LSHADE ve RSA olmuştur. Son olarak 30 tekrar eden çalıştırma için elde edilen standart sapma sonuçları açısından da **$1,2884 \times 10^{-15}$** değeriyle FDBSNS ilk sırada yer alırken, ABC ve PSO algoritmaları tarafından $2,6092 \times 10^{-8}$ ve $1,7949 \times 10^{-6}$ standart sapma değerleri elde edilmiştir. $6,5194 \times 10^{-4}$ ve $8,0433 \times 10^{-4}$ değerleriyle LSHADE ve RSA algoritmaları 30 tekrar eden çalıştırma için TCSC tabanlı PID denetleyicisi optimizasyonu için karşılaştırılan algoritmalar arasında en kötü standart sapma değeri sunan algoritmalarlardır. Buna göre, Durum 4 için genel bir değerlendirme yapılacak olursa; Çizelge 5.18’de yer alan sonuçlardan, FDBSNS algoritmasının TCSC tabanlı PID denetleyicilerinin parametrelerinin optimizasyonu probleminin çözümünde minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri açısından karşılaştırılan MSA algoritmalarına kıyasla etkili olduğu görülmektedir. Buna göre, Durum 4 için genel bir değerlendirme yapılacak olursa; Çizelge 5.17’de yer alan sonuçlar detaylı olarak değerlendirildiğinde, FDBSNS algoritmasının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri açısından rakip MSA algoritmalarına kıyasla daha etkili bir performans ortaya koyduğu görülmektedir. Bu karşılaştırmalara ek olarak, 30 tekrar eden bağımsız çalıştırma için çizdirilen kutu grafikleri de Şekil 5.37’de verilmiştir.

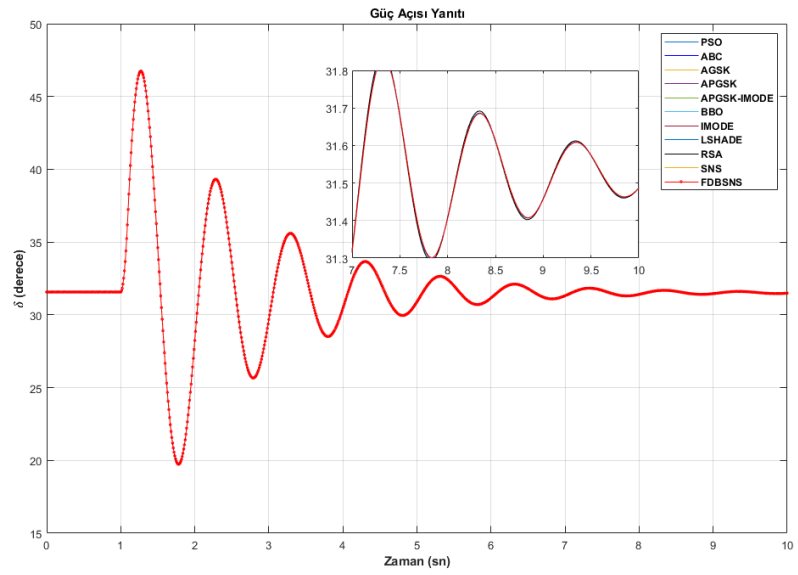


Şekil 5.37. Durum 4 için kutu grafikleri.

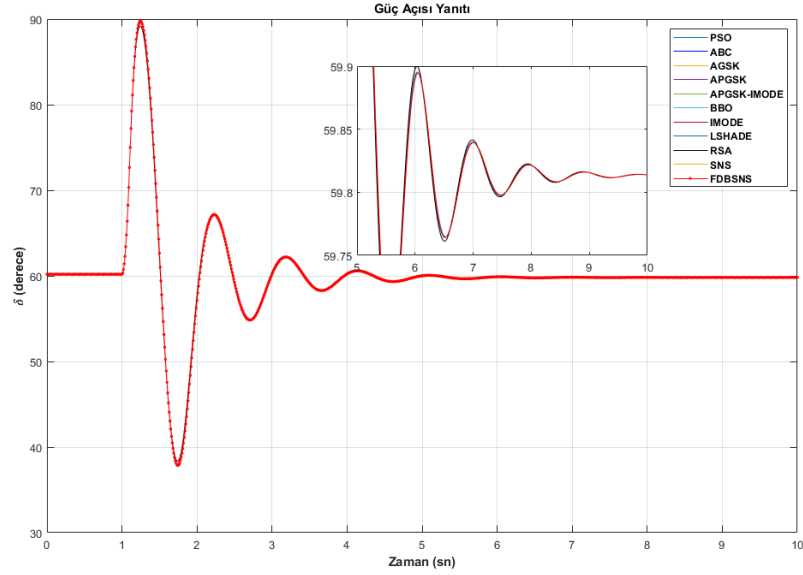
Şekil 5.37’de görüldüğü üzere, Durum 4 için sıfır değişim aralığına en yakın sonuçlar sunan algoritmalar FDBSNS, PSO ve ABC olmuştur. Bu üç algoritmanın dışında, AGSK, APGSK, APGSK-IMODE ve SNS algoritmaları ise sıfır değişim aralığına yakın sonuçlar sunan, ancak + sembolünden de görüldüğü üzere nadiren de olsa aykırı sonuçlar sunan algoritmalar. Sıralamada bu algoritmaları BBO ve IMODE algoritmaları izlemektedir. Her iki algoritma kırmızı çizgi ile gösterilen medyan değeri açısından karşılaştırıldığında, BBO’nun IMODE’ye kıyasla biraz daha etkili olduğu söylenebilir. Öte yandan, en geniş çözüm aralığına sahip olan, yani en istikrarsız çözümler sunan algoritmaların ise LSHADE ve RSA olduğu görülmektedir. Bu algoritmalarından RSA’nın daha uç noktalarda aykırı değerler sunduğu görülmektedir. Durum 4 için gerçekleştirilen bu analizlere ek olarak, en uygun değerleri belirlenen parametrelerin geçici durum kararlılığına etkisi elde edilen sistem yanıtları dikkate alınarak analiz edilmiştir. Sistem yanıtları, [91]’de yer alan Simulink tabanlı modeller kullanılarak SMIB bir güç sistemi kullanılarak elde edilmiştir. Optimizasyon işleminin üç farklı yüklenme senaryosunun tamamı için gerçekleştirilmesi nedeniyle zaman alanı analizleri üç senaryo açısından incelenmiştir. Buna göre, üç farklı yüklenme koşulu ve belirlenen arıza durumu senaryosu için FDBSNS ve rakip algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilen TCSC tabanlı PID denetleyicisinin parametrelerinin optimizasyonu işleminin, sistemin geçici durum kararlılığına olan etkisinin incelenmesi amacıyla elde edilen güç açısı yanıtları (δ) Şekil 5.38 - Şekil 5.40 arasında verilmiştir.



Şekil 5.38. Durum 4 - Senaryo 1 için güç açısı (δ) yanıtı.

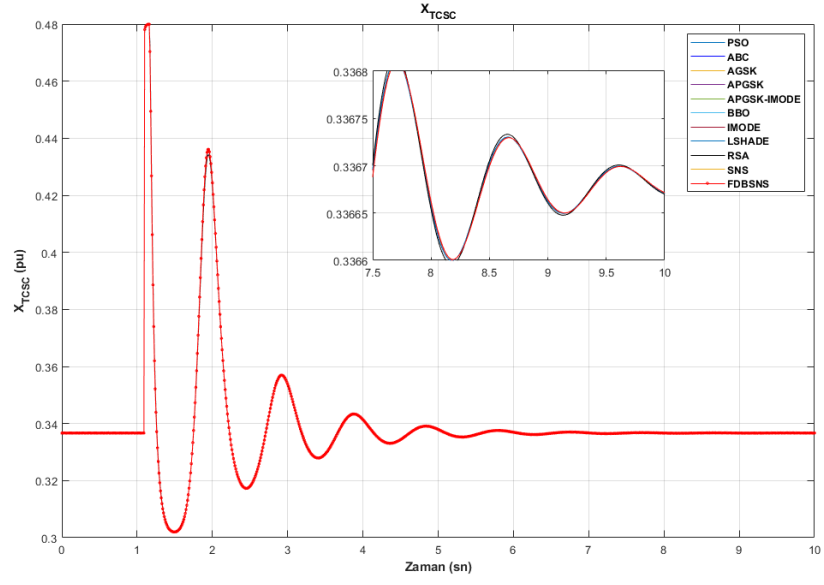


Şekil 5.39. Durum 4 - Senaryo 2 için güç açısı (δ) yanıtı.

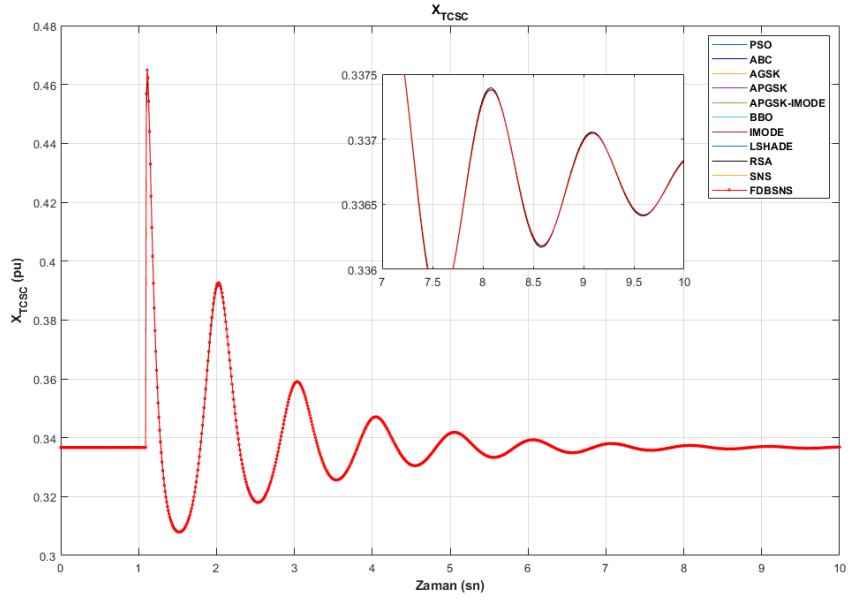


Şekil 5.40. Durum 4 - Senaryo 3 için güç açısı (δ) yanıtı.

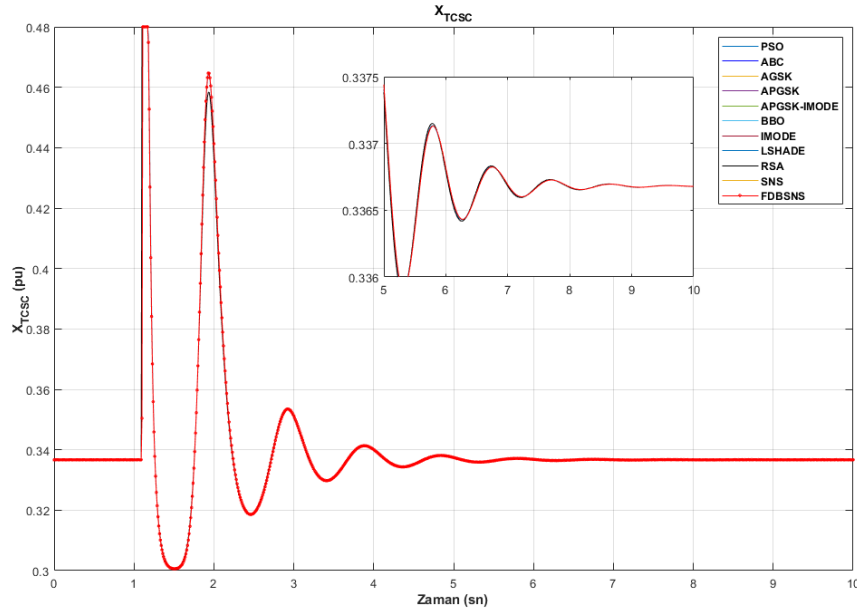
Şekil 5.38 - Şekil 5.40 arasında yer alan grafiklere göre, Senaryo 1 için elde edilen güç açısı yanıtları incelendiğinde, 1.saniyede meydana gelen 3-fazlı ve 100 ms'lik bir arıza durumunda FDBSNS ve 10 farklı rakip algoritmanın birbirlerine çok yakın yanıtlar sundukları görülmektedir. 6. saniye sonrasında ise LSHADE ve RSA dışında kalan algoritmalar tarafından biraz daha iyi yanıt sunulmuş ve 8. saniye sonrasında sistem kararlılık sınırlarına gelmiştir. Senaryo 2 ve Senaryo 3 açısından elde edilen güç açısı yanıtları incelendiğinde de yine Senaryo 1 ile benzer durum söz konusudur. Bu senaryolarda da denetleyicilerin kontrolünde kullanılan algoritmalar birbirlerine yakın yanıtlar sunmuş ve sistem genel olarak 8. saniyeden sonra kararlılık sınırına yaklaşmıştır. Bu grafiklere ek olarak, TCSC tabanlı LL denetleyicisinin parametrelerinin FDBSNS ve rakip algoritmalarla optimizasyon işleminin geçici durum kararlılığına etkisi TCSC reaktansı yanıtları açısından da incelenmiştir. TCSCS reaktansı açısından da her üç senaryo için elde edilen zaman alanı sonuçları güç açısı grafiklerinde olduğu gibi benzer sistem yanıtları içermektedir. Elde edilen TCSC reaktansı yanıtları Şekil 5.41 - Şekil 5.43 arasında sunulmuştur.



Şekil 5.41. Durum 4 - Senaryo 1 için X_{TCSC} grafiği.



Şekil 5.42. Durum 4 - Senaryo 2 için X_{TCSC} grafiği.



Şekil 5.43. Durum 4 - Senaryo 3 için X_{TCSC} grafiği.

Durum 4’te, genel olarak her üç senaryo için de farklı algoritmalar ile kontrol edilen TCSC tabanlı PID denetleyici yapısı, zaman analizi simülasyonları açısından birbirine yakın sonuçlar vermiştir. FDBSNS algoritması zaman alanı simülasyonları açısından, karşılaştırılan rakip algoritmalarla kıyasla ciddi anlamda belirgin bir üstünlük sağlayamamış gibi gözükse de diğer algortimalar ile benzer sistem yanıtları sunmakla birlikte, uygunluk fonksiyonu değerleri ve istatistiksel karşılaştırmalarda diğer algoritmalarla kıyasla daha etkili performans sunan algoritma olmuştur. Burada, problemin çözümünde elde edilen zaman alanı analizi sonuçlarının benzerliği, önemli ölçüde kullanılan denetleyici yapısı ile ilişkilidir. Özellikle, Durum 3 ile Durum 4 açısından karşılaştırma yapıldığında, benzer amaç fonksiyonu ve benzer arıza durumu senaryoları açısından TCSC tabanlı LL denetleyicisinin TCSC tabanlı PID denetleyicisine kıyasla daha etkili performans sunduğu ve diğer algoritmalarla kıyasla FDBSNS algoritması ile kontrol sağlandığında, denetleyici performansının önemli ölçüde arttığı açık bir şekilde görülmektedir.

Son olarak, tez çalışmasının bu bölümünde Durum 1, Durum 2, Durum 3 ve Durum 4 test çalışmaları için elde edilen sonuçlara bağlı olarak genel bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla, elde edilen sonuçlar dört test çalışması için Friedman ve Wilcoxon istatistiksel analizleri gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Friedman testinde, her bir deneysel çalışmadan elde edilen ortalama değere göre puanlama ve sıralama yapılırken, Wilcoxon

testinde algoritmalar arasında problemde elde edilen çözümlere bağlı olarak ikili karşılaştırma yapılır. Tez çalışmasında, Wilcoxon ikili işaret testi %5 anlamlılık düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Buna göre Durum 1, Durum 2, Durum 3 ve Durum 4 için gerçekleştirilen Friedman ve Wilcoxon istatistiksel analizlerine bağlı olarak 11 farklı MSA algoritması ile elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 5.19 ve Çizelge 5.20’de verilmiştir. Durum 1 için Friedman istatistiksel analizi sonuçları incelendiğinde, FDBSNS algoritmasının kullanıldığı TCSC tabanlı LL denetleyici yapısının **1,3667** sıralama puanı değeri ile rakip algoritmalara kıyasla en iyi sıralamaya sahip olan algoritma olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, Durum 1 için en iyi ikinci ve üçüncü sonuç sırasıyla 2,7333 ve 2,9667 sıralama puanları ile ABC ve SNS algoritmalarına aittir. Friedman analizine göre Durum 1 için en kötü çözüm sunan algoritma ise 10,7333 sıralama puanı ile LSHADE algoritmasına aittir. Durum 2 açısından karşılaştırma yapılırsa, FDBSNS algoritmasının yine **1,3667** puanı ile sıralamada en önde gelen algoritma olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, SNS 2,5667 puanı ile birlikte sıralamada ikinci olurken; PSO ise 2,6667 puanı ile sıralamada üçüncü olmuştur. Durum 2 için en kötü puana sahip olan algoritma ise Durum 1’e benzer şekilde 10,6 sıralama puanı ile LSHADE olmuştur. Friedman istatistiksel analiz sonuçları Durum 3 açısından incelendiğinde, FDBSNS **1,00** sıralama puanı ile yine ilk sırada yer alırken, ikinci ve üçüncü sıradaki algoritmalar da Durum 2’ye benzer şekilde yine SNS ve PSO olmuştur. En kötü performansı sunan algoritma ise bu test çalışması için 10,3333 puan değeriyle RSA olmuştur. Durum 4 için karşılaştırma yapıldığında ise FDBSNS **1,00** sıralama puanı ile yine en iyi sıralama değerine sahip olan algoritma olmuştur. İkinci ve üçüncü sırada yer alan algoritmalar ise sırasıyla 2,4333 ve 2,9 puanları ile PSO ve AGSK olmuştur. Durum 4 için RSA ve LSHADE algoritmaları ise 10,4 sıralama puanı ile en kötü sıralamaya sahip olan algoritmalarlardır. Elde edilen sonuçlar dört test çalışması durumunun genel ortalaması açısından incelenirse, FDBSNS **1,1834** sıralama puanı ile en iyi sıralamaya sahip olan algoritma olurken, SNS 3,475 sıralama puanı ile ikinci ve ABC ise 3,7083 sıralama puanı ile üçüncü sırada yer almıştır. Genel performans açısından en kötü çözüm sunan algoritma ise 10,4583 değeriyle LSHADE olmuştur. Wilcoxon ikili karşılaştırma analizi açısından elde edilen sonuca göre ise, FDBSNS algoritması PSO, ABC, AGSK, APGSK, APGSK-IMODE, BBO, IMODE, LSHADE ve RSA algoritmalarının tamamına kıyasla Durum 1, Durum 2, Durum 3 ve Durum 4’ün tamamı için rakip algoritmalarla karşı galibiyet (1/0/0) sağlayarak etkili bir performans ortaya koymuştur.

Çizelge 5.19. Dört farklı test çalışması için Friedman İstatistiksel Analizi sonuçları.

Algoritma	Durum 1 TCSC+ LL (Nominal Yüklenme Koşulu)	Durum 2 TCSC +PID (Nominal Yüklenme Koşulu)	Durum 3 TCSC+ LL (Farklı Yüklenme Koşulları)	Durum 4 TCSC +PID (Farklı Yüklenme Koşulları)	Genel Ortalama
FDBSNS	1,3667	1,3667	1,00	1,00	1,1834
SNS	2,9667	2,5667	2,7333	5,6333	3,475
ABC	2,7333	5,7	3,9667	2,4333	3,7083
PSO	4,5	2,6667	3,6667	5,2	4,0084
AGSK	5,8	3,5667	5,0667	2,9	4,3334
APGSK- IMODE	4,8333	5,4333	5,7667	6,1333	5,5417
APGSK	6,7333	7,0667	6,5667	6,8	6,7917
BBO	8,2333	7,9	8,4667	6,4	7,75
IMODE	7,9333	8,7667	8,3333	8,7	8,4333
RSA	10,1667	10,3667	10,3333	10,4	10,3167
LSHADE	10,7333	10,6	10,1	10,4	10,4583

Çizelge 5.20. Dört farklı test çalışması için Wilcoxon İstatistiksel Analizi sonuçları.

FDBSNS vs. Algoritma	Durum 1 TCSC+ LL (Nominal Yüklenme Koşulu)	Durum 2 TCSC+ PID (Nominal Yüklenme Koşulu)	Durum 3 TCSC+ LL (Farklı Yüklenme Koşulları)	Durum 4 TCSC+ PID (Farklı Yüklenme Koşulları)
	G/B/M	G/B/M	G/B/M	G/B/M
PSO	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0
ABC	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0
AGSK	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0
APGSK	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0
APGSK_IMODE	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0
BBO	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0
IMODE	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0
LSHADE	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0
RSA	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0
SNS	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0

6. SONUÇ

Bu tez çalışması, modern güç sistemlerinin güvenli bir şekilde çalışmasında kritik bir öneme sahip olan ve geçici durum kararlılık analizi probleminin çözümünde kullanılan denetleyicilerin en uygun parametrelerinin belirlenmesini sağlamak amacıyla geliştirilen FDBSNS algoritmasının, problemin çözümüne uygulanmasını içermektedir. Denetleyicilere ait parametrelerin belirlenmesi sürecinde ve CEC 2014 ile CEC 2017 kıyaslama problemlerinin çözümünde, SNS algoritmasının erken yakınsama, arama uzayında yerel çözüm tuzaklarına takılma ve yeterli çeşitlilik sağlayamama gibi problemlere sahip olduğu görülmüştür. Bu sebeple, tez çalışmasının ilk aşamasında, SNS algoritmasının arama sürecinde yer alan çözüm adaylarının uygunluk ve mesafe değerleri dikkate alınarak daha verimli bir şekilde seçilmesi amacıyla FDB seçim yöntemi kullanılmış ve FDBSNS algoritması geliştirilmiştir. Sonrasında, FDBSNS ile SNS algoritmaları farklı arama uzayı boyutları ve çeşitli problem tiplerinden oluşan CEC 2014 ve CEC 2017 kıyaslama problemlerinin çözümü açısından karşılaştırılmıştır. CEC 2014'te, 30 boyut için elde edilen sonuçlar, FDBSNS algoritmasının SNS algoritmasına karşı minimum değerler açısından %66,6; ortalama ve maksimum değerler açısından %86,6 ve standart sapma değerleri açısından %83,3 üstünlük sağladığını göstermiştir. CEC 2017 problemlerinin çözümünde ise FDBSNS algoritmasının SNS algoritmasına karşı ortalama değerler açısından 10 boyut için %58,6; 30 boyut için %89,6; 50 boyut için %72,4 ve 100 boyut için %82,7 üstünlük sağladığı belirlenmiştir.

İkinci aşamada, FDBSNS kullanılarak farklı test sistemleri ve çeşitli arıza senaryoları için PSS parametrelerinin en uygun değerleri belirlenmiştir. WSCC 3-Makineli 9-Baralı test sistemi için gerçekleştirilen analizlerde rakiplerine kıyasla en etkili performansı gösteren algoritma olan FDBSNS; minimum değerler açısından en yakın rakipleri SNS ve APGSK-IMODE'ye kıyasla %0,104; maksimum değerler açısından en yakın rakibi IMODE'ye kıyasla %1,14; ortalama ve medyan değerleri açısından en yakın rakibi olan APGSK-IMODE'ye kıyasla sırasıyla %0,41 ve %0,21 daha etkili çözüm değeri sunmuştur. New England 10-Makineli 39-Baralı test sistemi için gerçekleştirilen analizlerde de en etkili algoritma olan FDBSNS; minimum, maksimum, ortalama ve medyan değerleri açısından en yakın rakibi olan BBO'ya kıyasla % 6,14; % 6,44; % 7,08

ve %6,88 daha etkili çözümler sunmuştur. Bu sonuçlara ek olarak, Wilcoxon ve Friedman istatistiksel analizleri, kutu grafikleri, performans indeksleri ve sistem yanıtları bakımından da FDBSNS'nin başarılı performansı doğrulanmıştır.

Üçüncü aşamada, TCSC tabanlı LL ve PID denetleyicilerin en uygun parametrelerinin farklı yüklenme senaryolarının dikkate alınarak belirlenmesinde, FDBSNS minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri açısından rakip algoritmalara kıyasla en etkili performans sunan algoritma olmuştur. Ayrıca, Wilcoxon ve Friedman istatistiksel analizleri, kutu grafikleri ve sistem yanıtları bakımından da FDBSNS'nin etkili bir algoritma olduğu belirlenmiştir. Güç açısı ve TCSC reaktansı yanıtları incelendiğinde, FDBSNS kontrollü TCSC tabanlı LL ve PID denetleyicilerin sistemi hızlı bir şekilde kararlı hale getirdiği ve düşük frekanslı salınımlar karşısında rakip algoritmalarla kontrol edilen denetleyici yapılarına kıyasla daha etkili sönümleme özelliği sağladığı görülmüştür.

Özetle, bu tez çalışması sonucunda üç önemli konuda literatüre katkı sağlanmıştır. Bunlardan birincisi, SNS algoritmasının keşif ve sömürü özellikleri açısından yeterli çeşitlilik sağlayamamasından dolayı yeni ve etkili bir algoritma olarak FDBSNS algoritmasının sunulmasıdır. İkinci katkı, FDBSNS algoritmasının güç sistemlerinde geçici durum kararlılığını iyileştirmek amacıyla en uygun PSS parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümünde ilk defa uygulanmasıdır. Üçüncü katkı ise, yine geçici durum kararlılığını iyileştirmek amacıyla kullanılan TCSC tabanlı LL ve TCSC tabanlı PID denetleyicilerinin en uygun parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümünde FDBSNS'nin ilk defa uygulanmasıdır. Her üç deneysel çalışma için de FDBSNS, uygunluk değerleri, istatistiksel analizler, performans indeksleri ve sistem yanıtları açısından karşılaştırılan algoritmalara kıyasla etkili sonuçlar vermiştir. Ancak, FDBSNS algoritmasının yüksek boyutlu problemlerinin çözümünde düşük boyutlu problemlere kıyasla daha etkili sonuçlar vermesine rağmen, kıyaslama problemlerinin çözümünde ve güç sistemi denetleyicilerinin parametrelerinin belirlenmesi probleminin çözümü için gerçekleştirilen Simulink tabanlı analizlerde süre açısından sunduğu dezavantajlar da dikkate alınması gereken bir durumdur. Elde edilen sonuçlar, ilerleyen çalışmalar için, FDBSNS algoritması kullanılarak farklı denetleyici yapılarının veya yenilenebilir enerji kaynaklarının dahil edildiği sistemlerde parametrelerin en uygun değerlerinin belirlenmesiyle farklı kararlılık analizlerinin gerçekleştirilebilmesi açısından umut verici olmuştur.

7. KAYNAKLAR

- [1] L. Abualigah, D. Yousri, M. Abd Elaziz, A. A. Ewees, M. A. A. Al-qaness ve A. H. Gandomi, “Aquila Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm,” *Computers & Industrial Engineering*, c. 157, sayı Ekim 2020, ss. 107250, 2021.
- [2] B. Akay ve D. Karaboga, “A survey on the applications of artificial bee colony in signal, image, and video processing,” *Signal, Image and Video Processing*, c. 9, sayı 4, ss. 967–990, 2015.
- [3] E. H. Houssein, M. M. Emam ve A. A. Ali, “An optimized deep learning architecture for breast cancer diagnosis based on improved marine predators algorithm,” *Neural Computing and Applications*, c. 34, sayı 20, ss. 18015–18033, 2022.
- [4] G. D’Angelo ve F. Palmieri, “GGA: A modified genetic algorithm with gradient-based local search for solving constrained optimization problems,” *Information Sciences*, c. 547, ss. 136–162, 2021.
- [5] H. Salimi, “Stochastic Fractal Search: A powerful metaheuristic algorithm,” *Knowledge-Based Systems*, c. 75, ss. 1–18, 2015.
- [6] E. Çelik, “IEGQO-AOA: Information-Exchanged Gaussian Arithmetic Optimization Algorithm with Quasi-opposition learning,” *Knowledge-Based Systems*, c. 260, ss. 110169, 2023.
- [7] E. H. Houssein, E. Çelik, M. A. Mahdy ve R. M. Ghoniem, “Self-adaptive Equilibrium Optimizer for solving global, combinatorial, engineering, and Multi-Objective problems,” *Expert Systems with Applications*, c. 195, sayı Kasım 2021, ss. 116552, 2022.
- [8] A. R. Simpson, G. C. Dandy ve L. J. Murphy, “Genetic Algorithms compared to other techniques for Pipe Optimization,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, c. 120, sayı 4, ss. 423–443, 1994.
- [9] L. Han ve M. Neumann, “Effect of dimensionality on the Nelder-Mead simplex method,” *Optimization Methods and Software*, c. 21, sayı 1, ss. 1–16, 2006.
- [10] M. A. Hannan, N. N. Islam, A. Mohamed, M. S. H. Lipu, P. J. Ker, M. M. Rashid ve H. Shareef, “Artificial intelligent based damping controller optimization for the multi-machine power system: A review”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 39574–39594, 2018.
- [11] B. Dasu, M. Siva Kumar ve R. Srinivasa Rao, “Design of robust modified power system stabilizer for dynamic stability improvement using Particle Swarm Optimization technique,” *Ain Shams Engineering Journal*, c. 10, sayı 4, ss. 769–783, 2019.
- [12] K.Sörensen ve F.Glover, *Metaheuristics. Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Hollanda: Kluwer Academic Publishers, 2013.
- [13] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt ve M. P. Vecchi, “Optimization by Simulated Annealing,” *Science*, c. 220, sayı 4598, ss. 671–680, 1983.

- [14] J. H. Holland, "Genetic algorithms," *Scientific American*, c. 267, sayı 1, ss. 66–73, 1992.
- [15] L. Abualigah, D. Yousri, M. Abd Elaziz, A. A. Ewees, M. A. A. Al-qaness ve A. H. Gandomi, "Aquila Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm," *Computers & Industrial Engineering*, c. 157, sayı Temmuz 2021, ss. 107250, 2021.
- [16] D. Izci, "A novel improved atom search optimization algorithm for designing power system stabilizer," *Evolutionary Intelligence*, c. 15, sayı 3, ss. 2089–2103, 2022.
- [17] D. Molina, J. Poyatos, J. Del Ser, S. García, A. Hussain ve F. Herrera, "Comprehensive taxonomies of nature- and bio-inspired optimization: Inspiration versus algorithmic behavior, critical analysis recommendations," *Cognitive Computation*, c. 12, sayı 5, ss. 897–939, 2020.
- [18] R. S. K. Preece, "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces," *Journal of Global Optimization*, c. 11, sayı 4, ss. 341–359, 1997.
- [19] H. G. Beyer ve H. P. Schwefel, "Evolution strategies—A comprehensive introduction," *Natural Computing*, c. 1, sayı 1, ss. 3–52, 2002.
- [20] D. Karaboga ve B. Akay, "A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm," *Applied Mathematics and Computation*, c. 214, sayı 1, ss. 108–132, 2009.
- [21] M. Dorigo, M. Birattari ve T. Stutzle, "Ant Colony Optimization," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, c. 1, sayı 4, ss. 28–39, 2006.
- [22] S. Mirjalili, S. Mohammad ve A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, c. 69, ss. 46–61, 2014.
- [23] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour ve S. Saryazdi, "GSA : A Gravitational Search Algorithm," *Information Sciences*, c. 179, sayı 13, ss. 2232–2248, 2009.
- [24] H. Abedinpourshotorban, S. Mariyam ve Z. Beheshti, "Electromagnetic field optimization : A physics-inspired metaheuristic optimization algorithm," *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 26, ss. 8–22, 2016.
- [25] F. Glover, "Tabu Search-Part I," *ORSA Journal on Computing*, c. 1, sayı 3, ss. 190–206, 1989.
- [26] R. V Rao, V. J. Savsani ve D. P. Vakharia, "Teaching – learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems," *Computer-aided Design*, c. 43, sayı 3, ss. 303–315, 2011.
- [27] S. Kenneth, "Metaheuristics—The metaphor exposed," *International Transactions in Operational Research*, c. 22, sayı 1, ss. 3–18, 2015.
- [28] H. T. Kahraman, S. Aras ve Gedikli, "Fitness-distance balance (FDB): A new selection method for meta-heuristic search algorithms," *Knowledge-Based Systems*, c. 190, ss. 105169, 2020.
- [29] B. Morales-Castañeda, D. Zaldívar, E. Cuevas, F. Fausto ve A. Rodríguez, "A better balance in metaheuristic algorithms: Does it exist?," *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 54, ss. 100671, 2020.

- [30] J. Xu ve J. Zhang, "Exploration-exploitation tradeoffs in metaheuristics: Survey and analysis," *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, 2014, ss. 8633-8638.
- [31] M. Crepinsek, S. H. Liu ve M. Mernik, "Exploration and exploitation in evolutionary algorithms," *ACM Computing Surveys*, c. 45, sayı 3, 2013.
- [32] A. Zhang, G. Sun, J. Ren, X. Li, Z. Wang ve X. Jia, "A dynamic neighborhood learning-based gravitational search algorithm," *IEEE Transactions on Cybernetics*, c. 48, sayı 1, ss. 436-447, 2018.
- [33] X. Han, Q. Liu, H. Wang ve L. Wang, "Novel fruit fly optimization algorithm with trend search and co-evolution," *Knowledge-Based Systems*, c. 141, ss. 1-17, 2018.
- [34] A. Cheraghali, M. Hajiaghayi-Keshteli ve M. M. Paydar, "Tree Growth Algorithm (TGA): A novel approach for solving optimization problems," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, c. 72, ss. 393-414, 2018.
- [35] A. Sadollah, H. Sayyaadi, D. G. Yoo, H. M. Lee ve J. H. Kim, "Mine blast harmony search: A new hybrid optimization method for improving exploration and exploitation capabilities," *Applied Soft Computing*, c. 68, ss. 548-564, 2018.
- [36] M. Z. Ali, N. H. Awad, R. G. Reynolds ve P. N. Suganthan, "A balanced fuzzy Cultural Algorithm with a modified Levy flight search for real parameter optimization," *Information Sciences*, c. 447, ss. 12-35, 2018.
- [37] S. Aras, E. Gedikli ve H. T. Kahraman, "A novel stochastic fractal search algorithm with fitness-Distance balance for global numerical optimization," *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 61, ss. 100821, 2021.
- [38] S. Duman, H. T. Kahraman, U. Guvenc ve S. Aras, "Development of a Lévy flight and FDB-based coyote optimization algorithm for global optimization and real-world ACOPF problems", *Soft Computing*, c. 25, ss. 6577-6617, 2021.
- [39] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Zahra ve S. Saremi, "Advances in engineering software salp swarm algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems," *Advances in Engineering Software*, c. 114, ss. 163-191, 2017.
- [40] D. Karaboga ve B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm," *Journal of Global Optimization*, c. 39, ss. 459-471, 2007.
- [41] L. Wang, B. Yang ve J. Orchard, "Particle swarm optimization using dynamic tournament topology," *Applied Soft Computing*, c. 48, ss. 584-596, 2016.
- [42] S. Duman, H. Tolga, Y. Sonmez, U. Guvenc ve M. Kati, "A powerful meta-heuristic search algorithm for solving global optimization and real-world solar photovoltaic parameter estimation problems," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, c. 111, sayı Eylül 2020, ss. 104763, 2022.
- [43] U. Guvenc, S. Duman, H. T. Kahraman, S. Aras ve M. Kati, "Fitness-Distance Balance based adaptive guided differential evolution algorithm for security-constrained optimal power flow problem incorporating renewable energy sources," *Applied Soft Computing*, c. 108, sayı Eylül 2021.
- [44] S. Talatahari, H. Bayzidi ve M. Saraee, "Social Network Search for Global Optimization," *IEEE Access*, c. 9, ss. 92815-92863, 2021.

- [45] J. J. Liang, B. Y. Qu ve P. N. Suganthan, "Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2014 special session and competition on single objective real-parameter numerical optimization," Zhengzhou University and Nanyang Technology University, 2013.
- [46] N. H. Awad, M. Z. Ali, J. Liang, B. Y. Qu ve P. N. Suganthan, "Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2017 special session and competition on real-parameter optimization," Nanyang Technology University, Singapur, 2016.
- [47] S. Ekinçi, "Çok makinalı güç sisteminde açısai kararlılık analizi ve kontrolör parametre optimizasyonu," Doktora tezi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [48] D. Simon, "Biogeography-Based Optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 12, sayı 6, 2008.
- [49] L. Abualigah, M. A. Elaziz, P. Sumari, Z. W. Geem ve A. H. Gandomi, "Reptile Search Algorithm (RSA): A nature-inspired meta-heuristic optimizer," *Expert Systems with Applications*, c. 191, ss. 116158, 2022.
- [50] R. Tanabe ve A. S. Fukunaga, "Improving the search performance of SHADE using linear population size reduction," *2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2014, ss. 1658-1665.
- [51] K. M. Sallam, S. M. Elsayed, R. K. Chakraborty ve M. J. Ryan, "Improved Multi-operator Differential Evolution Algorithm for Solving Unconstrained Problems; Improved Multi-operator Differential Evolution Algorithm for Solving Unconstrained Problems," *2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2020, ss. 1-8.
- [52] A. W. Mohamed, A. A. Hadi, A. K. Mohamed ve N. H. Awad, "Evaluating the performance of adaptive gaining-sharing knowledge based algorithm on CEC 2020 benchmark problems," *2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2020, ss. 1-8.
- [53] A. Wagdy Mohamed, H. F. Abutarboush, A. A. Hadi ve A. Khater Mohamed, "Gaining-Sharing knowledge based algorithm with adaptive parameters for engineering optimization", *IEEE Access*, c. 9, ss. 65934-65946, 2021.
- [54] A. W. Mohamed, A. A. Hadi, P. Agrawal, K. M. Sallam ve A. K. Mohamed, "Gaining-Sharing knowledge based algorithm with adaptive parameters hybrid with IMODE Algorithm for solving CEC 2021 benchmark problems," *2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2021, ss. 841-848.
- [55] S. Panda, "Differential evolutionary algorithm for TCSC-based controller design," *Simulation Modelling Practice and Theory*, c. 17, sayı 10, ss. 1618–1634, 2009.
- [56] H. Bakir, U. Guvenc, H. Tolga Kahraman ve S. Duman, "Improved Lévy flight distribution algorithm with FDB-based guiding mechanism for AVR system optimal design," *Computers & Industrial Engineering*, c. 168, ss. 108032, 2022.
- [57] J. Derrac, S. García, D. Molina ve F. Herrera, "A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms," *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 1, sayı 1, ss. 3–18, 2011.

- [58] M. Singh, R. N. Patel ve D. D. Neema, "Robust tuning of excitation controller for stability enhancement using multi-objective metaheuristic Firefly algorithm," *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 44, ss. 136–147, 2019.
- [59] D. Mondal, A. Chakrabarti ve A. Sengupta. *Power System Small Signal Stability Analysis and Control*. Cambridge, A. B. D.: Academic Press, 2020.
- [60] D. Chitara, S. Member, K. Rehman Niazi, S. Member, A. Swarnkar ve N. Gupta, "Cuckoo search optimization algorithm for designing of a multimachine power system stabilizer," *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 54, sayı 4, ss. 3056-3065, 2018.
- [61] M. Jokarzadeh, M. Abedini ve A. Seifi, "Improving power system damping using a combination of optimal control theory and differential evolution algorithm," *ISA Transactions*, c. 90, ss. 169–177, 2019.
- [62] F. P. Demello ve C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. 88, sayı 4, ss. 316-329, 1969.
- [63] M. J. Gibbard, "Co-ordinated design of multimachine power system stabilisers based on damping torque concepts," *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, c. 135, sayı 4, ss. 276–284, 1988.
- [64] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers ve M. S. Zywno, "Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 4, sayı 2, ss. 614–626, 1989.
- [65] J. H. Chow ve J. J. Sanchez-Gasca, "Pole-placement designs of power system stabilizers," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 4, sayı 1, ss. 271-277, 1989.
- [66] A. Ghosh, G. Ledwich, O. P. Malik ve G. S. Hope, "Power system stabilizer based on adaptive control techniques," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, sayı 8, ss. 1983-1989, 1984.
- [67] N. Ghadimi, "A new hybrid algorithm based on optimal fuzzy controller in multimachine power system," *Complexity*, c. 21, sayı 1, ss. 78–93, 2015.
- [68] Y. L. Abdel-Magid ve M. A. Abido, "Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 18, sayı 3, ss. 1125-1132, 2003.
- [69] L. H. Hassan, M. Moghavvemi, H. A. F. Almurib, K. M. Muttaqi ve V. G. Ganapathy, "Optimization of power system stabilizers using participation factor and genetic algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 55, ss. 668–679, 2014.
- [70] M. A. Abido, "Optimal design of power-system stabilizers using particle swarm optimization; Optimal design of power-system stabilizers using particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 17, sayı 3, ss. 406-413, 2002.
- [71] M. A. Abido, "Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 15, sayı 3, ss. 297-304, 2000.

- [72] M. A. Abido ve Y. L. Abdel-Magid, "Eigenvalue assignments in multimachine power systems using tabu search algorithm," *Computers & Electrical Engineering*, c. 28, sayı 6, ss. 527–545, 2002.
- [73] S. Mishra, M. Tripathy ve J. Nanda, "Multi-machine power system stabilizer design by rule based bacteria foraging," *Electric Power Systems Research*, c. 77, sayı 12, ss. 1595–1607, 2007.
- [74] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, S. Jalilzadeh ve A. Safari, "Multi-machine power system stabilizers design using chaotic optimization algorithm," *Energy Conversion and Management*, c. 51, sayı 7, ss. 1572–1580, 2010.
- [75] S. M. Abd-Elazim, E. S. Ali, S. M. Abd-Elazim ve E. S. Ali, "Power system stability enhancement via bacteria foraging optimization algorithm," *Arabian Journal for Science and Engineering*, c. 38, ss. 599–611, 2013.
- [76] E. S. Ali, "Optimization of power system stabilizers using BAT search algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 61, ss. 683–690, 2014.
- [77] D. K. Sambariya ve R. Prasad, "Robust tuning of power system stabilizer for small signal stability enhancement using metaheuristic bat algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 61, ss. 229–238, 2014.
- [78] S. Yilmaz ve E. U. Küçüksille, "A new modification approach on bat algorithm for solving optimization problems," *Applied Soft Computing*, c. 28, ss. 259–275, 2015.
- [79] M. Mohammadi ve N. Ghadimi, "Optimal location and optimized parameters for robust power system stabilizer using honeybee mating optimization," *Complexity*, c. 21, sayı 1, ss. 242–258, 2014.
- [80] S. M. Abd Elazim ve E. S. Ali, "Optimal power system stabilizers design via cuckoo search algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 75, ss. 99–107, 2016.
- [81] N. N. Islam, M. A. Hannan, H. Shareef ve A. Mohamed, "An application of backtracking search algorithm in designing power system stabilizers for large multi-machine system," *Neurocomputing*, c. 237, ss. 175–184, 2017.
- [82] S. Ekinici, "Optimal design of power system stabilizer using sine cosine algorithm," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 34, sayı 3, ss. 1329–1350, 2019.
- [83] A. Sabo, N. Izzri Abdul Wahab, M. Lutfi Othman, M. Zurwatul Ahlam Mohd Jaffar, H. Beiranvand ve C. Aliyu Sabo, "Optimal design of power system stabilizer for multimachine power system using farmland fertility algorithm," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, c. 30, sayı 12, ss. e12657, 2020.
- [84] A. Farah, T. Guesmi, H. Hadj Abdallah ve A. Ouali, "A novel chaotic teaching-learning-based optimization algorithm for multi-machine power system stabilizers design problem," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 77, ss. 197–209, 2016.
- [85] D. Butti, S. K. Mangipudi ve S. R. Rayapudi, "An improved whale optimization algorithm for the design of multi-machine power system stabilizer," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, c. 30, sayı 5, ss. e12314, 2020.

- [86] B. M. Alshammari ve Tawfik Guesmi, “New chaotic sunflower optimization algorithm for optimal tuning of power system stabilizers,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, c. 15, sayı 3, ss. 1985–1997, 2020.
- [87] R. Devarapalli, B. Bhattacharyya, N. K. Sinha ve B. Dey, “Amended GWO approach based multi-machine power system stability enhancement,” *ISA Transactions*, c. 109, ss. 152–174, 2021.
- [88] R. Devarapalli ve B. Bhattacharyya, “A hybrid modified grey wolf optimization-sine cosine algorithm-based power system stabilizer parameter tuning in a multimachine power system,” *Optimal Control Applications and Methods*, c. 44, sayı 1, ss. 1143–1159, 2020.
- [89] Peter W. Sauer ve M. A. Pai, *Power System Stability and Control*, 3. Baskı. Londra, İngiltere: Pearson Education, 1998.
- [90] T. Guesmi, B. M. Alshammari, Y. Almalaq, A. Alateeq ve K. Alqunun, “New coordinated tuning of svc and pss in multimachine power system using coyote optimization algorithm,” *Sustainability*, c. 13, sayı 6, ss. 3131, 2021.
- [91] S. Panda, “Differential evolutionary algorithm for TCSC-based controller design,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, c. 17, sayı 10, ss. 1618–1634, 2009.
- [92] P. Kundur, *Power System Stability Controls*. New York, A. B. D.: McGraw-Hill, 1994.
- [93] E. S. Ali ve S. M. Abd-Elazim, “Coordinated design of PSSs and TCSC via bacterial swarm optimization algorithm in a multimachine power system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 36, sayı 1, ss. 84–92, 2012.
- [94] M. J. Neath, A. K. Swain, U. K. Madawala ve D. J. Thrimawithana, “An optimal PID controller for a bidirectional inductive power transfer system using multiobjective genetic algorithm,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 29, sayı 3, ss. 1523–1531, 2014.
- [95] T. Mahto ve V. Mukherjee, “Fractional order fuzzy PID controller for wind energy-based hybrid power system using quasi-oppositional harmony search algorithm,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, c. 11, sayı 13, ss. 3299–3309, 2017.
- [96] A. G. Khiabani ve R. Babazadeh, “Design of robust fractional-order lead-lag controller for uncertain systems,” *IET Control Theory & Applications*, c. 10, sayı 18, ss. 2447–2455, 2016.
- [97] C. F. Lu, C. H. Hsu ve C. F. Juang, “Coordinated control of flexible AC transmission system devices using an evolutionary fuzzy lead-lag controller with advanced continuous ant colony optimization,” *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 28, sayı 1, ss. 385–392, 2013.
- [98] S. Panda, “Differential evolution algorithm for SSSC-based damping controller design considering time delay,” *Journal of the Franklin Institute*, c. 348, sayı 8, ss. 1903–1926, 2011.
- [99] M. Eslami, H. Shareef, A. Mohamed ve M. Khajezadeh, “Gravitational search algorithm for coordinated design of PSS and TCSC as damping controller,” *Journal of Central South University*, c. 19, sayı 4, ss. 923–932, 2012.
- [100] M. Noroozian ve G. Andersson, “Damping of power system oscillations by use of

- controllable components,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 9, sayı 4, ss. 2046–2054, 1994.
- [101] H. F. Wang, F. J. Swift ve M. Li, “A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations, Part II: Multi-machine power systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 17, sayı 2, ss. 41, 1997.
 - [102] X. R. Chen, N. C. Pahalawaththa, U. D. Annakkage ve C. S. Kumble, “Controlled series compensation for improving the stability of multi-machine power systems,” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, c. 142, sayı 4, ss. 361–366, 1995.
 - [103] J. Chang ve J. H. Chow, “Time optimal series capacitor control for damping inter-area modes in interconnected power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 12, sayı 1, ss. 215–221, 1997.
 - [104] B. H. Li, Q. H. Wu, D. R. Turner, P. Y. Wang ve X. X. Zhou, “Modelling of TCSC dynamics for control and analysis of power system stability,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 22, sayı 1, ss. 43–49, 2000.
 - [105] L. Fan, A. Feliachi ve K. Schoder, “Selection and design of a TCSC control signal in damping power system inter-area oscillations for multiple operating conditions,” *Electric Power Systems Research*, c. 62, sayı 2, ss. 127–137, 2002.
 - [106] P. S. Kumar, “Transient stability enhancement of power system using TCSC,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, c. 2, sayı 3, ss. 317–324, 2012.
 - [107] A. Halder, N. Pal ve D. Mondal, “Transient stability analysis of a multimachine power system with TCSC controller – A zero dynamic design approach,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 97, sayı Kasım 2017, ss. 51–71, 2018.
 - [108] H. Nazaripouya ve S. Mehraeen, “Modeling and nonlinear optimal control of weak/islanded grids using FACTS device in a game theoretic approach,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, c. 24, sayı 1, ss. 158–171, 2016.
 - [109] T. T. Lie, G. B. Shrestha ve A. Ghosh, “Design and application of a fuzzy logic control scheme for transient stability enhancement in power systems,” *Electric Power Systems Research*, c. 33, sayı 1, ss. 17–23, 1995.
 - [110] Y. L. Abdel-Magid ve M. A. Abido, “Robust coordinated design of excitation and TCSC-based stabilizers using genetic algorithms,” *Electric Power Systems Research*, c. 69, sayı 2–3, ss. 129–141, 2004.
 - [111] Q. Zhao ve J. Jiang, “A TCSC damping controller design using robust control theory,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 20, sayı 1, ss. 25–33, 1998.
 - [112] X. Dai, J. Liu, Y. Tang, N. Li ve H. Chen, “Neural network α -th-order inverse control of thyristor controlled series compensator,” *Electric Power Systems Research*, c. 45, sayı 1, ss. 19–27, 1998.
 - [113] S. Panda, “Multi-objective non-dominated shorting genetic algorithm-II for excitation and TCSC-based controller design,” *Journal of Electrical Engineering*, c. 60, sayı 2, ss. 86–93, 2009.
 - [114] M. A. Abido, “Pole placement technique for PSS and TCSC-based stabilizer

- design using simulated annealing,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 22, sayı 8, ss. 543–554, 2000.
- [115] S. Panda ve N. P. Padhy, “Matlab/Simulink based model of single- machine infinite-bus with TCSC for stability studies and tuning employing GA,” *International Journal of Energy and Power Engineering*, c. 1, sayı 1, ss. 560–569, 2007.
 - [116] S. Panda ve N. P. Padhy, “Coordinated design of TCSC controller and PSS employing particle swarm optimization technique,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, c. 1, sayı 4, ss. 706–714, 2007.
 - [117] H. Shayeghi, A. Safari ve H. A. Shayanfar, “PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system,” *Energy Conversion and Management*, c. 51, sayı 12, ss. 2930–2937, 2010.
 - [118] S. Panda, “Multi-objective PID controller tuning for a FACTS-based damping stabilizer using Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 33, sayı 7, ss. 1296–1308, 2011.
 - [119] R. Sethi, S. Panda, ve B. P. Sahoo, “Cuckoo search algorithm based optimal tuning of PID structured TCSC controller,” *Proceedings of the International Conference on CIDM*, c. 31, 2015, ss. 251–263.
 - [120] G. Naresh, M. Ramalinga Raju ve S. V. L. Narasimham, “Coordinated design of power system stabilizers and TCSC using cat swarm optimization algorithm,” *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 9, sayı 15, ss. 7247–7262, 2016.
 - [121] G. Shahgholian, A. Movahedi ve J. Faiz, “Coordinated design of TCSC and PSS controllers using VURPSO and Genetic algorithms for multi-machine power system stability,” *International Journal of Control, Automation and Systems*, c. 13, sayı 2, ss. 398–409, 2015.
 - [122] N. N. Islam, M. A. Hannan, A. Mohamed ve H. Shareef, “Improved power system stability using backtracking search algorithm for coordination design of PSS and TCSC damping controller,” *PLoS One*, c. 11, sayı 1, ss. 1–17, 2016.
 - [123] M. Alomoush, “Concurrent optimal design of TCSC and PSS using symbiotic organisms search algorithm,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, c. 25, sayı 5, ss. 3904–3919, 2017.
 - [124] N. Agrawal ve M. Gowda, “Comparison of damping control performance of PID, PSS and TCSC controllers by moth flame optimization algorithm,” *INFOCOMP Journal of Computer Science*, c. 21, sayı 1, ss. 1–8, 2022.
 - [125] A. D. Del Rosso, C. A. Cañizares ve V. M. Doña, “A Study of TCSC controller design for power system stability improvement,” *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 18, sayı 4, ss. 1487–1496, 2003.
 - [126] M. A. Abido ve Y. L. Abdel-Magid, “Power system stability enhancement via coordinated design of a PSS and an SVC-based controller,” *10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, c. 2, 2003, ss. 850–853.
 - [127] S. García, A. Fernández, J. Luengo ve F. Herrera, “Advanced nonparametric tests for multiple comparisons in the design of experiments in computational intelligence and data mining: Experimental analysis of power,” *Information Sciences*, c. 180, sayı 10, ss. 2044–2064, 2010.

8. EKLER

8.1. EK 1: K_1 - K_6 SABİTLERİNİN DENKLEMLERİ

Bölüm 3.3'te verilen güç sisteminin doğrusallaştırılmasında kullanılan denklemler, K sabit terimleriyle ifade edilir. Buna göre, Denklem (3.7)'de yer alan K_1 - K_6 sabitlerine ait denklemler aşağıda verildiği gibi ifade edilir [59], [89]:

$$K_1 = -\frac{1}{\Delta} \left[I_q^o V_\infty (X_d' - X_q) \{ (X_q + X_e) \sin \delta^o - R_e \cos \delta^o \} \right. \\ \left. + V_\infty \{ (X_d' - X_q) I_d^o - E_q'^o \} \{ (X_d' + X_e) \cos \delta^o + R_e \sin \delta^o \} \right] \quad (8.1)$$

$$K_2 = \frac{1}{\Delta} \left[I_q^o \Delta - I_q^o (X_d' - X_q) (X_q + X_e) - R_e (X_d' - X_q) I_d^o + R_e E_q'^o \right] \quad (8.2)$$

$$\frac{1}{K_3} = 1 + \frac{(X_d - X_d') (X_q + X_e)}{\Delta} \quad (8.3)$$

$$K_4 = \frac{V_\infty (X_d - X_d')}{\Delta} \left[(X_q + X_e) \sin \delta^o - R_e \cos \delta^o \right] \quad (8.4)$$

$$K_5 = \frac{1}{\Delta} \left\{ \frac{V_d^o}{V_t} X_q \left[R_e V_\infty \sin \delta^o + V_\infty \cos \delta^o (X_d' + X_e) \right] \right. \\ \left. + \frac{V_q^o}{V_t} \left[X_d' (R_e V_\infty \cos \delta^o - V_\infty (X_q + X_e) \sin \delta^o) \right] \right\} \quad (8.5)$$

$$K_6 = \frac{1}{\Delta} \left\{ \frac{V_d^o}{V_t} X_q R_e - \frac{V_q^o}{V_t} X_d' (X_q + X_e) \right\} + \frac{V_q^o}{V_t} \quad (8.6)$$

8.2. EK 2: IEEE CEC 2014 KIYASLAMA PROBLEMLERİ

Çizelge 8.1. CEC 2014 test fonksiyonları.

Fonksiyon Tipi	Fonksiyon No	Fonksiyon	Global Optimum
Tek-modlu	1	Döndürülmüş Yüksek Koşullu Elliptic Fonksiyon	100
	2	Döndürülmüş Bent Cigar Fonksiyonu	200
	3	Döndürülmüş Discus İşlevi	300
Çok-modlu	4	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Rosenbrock Fonksiyonu	400
	5	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Ackley Fonksiyonu	500
	6	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Weierstrass Fonksiyonu	600
	7	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Griewank Fonksiyonu	700
	8	Kaydırılmış Rastrigin Fonksiyonu	800
	9	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Rastrigin Fonksiyonu	900
	10	Kaydırılmış Schwefel Fonksiyonu	1000
	11	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Schwefel Fonksiyonu	1100
	12	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Katsuura Fonksiyonu	1200
	13	Kaydırılmış ve Döndürülmüş HappyCat Fonksiyonu	1300
	14	Kaydırılmış ve Döndürülmüş HGBat Fonksiyonu	1400
	15	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Genişletilmiş Griewank+ Rosenbrock Fonksiyonu	1500
	16	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Genişletilmiş Scaffer F6 Fonksiyonu	1600
Hibrit	17	Hibrit Fonksiyon 1 (N=3)	1700
	18	Hibrit Fonksiyon 2 (N=3)	1800
	19	Hibrit Fonksiyon 3 (N=4)	1900
	20	Hibrit Fonksiyon 4 (N=4)	2000
	21	Hibrit Fonksiyon 5 (N=5)	2100
	22	Hibrit Fonksiyon 6 (N=5)	2200
Kompozisyon (Birleşik)	23	Kompozisyon Fonksiyon 1 (N=5)	2300
	24	Kompozisyon Fonksiyon 2 (N=3)	2400
	25	Kompozisyon Fonksiyon 3 (N=3)	2500
	26	Kompozisyon Fonksiyon 4 (N=5)	2600
	27	Kompozisyon Fonksiyon 5 (N=5)	2700
	28	Kompozisyon Fonksiyon 6 (N=5)	2800
	29	Kompozisyon Fonksiyon 7 (N=3)	2900
	30	Kompozisyon Fonksiyon 8 (N=3)	3000
Arama Uzayı: [-100, 100] ^D			

8.3. EK3:IEEE CEC2017 KIYASLAMA PROBLEMLERİ

Çizelge 8.2. CEC 2017 test fonksiyonları.

Fonksiyon Tipi	Fonksiyon No	Fonksiyon	Global Optimum
Tek-modlu	1	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Bent Cigar Fonksiyonu	100
	2	Farklı Güç Fonksiyonunun Kaydırılmış ve Döndürülmüş Toplamı	200
	3	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Zakharov Fonksiyonu	300
Çok-modlu	4	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Rosenbrock Fonksiyonu	400
	5	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Rastrigin Fonksiyonu	500
	6	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Genişletilmiş Scaffer F6 Fonksiyonu	600
	7	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Lunacek Bi_Rastrigin Fonksiyonu	700
	8	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Sürekli Olmayan Rastrigin Fonksiyonu	800
	9	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Levy Fonksiyonu	900
	10	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Schwefel Fonksiyonu	1000
Hibrit	11	Zakharov, Rosenbrock ve Rastrigin Hibrit Fonksiyonu	1100
	12	Yüksek Koşullu Elliptic, Modifiye Schwefel ve Bent Cigar Hibrit Fonksiyonu	1200
	13	Bent Cigar, Rosenbrock ve Lunache Bi-Rastrigin Hibrit Fonksiyonu	1300
	14	Elliptic, Ackley, Schaffer ve Rastrigin Hibrit Fonksiyonu	1400
	15	Bent Cigar, HGBat, Rastrigin ve Rosenbrock Hibrit Fonksiyonu	1500
	16	Genişletilmiş Schaffer, HGBat, Rosenbrock ve Modifiye Schwefel Hibrit Fonksiyonu	1600
	17	Katsuura, Ackley, Genişletilmiş Griewank ve Rosenbrock, Modifiye Schwefel ve Rastrigin Hibrit Fonksiyonu	1700
	18	Yüksek koşullu Elliptic, Ackley, Rastrigin, HGBat ve Discus Hibrit Fonksiyonu	1800
	19	Bent Cigar, Rastrigin, Genişletilmiş Griewank ve Rosenbrock, Weierstrass ve genişletilmiş Schaffer Hibrit Fonksiyonu	1900
	20	Happycat, Katsuura, Ackley, Rastrigin, Modifiye Schwefel ve Schaffer Hibrit Fonksiyonu	2000

Çizelge 8.2 (devamı). CEC 2017 test fonksiyonları.

Kompozisyon (Birleşik)	21	Rosenbrock, Yüksek Koşullu Elliptic ve Rastrigin Kompozisyon Fonksiyonu	2100
	22	Rastrigin, Griewank ve Modifiye Schwefel Kompozisyon Fonksiyonu	2200
	23	Rosenbrock, Ackley, Modifiye Schwefel ve Rastrigin Kompozisyon Fonksiyonu	2300
	24	Ackley, Yüksek Koşullu Elliptic, Griewank ve Rastrigin Kompozisyon Fonksiyonu	2400
	25	Rastrigin, HappyCat, Ackley, Discus ve Rosenbrock Kompozisyon Fonksiyonu	2500
	26	Genişletilmiş Scaffer, Modifiye Schwefel, Griewank, Rosenbrock ve Rastrigin Kompozisyon Fonksiyonu	2600
	27	HGBat, Rastrigin, Modifiye Schwefel, Bent Cigar, Yüksek Koşullu Elliptic ve Genişletilmiş Scaffer Kompozisyon Fonksiyonu	2700
	28	Ackley, Griewank, Discus, Rosenbrock, HappyCat, Genişletilmiş Scaffer Kompozisyon Fonksiyonu	2800
	29	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Rastrigin, Genişletilmiş Schaffer ve Lunacek Bi_Rastrigin Kompozisyon Fonksiyonu	2900
	30	Kaydırılmış ve döndürülmüş Rastrigin, Sürekli Olmayan Rastrigin ve Levy Kompozisyon Fonksiyonu	3000
Arama Uzayı: [-100, 100] ^D			

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Enes KAYMAZ

Yabancı Dili :İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2023
Y. Lisans	Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2016
Lise	Matematik /Fen	Erdem Koleji Fen Lisesi	2011

TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR

1. E. Kaymaz, U. Güvenç ve M. K. Döşoğlu, “Optimal PSS design using FDB-based social network search algorithm in multi-machine power systems”, *Neural Computing and Applications*, c. 35, sayı 17, ss. 12627-12653, 2023.
2. E. Kaymaz, U. Güvenç ve M. K. Döşoğlu, “Tuning the parameters of power system stabilizer using runge kutta algorithm”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 9, sayı 6, ss. 95-111, 2021.
3. E. Kaymaz, U. Güvenç ve M. K. Döşoğlu, “Küçük sinyal kararlılığı için uygunluk-mesafe dengesi tabanlı parçaçık sürü optimizasyonu ile güç sistemi kararlı kılıcısının en uygun tasarımı”, *International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering (ICAIAME)*, Bakü, Azerbaycan, 2022.

DİĞER YAYINLAR

1. E. Kaymaz, S. Duman ve U. Güvenç, “Optimal power flow solution with stochastic wind power using the Lévy coyote optimization algorithm”, *Neural Computing and Applications*, c. 33, ss. 6775-6804, 2021.

2. M. K. Döşoğlu ve E. Kaymaz (Baskıda). Güç Sistemlerinde Farklı Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı Modellerin Sekonder Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkileri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*.
3. M. K. Döşoğlu, E. Kaymaz ve M. Demirbaş, “Güç sistemlerinde çoklu SVC kullanımı ile statik gerilim kararlılığının iyileştirilmesi”, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, c.14, sayı 2, ss. 66-74, 2022.
4. M. K. Döşoğlu, U. Güvenç ve E. Kaymaz, “Sliding Mode Control Based Supercapacitor Modeling for Dynamic Stability in DFIG Based Wind Turbines”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c.10 sayı 3, ss.1118-1135, 2022.
5. M. K. Döşoğlu ve E. Kaymaz, “Güç Sistemlerinde Çoklu TCSC Modeli Kullanılarak Statik Gerilim Kararlılığının İyileştirilmesi”, *Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar*, İzmir, Türkiye: Duvar Yayınevi, 2022, ss.93-108,
6. M. K. Döşoğlu ve E. Kaymaz, “TCSC-Yakıt Hücresinin Güç Sistemlerinde Statik Gerilim Kararlılığı Üzerindeki Etkileri”, *3th International Black Sea Modern Scientific Research Congress*, Samsun, 2023,ss 110-117.
7. M. K. Döşoğlu ve E. Kaymaz, “Güç Sistemlerinde Türbin Yönetici Modellerin Sekonder Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi”, *3th International Black Sea Modern Scientific Research Congress*, Samsun, 2023,ss 118-126.
8. M. K. Döşoğlu ve E. Kaymaz “SSSC-Yakıt Hücresi Kullanılarak Güç Sistemlerinde Statik Gerilim Kararlılığının İncelenmesi”, *Anadolu 12th International Conference On Applied Sciences*, Diyarbakır, 2023, ss 148-156.
9. M. K. Döşoğlu ve E. Kaymaz “Güç Sistemlerinde Aşırı Uyarım Sınırlandırıcı Modelin Sekonder Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkilerin İncelenmesi” *Anadolu 12th International Conference On Applied Sciences*, Diyarbakır, 2023, ss 140-147.
10. M. K. Döşoğlu ve E. Kaymaz, “Güç Sistemlerinde Oto-Transformatörün Gerilim Kararlılığı Üzerindeki Etkileri”, *4th International Black Sea Modern Scientific Research Congress*, Rize, 2023 ss.546-552.
11. M. K. Döşoğlu ve E. Kaymaz, “Güç Sistemlerinde Üstel Yük Modelinin Güç Akışı ve Kayıplar Üzerindeki Etkisi”, *4th International Black Sea Modern Scientific Research Congress*, Rize, 2023, ss.553-561.
12. E. Kaymaz, M. K. Döşoğlu ve S. Duman, “Güç Sistemlerinde Frekansa Bağlı Yük Modelinin Güç Akışı ve Kayıplar Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi”, *International Scientific Research Congress Dedicated to the 30'th Anniversary of Baku Eurasia University*, Baku Azarbaijan, 2022, ss. 296-304.
13. E. Kaymaz, M. K. Döşoğlu, M. Demirbaş ve S. Duman, “Karma Yük Modelinin Güç Akışı ve Kayıplar Üzerindeki Etkisi”, *Bursa 3rd International Conference on Scientific Researches*, Bursa, 2022, ss.750-760.
14. M. K. Döşoğlu ve E. Kaymaz, “Güç Sistemlerinde Gerilime Bağlı Yük Modelinin Güç Akışı ve Kayıplar Üzerindeki Etkisi”, *4'th Hagia Sophia International Conference On Multidisciplinary Scientific Studies*, Istanbul, 2022, ss.873-880.
15. M. K. Döşoğlu, E. Kaymaz ve M. Demirbaş, “Güç Sistemlerinde Farklı Baralardaki Zıp Yük Modelinin Yük Akışı ve Kayıplar Üzerindeki Etkisi”, *Al-Farabi International Congress On Applied Sciences – II*, Nakhchivan, Azerbaijan, 2021, ss.522-529.

16. E. Kaymaz, M. K. Döşoğlu ve U. Güvenç, “Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı Modelleri ile Gerilim Kararlılığı Analizi”, *4th International Nowruz Conference On Scientific Research, Karabağ, Azarbaijan*, 2021, c.1 ss.453-465.
17. E. Kaymaz, U. Güvenç ve M. K. Döşoğlu, “Lévy Mayıs Sineği Optimizasyon Algoritması”, *4th International Nowruz Conference On Scientific Research, Karabağ, Azarbaijan*, 2021, ss.466-481.
18. E. Kaymaz, U. Güvenç ve M. K. Döşoğlu, “Mayıs Sineği Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Ekonomik Yük Dağıtımı”, *II. International Hazar Scientific Researches Conference*, Bakü, Azarbaijan, 2021, ss.774-785.
19. E. Kaymaz, M. K. Döşoğlu ve U. Güvenç, “Güç Sistemlerinde Farklı Otomatik Gerilim Regülatörü Modelleri ile Gerilim Kararlılığı Analizi ”, *II. International Hazar Scientific Researches Conference*, Bakü, Azarbaijan, 2021, ss.786-797.
20. M. K. Döşoğlu, E. Kaymaz ve G. Poyraz, “SVC’nin farklı çalışma koşullarındaki gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, *2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology*, 2020, ss.797-804.
21. M. Demirbaş, E. Kaymaz ve M. K. Döşoğlu, “Güç Sistemlerinde Senkron Generatör Modelleri İle Gerilim Kararlılığı Analizinin İncelenmesi”, *In International Marmara Sciences Congress*, 2020, ss.415.
22. U. Güvenç ve E. Kaymaz , “Economic dispatch integrated wind power using coyote optimization algorithm. In 2019 7th international Istanbul smart grids and cities congress and fair (ICSG), 2019 ss. 179-183.
23. E. Kaymaz, Y. Hınıslioğlu ve U. Güvenç, “Optimal güç akışı probleminin kır kurdu algoritması ile çözümü,” *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (IMASCON-2019-Bahar)*, Kocaeli, Türkiye, 2019.
24. Y. Hınıslioğlu, E. Kaymaz ve U. Güvenç, “Ekonomik yük dağıtımı probleminin kaotik güve sürüsü algoritması ile çözümü,” *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (IMASCON-2019-Bahar)*, Kocaeli, Türkiye, 2019.
25. U. Güvenç ve E. Kaymaz, “Economic load dispatch problem using coyote optimization algorithm”, *International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering (ICAIAME-2019)*, Antalya/Turkey, 2019.
26. U. Güvenç ve E. Kaymaz, “Kır Kurdu Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Rüzgar Gücü Entegreli Ekonomik Emisyon Yük Dağıtımı”, *2nd International Turkish World Engineering and Science Congress*, Antalya, Turkey, 2019, ss.359-371.
27. U. Güvenc, S. Duman, E. Kaymaz ve H. H. Sayan, “Dynamic economic dispatch integrated wind power using salp swarm algorithm,” *IV. INES International Academic Research Congress (INES – 2018)*, Antalya, Turkey, 2018, ss. 1529-1535.
28. U. Güvenç, E. Kaymaz ve S. Duman, “Economic dispatch of power system including wind power using salp swarm algorithm,” *7th International Conference on Advanced Technologies (ICAT'18)*, Antalya, Turkey, 2018.