



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI İLE ENERJİ
HUB OPTİMİZASYONU**

BURÇİN ÖZKAYA

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. UĞUR GÜVENÇ**

DÜZCE, 2022

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI İLE ENERJİ
HUB OPTİMİZASYONU

Burçin ÖZKAYA 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

Prof. Dr. Okan BİNGÖL

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Hamdi Tolga KAHRAMAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Okan BİNGÖL

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Serhat DUMAN

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi

Doç. Dr. Serdar BİROĞUL

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Serdar PAÇACI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 28/06/2022

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.

28 Haziran 2022

Burçin ÖZKAYA



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.

Lisansüstü eğitimim boyunca akademik danışmanlığı yapan ve tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen eş danışmanım Prof. Dr. Okan BİNGÖL'e teşekkür ederim.

Değerli zamanlarını ayırarak tez çalışmasının kalitesini artırmaya yönelik katkıları, yapıcı yorumları ve süreç boyunca desteklerinden dolayı Prof. Dr. Hamdi Tolga KAHRAMAN ve Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU'na en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tezime değerli yorumlarıyla katkı sağlayan Doç. Dr. Serhat DUMAN ve Doç. Dr. Serdar BİROĞUL hocalarıma teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca bilimsel ve manevi desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Serdar PAÇACI'ya teşekkür ederim.

Asistanlığa başladığım günden beri her zaman yanımda olan ve manevi desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Serap ERGÜN'e ve Arş. Gör. Cemal IŞILAK'a teşekkür ederim.

Karşılaştığım her zorlukta beni motive eden ve her zaman desteklerini sunan değerli hocalarım Doç. Dr. İsmail Serkan ÜNCÜ ve Dr. Öğr. Üyesi Kubilay TAŞDELEN'e teşekkür ederim.

Simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmemde donanımsal destek sağlayan Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Dekanlığı'na ve Bilgi İşlem Daire Başkanı Dr. Öğr. Üyesi Tuna GÖKSU'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen babama, anneme ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
EXTENDED ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ HUB OPTİMİZASYON PROBLEMİ	16
2.1. ENERJİ HUBIN MATEMATİKSEL MODELİ	16
2.2. ENERJİ KAYNAKLARININ MALİYET MODELLERİ	41
2.2.1. Elektrik Enerji Taşıyıcısının Maliyet Modeli	41
2.2.2. Doğalgaz ve Isı Enerji Taşıyıcılarının Maliyet Modeli	42
2.2.3. Rüzgar Enerji Taşıyıcısının Maliyet Modeli.....	42
2.2.4. Güneş Enerji Taşıyıcısının Maliyet Modeli	43
2.3. AMAÇ FONKSİYONLARI.....	44
2.3.1. Toplam Enerji Hub Maliyetinin Minimizasyonu.....	44
2.3.2. Toplam Enerji Hub Kayıplarının Minimizasyonu.....	45
2.3.3. Toplam Enerji Hub Maliyetinin ve Kayıplarının Minimizasyonu	45
2.3.4. Eşitlik ve Eşitsizlik Kısıtları	45
2.3.4.1. Eşitlik kısıtları.....	45
2.3.4.2. Eşitsizlik kısıtları.....	46
2.3.5. Uygunluk Fonksiyonu	46
2.4. RÜZGAR VE GÜNEŞ ENERJİSİNİN BELİRSİZ GÜÇ MODELİ.....	46
2.4.1. Rüzgar ve Güneş Enerjisinin Olasılık Dağılımı	46
2.4.2. Rüzgar ve Güneş Santralinin Güç Modeli	47
3. YÖNTEM	50
3.1. META-SEZGİSEL OPTİMİZASYON SÜRECİ.....	50
3.2. DİFERANSİYEL EVRİM ALGORİTMASI	52
3.3. ÖNERİLEN FDB-LSHADESPACMA ALGORİTMASI	54
3.3.1. LSHADESPACMA Algoritmasına Genel Bakış	54
3.3.1.1. LSHADE Algoritması.....	55
3.3.1.2. CMA-ES Algoritması	56
3.3.1.3. Yarı Parametre Uyarlama Yöntemi	57
3.3.1.4. LSHADESPACMA Hibridizasyon Süreci.....	58
3.3.2. Uygunluk-Mesafe Dengesi Seçim Yöntemi	61
3.3.3. FDB-LSHADESPACMA Algoritması Tasarımı	63
4. SİMÜLASYON SONUÇLARI.....	67
4.1. DENEYSEL AYARLAR	67

4.2. FDB-LSHADESPACMA ALGORİTMASININ CEC 2017 VE CEC 2020 KİYASLAMA PROBLEMLERİNDE TEST EDİLMESİ	69
4.2.1. İstatistiksel Analiz	69
4.2.2. Yakınsama Analizi	83
4.3. FDB-LSHADESPACMA VE MSA ALGORİTMALARININ CEC2017 VE CEC2020 KİYASLAMA PROBLEMLERİNDE TEST EDİLMESİ	87
4.3.1. İstatistiksel Analiz	87
4.3.2. Yakınsama Analizi	96
4.4. FDB-LSHADESPACMA VE MSA ALGORİTMALARININ ENERJİ HUB OPTİMİZASYON PROBLEMLERİ İÇİN SİMÜLASYON SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMALARI	99
4.4.1. Durum-1 için Simülasyon Sonuçları.....	100
4.4.2. Durum-2 için Simülasyon Sonuçları.....	102
4.4.3. Durum-3 için Simülasyon Sonuçları.....	104
4.4.4. Durum-4 için Simülasyon Sonuçları.....	106
4.4.5. Durum-5 için Simülasyon Sonuçları.....	108
4.4.6. Durum-6 için Simülasyon Sonuçları.....	110
4.4.7. Durum-7 için Simülasyon Sonuçları.....	112
4.4.8. Durum-8 için Simülasyon Sonuçları.....	114
4.4.9. Durum-9 için Simülasyon Sonuçları.....	116
4.4.10. Durum-10 için Simülasyon Sonuçları.....	118
4.4.11. Durum-11 için Simülasyon Sonuçları.....	125
4.4.12. Durum-12 için Simülasyon Sonuçları.....	132
4.4.13. İstatistiksel Analiz ve Yakınsama Analizi.....	139
5. SONUÇLAR.....	156
6. KAYNAKLAR	159
7. EKLER	166
7.1. EK 1: CEC2017 TEST FONKSİYONLARI	166
7.2. EK 2: CEC2020 TEST FONKSİYONLARI	168
7.3. EK 3: ENERJİ HUB MODELLERİNİN VERİMLİLİK KATSAYILARI .	169
7.4. EK 4: ENERJİ HUB MODELLERİNİN MALİYET KATSAYILARI.....	171
ÖZGEÇMİŞ	176

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Basit bir EH modeli.	17
Şekil 2.2. EH modelinin genel yapısı.	19
Şekil 2.3. Önerilen EH yapıları.....	38
Şekil 4.1. CEC2017 kıyaslama takımından seçilen problemlerin box-plot grafikleri. ...	78
Şekil 4.2. CEC2020 kıyaslama takımından seçilen problemlerin box-plot grafikleri. ...	81
Şekil 4.3. CEC2017 kıyaslama takımından seçilen problem tipleri için yakınsama eğrileri.	84
Şekil 4.4. CEC2017 kıyaslama takımından seçilen problem tipleri için box-plot grafikleri.	94
Şekil 4.5. CEC2020 kıyaslama takımından seçilen problem tipleri için yakınsama eğrileri.	97
Şekil 4.6. Box-plot grafikleri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.	143
Şekil 4.7. Algoritmaların yakınsama eğrileri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.	150

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Rüzgar ve güneş enerji santrallerinin parametreleri [60].	49
Çizelge 3.1. MSA algoritmalarının optimizasyon sürecindeki genel adımları.	52
Çizelge 3.2. LSHADESPACMA algoritmasının sözde kodu.	59
Çizelge 3.3. FDB-LSHADESPACMA versiyonlarının matematiksel modeli.	64
Çizelge 3.4. FDB-LSHADESPACMA algoritmasının sözde kodu.	65
Çizelge 4.1. MSA algoritmalarının parametre ayarları.	68
Çizelge 4.2. LSHADESPACMA ve FDB-LSHADESPACMA versiyonları için Friedman testi ile elde edilen sıralama sonuçları.	70
Çizelge 4.3. LSHADESPACMA ve FDBLSHADESPACMA versiyonları arasında Wilcoxon ikili karşılaştırma sonuçları.	71
Çizelge 4.4. Farklı problem tipleri için LSHADESPACMA ve FDB- LSHADESPACMA versiyonlarının Friedman sıralaması.	72
Çizelge 4.5. CEC 2017 test problemleri için elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri.	74
Çizelge 4.6. FDB-LSHADESPACMA ve rakip MSA algoritmaları için Friedman testi ile elde edilen sıralama sonuçları.	87
Çizelge 4.7. FDB-LSHADESPACMA ve rakip MSA algoritmaları arasında Wilcoxon ikili karşılaştırma sonuçları.	88
Çizelge 4.8. Farklı problem tipleri için FDB-LSHADESPACMA ve rakip MSA algoritmaları arasında Friedman sıralama sonuçları.	89
Çizelge 4.9. CEC 2020 test problemleri için elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri.	91
Çizelge 4.10. Enerji hub test sistemleri.	99
Çizelge 4.11. Simülasyon çalışmalarında kullanılan test senaryoları.	100
Çizelge 4.12. Durum-1 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.	101
Çizelge 4.13. Durum-1 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	102
Çizelge 4.14. Durum-2 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.	103
Çizelge 4.15. Durum-2 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	104
Çizelge 4.16. Durum-3 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.	105
Çizelge 4.17. Durum-3 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	106
Çizelge 4.18. Durum-4 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.	107
Çizelge 4.19. Durum-4 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	108
Çizelge 4.20. Durum-5 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.	109
Çizelge 4.21. Durum-5 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	110
Çizelge 4.22. Durum-6 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.	111
Çizelge 4.23. Durum-6 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	112
Çizelge 4.24. Durum-7 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.	113
Çizelge 4.25. Durum-7 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	114
Çizelge 4.26. Durum-8 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.	115
Çizelge 4.27. Durum-8 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama	

ve standart sapma uygunluk değerleri.	116
Çizelge 4.28. Durum-9 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.	117
Çizelge 4.29. Durum-9 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	118
Çizelge 4.30. Durum-10 için algoritmalarından elde edilen optimal sonuçları değerleri.	119
Çizelge 4.31. Durum-10 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	125
Çizelge 4.32. Durum-11 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları. ..	126
Çizelge 4.33. Durum-11 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	132
Çizelge 4.34. Durum-12 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları. ..	133
Çizelge 4.35. Durum-12 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.	139
Çizelge 4.36. On iki durum çalışması için algoritmaların Friedman sıralama sonuçları.	140
Çizelge 4.37. On iki durum çalışması için Wilcoxon ikili işaret testi sonuçları.....	142
Çizelge 7.1. CEC2017 Test Fonksiyonları [91].	166
Çizelge 7.2. CEC2020 Test Fonksiyonları [92].	168
Çizelge 7.3. EH yapılarının verimlilik katsayıları.	169
Çizelge 7.4. EH yapılarındaki enerji taşıyıcılarının maliyet katsayıları.	171

KISALTMALAR

AEFA	Artificial Electric Field Algorithm
AEO	Artificial Ecosystem-Based Optimization
AGDE	Adaptive Guided Differential Evolution Algorithm
BMO	Barnacle Mating Optimizer
CHCP	Combined Heat, Cooling and Power
CHP	Combined Heat and Power
COA	Coyote Optimization Algorithm
CONV	Dönüştürücü
DE	Differential Evolution
EH	Enerji Hub
EHED	Enerji Hub Ekonomik Dağıtım
EO	Equilibrium Optimizer
FDB	Fitness-Distance Balance
GA	Genetic Algorithm
GF	Gaz Fırını
GSA	Gravitational Search Algorithm
HE	Isı Dönüştürücüsü
INV	Evirici
LSHADE	Linear Population Size Reduction Success History Based Adaptive Differential Evolution
LSHADESPACMA	LSHADE with Semi-Parameter Adaptation Hybrid with CMA-ES
MEC	Çoklu Enerji Taşıyıcıları
MES	Çoklu Enerji Sistemleri
MFO	Moth Flame Optimization
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MPA	Marine Predators Algorithm
MSA	Meta-Sezgisel Arama
OF	Amaç Fonksiyonu
OPD	Optimal Power Dispatch
OPF	Optimal Power Flow
PDF	Probability Density Function
pu	Per-unit
SDO	Supply-Demand-Based Optimization
SSA	Salp Swarm Algorithm

SİMGELER

n_T	Transformatörün verimlilik katsayısı
n_{CONV}	Dönüştürücünün verimlilik katsayısı
n_{INV}	Eviricinin verimlilik katsayısı
n_{CHPe}	CHP'nin elektrik ile ilişkili verimlilik katsayısı
n_{CHPh}	CHP'nin ısı ile ilişkili verimlilik katsayısı
n_{CHPe}	CHCP'nin elektrik ile ilişkili verimlilik katsayısı
n_{CHPh}	CHCP'nin ısı ile ilişkili verimlilik katsayısı
n_{CHPc}	CHCP'nin soğutma ile ilişkili verimlilik katsayısı
n_{Ch}	Kompresörün ısı ile ilişkili verimlilik katsayısı
n_{Ca}	Kompresörün basınçlı hava ile ilişkili verimlilik katsayısı
n_{GF}	Gaz fırınının verimlilik katsayısı
n_{HE}	Isı dönüştürücüsünün verimlilik katsayısı

ÖZET

SEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI İLE ENERJİ HUB OPTİMİZASYONU

Burçin ÖZKAYA

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

Haziran 2022, 175 sayfa

Bu tez çalışmasında, rüzgar ve güneş enerjisi entegreli bir enerji hub (EH) modeli önerilmiştir. Önerilen modelin optimizasyonu için hibrit bir algoritma geliştirilmiştir. Bu kapsamda, tez çalışmasında genel olarak iki konu üzerinde çalışılmıştır. İlk olarak, enerji hub girişindeki enerji kaynaklarının elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğal gaz ve ısı olduğu, çıkışta ise elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı hava üretilen bir model önerilmiştir. Bu model temel alınarak 69 EH yapısı oluşturulmuştur. Bu EH yapıları kullanılarak, dört farklı boyutta test sistemi oluşturulmuştur. EH optimizasyonunun ele alındığı çalışmada, toplam enerji hub maliyetinin minimize edilmesi, toplam enerji hub kayıplarının minimize edilmesi ve hem enerji hub maliyetinin hem de kayıplarının minimize edilmesi olarak üç amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Literatürde toplam enerji hub maliyetinin minimize edildiği problemlerin aksine, bu çalışmada rüzgar ve güneş enerjisinin maliyet modeli doğrudan maliyet, ceza maliyeti ve rezerv maliyeti olarak hesaplanmıştır. Böylelikle, literatüre yeni bir problem önerilmiştir. Tez çalışmasında ele alınan ikinci konu, meta-sezgisel arama algoritma tasarımıdır. Buna göre, yarı parametre uyarlamalı LSHADE ile hibrit CMA-ES (LSHADE with Semi-Parameter Adaptation Hybrid with CMA-ES, LSHADE-SPACMA) algoritmasının erken yakınsama problemini ortadan kaldırmak amacıyla arama performansının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, algoritmada kullanılan mutasyon stratejisi uygunluk-mesafe dengesi (Fitness Distance Balance, FDB) yöntemi kullanılarak yeniden tasarlanmıştır ve önerilen algoritma FDB-LSHADESPACMA olarak isimlendirilmiştir. FDB-LSHADESPACMA algoritmasının performansını test etmek ve doğrulamak için CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri kullanılarak kapsamlı bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, literatürde sıklıkla kullanılan ve güncel 14 meta-sezgisel arama (MSA) algoritması seçilmiştir. Çalışmada önerilen enerji hub optimizasyon problemleri, FDB-LSHADESPACMA algoritması ile çözülmüştür. Buna göre, EH yapıları kullanılarak oluşturulan dört test sistemi ve üç amaç fonksiyonu kullanılarak on iki durum çalışması oluşturulmuştur. FDB-LSHADESPACMA algoritması ve rakip MSA algoritmalarından elde edilen tüm sonuçlar, Friedman Testi ve Wilcoxon ikili işaret testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının rakip algoritmalarından daha iyi sonuçlar elde ettiği ve üstün performans sergilediği görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Enerji hub optimizasyonu, Entegre enerji sistemleri, Meta-sezgisel arama algoritmaları, Uygunluk-mesafe dengesi seçim yöntemi.

ABSTRACT

ENERGY HUB OPTIMIZATION WITH HEURISTIC OPTIMIZATION ALGORITHMS

Burçin ÖZKAYA

Düzce University

Institute of Graduate Education, Department of Electrical and Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

June 2022, 175 pages

In this thesis study, an energy hub (EH) model integrated with wind and solar energy was proposed. Moreover, a hibrit optimization algorithm was developed for the optimization of proposed energy hub model. In this context, the thesis study studied on two issues. Firstly, a model was proposed where the energy sources at the input of the energy hub were electricity, wind energy, solar energy, natural gas and heat, while electricity, heat, cooling and compressed air were produced at the output. Based on this model, 69 EH structures were created. By using these EH structures, four different scale test systems were created. In the study in which EH optimization was handled, three objective functions were used as minimizing the total energy hub cost, minimizing the total energy hub losses, and minimizing both the energy hub cost and losses. Contrary to the problems in the literature in which the total energy hub cost was minimized, the cost model of wind and solar energy was calculated as direct cost, penalty cost and reserve cost. Thus, a new problem has been proposed to the literature. The second topic addressed in the thesis study was the design of the meta-heuristic search (MHS) algorithm. Accordingly, it was aimed to improve the search performance of the LSHADE with Semi-Parameter Adaptation Hybrid with CMA-ES (LSHADE-SPACMA) algorithm in order to eliminate the premature convergence problem. For this reason, the mutation strategy used in the algorithm was redesigned using the Fitness-Distance Balance (FDB) method and the proposed algorithm was named FDB-LSHADESPACMA. A comprehensive experimental study was carried out using the CEC2017 and CEC2020 benchmark problems to test and validate the performance of the FDB-LSHADESPACMA algorithm. In this direction, 14 up-to-date meta-heuristic search (MHS) algorithm were selected. Energy hub optimization problems given in this study were solved with the proposed algorithm. Accordingly, twelve case studies were created using four EH test systems and three objective functions. All results obtained from FDB-LSHADESPACMA algorithm and competitor MSA algorithms were evaluated using Friedman Test and Wilcoxon signed-rank test. According to results, it was shown that the FDB-LSHADESPACMA algorithm achieved better results and showed superior performance than the competing algorithms.

Keywords: Energy hub optimization, Fitness-distance balance selection method, Integrated energy systems, Meta-heuristic search algorithms.

EXTENDED ABSTRACT

ENERGY HUB OPTIMIZATION WITH HEURISTIC OPTIMIZATION ALGORITHMS

Burçin ÖZKAYA

Düzce University

Institute of Graduate Education, Department of Electrical and Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

June 2022, 175 pages

1. INTRODUCTION

With the rising complexity and difficulty of real-world problems, more trustworthy optimization techniques, particularly meta-heuristic optimization algorithms, have become necessary. By minimizing or maximizing the a problem, the optimization method identifies the optimal decision variables. In general, real-world optimization problems have non-linear constraints, complex, non-convex, non-linear, and large search spaces. Therefore, the optimization problems with these features can be difficult to solve. In this study, the thesis study focused on two topics. First one is the energy hub optimization problems, which is one of the real world problems. For solving these problems, a meta-heuristic search algorithm was developed using the FDB method.

2. MATERIAL AND METHODS

In this thesis study, an energy hub model was proposed, where the input energy carriers were electricity, natural gas, heat, wind energy and solar energy, and the demands were electricity, heat, cooling, and compressed air. By using input energy sources and energy conversion elements, 69 different EH structures were created. Besides, three different objective functions were considered, which are minimizing the total energy hub cost, minimizing the total energy hub losses, and minimizing both the energy hub cost and losses simultaneously. The total cost of the EH system included the costs of electricity, natural gas, heat, wind energy, and solar energy. Contrary to the studies in the literature, the cost of wind and solar energy model was included to the cost model. Moreover, the cost models of wind and solar energy were calculated as the sum of direct cost, penalty cost and reserve cost for the first time, which was one of the original contributions of the thesis.

In order to solve these energy hub optimization problems, a hybrid MHS algorithm was

proposed. According to this, to improve the search performance of the LSHADESPACMA algorithm, the mutation strategy of the algorithm was redesigned by using FDB selection method and the proposed algorithm was called FDB-LSHADESPACMA.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The experimental studies carried out in this study were divided into two parts. In the first part, in order to validate and test the proposed FDB-LSHADESPACMA algorithm, a comprehensive experimental study was conducted. For this reason, CEC2017 and CEC2020 benchmark suits where there were 39 test functions. The dimension of the problems were selected as 30, 50, and 100. In order to compare the proposed algorithm, 14 up-to-date MHS algorithms were used. The obtained results from the all algorithms were evaluated using Friedman test and Wilcoxon signed-rank test. According to results, the superiority of the proposed algorithm were proved.

In the second part, the proposed algorithm was tested on the energy hub optimization problems. For this, four different scale test systems were created using 69 EH structures. Using four EH test systems and three objective functions, twelve case studies were considered. These case studies were solved by using the proposed and competing MHS algorithms. The results of the case studies were analyzed using the Friedman test and Wilcoxon signed-rank test. According to Friedman test results, FDB-LSHADESPACMA algorithm was first ranked in seven of the twelve cases and in mean-ranking. Moreover, Wilcoxon signed-rank test results showed the superior performance of the proposed algorithm.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

According to experimental results of this thesis, if FDB selection method is applied correctly to the right place in the algorithm, it significantly improves the performance of the MHS algorithms. In this study, the mutation strategy of the LSHADESPACMA algorithm was redesigned using the FDB selection method. Experimental studies section included the most comprehensive and up-to-date benchmark problems and competing MHS algorithms in the literature. Therefore, it is an important achievement that the FDB-LSHADESPACMA tested under these conditions exhibited successful, stable, and robust search performance in different types of problem spaces. This information was confirmed by analyzing the experimental studies data using Friedman and Wilcoxon signed-rank

tests. Another result obtained from the thesis study is that the proposed algorithm for energy hub optimization problems has found better solutions than its competitors in seven of the twelve case studies.



1. GİRİŞ

Optimizasyon, eşitlik ve eşitsizlik kısıtları dahilinde seçilen bir amaç fonksiyonunun minimize ya da maksimize edilmesi için tasarım parametrelerinin değerinin belirlenmesidir [1]. Genel olarak, yapay zeka ve makine öğrenimindeki gerçek dünya problemleri, sürekli, ayrık, kısıtlı ya da kısıtsız bir yapıya sahiptir. Bu özelliklerden dolayı, eşlenik gradyan (conjugate gradient), sıralı quadratik programlama (sequential quadratic programming) ve yarı-Newton yöntemleri gibi geleneksel matematiksel programlama yaklaşımlarını kullanarak bazı problem sınıflarını çözmek zordur. Geleneksel optimizasyon yöntemleri, örneğin yerel optimuma ve bilinmeyen arama alanına yakınsama gibi belirli eksiklikler ve sınırlamalardan muzdariptir. Bu nedenle, meta-sezgisel arama (MSA) algoritmalarına son yıllarda, gerçek dünya problemlerinin giderek artan karmaşıklığı ve zorluğu, daha güvenilir optimizasyon tekniklerine, özellikle meta-sezgisel arama (MSA) algoritmalarına ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur [1], [2].

MSA algoritmaları, güvenilir ve uygulanmasının oldukça basit olması, yerel optimuma takılmaması, gradyan bilgisi gerektirmemesi ve farklı disiplinleri kapsayan çok çeşitli problemlerde kullanılabilir olması nedenleri ile mühendislik uygulamalarında çok popüler hale gelmiştir [2]-[4]. Ancak, MSA algoritmalarının kullanıcı tanımlı parametrelerin ayarlanmasına karşı bir hassasiyet göstermeleri ve her zaman global optimum çözüme yakınsayamama gibi dezavantajları bulunmaktadır [2], [5].

Genel olarak, MSA algoritmalarının tek çözüm tabanlı (örneğin; Simüle Edilmiş Tavlama (Simulated Annealing) [6]) ve popülasyon tabanlı (örneğin; Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA) [7]) olmak üzere iki çeşidi vardır. Tek çözüm tabanlı algoritmalarda, optimizasyon sürecinde yalnızca bir çözüm işlenirken, popülasyon tabanlı algoritmalarda bir dizi çözüm işlenir. Popülasyon tabanlı teknikler, genellikle optimum çözüm ile aynı olabilecek veya komşuluğunda bulunan optimal veya alt optimal bir çözüm bulabilir.

Popülasyon tabanlı MSA algoritmaları, çoğunlukla doğal fenomenleri taklit eder. Bu algoritmalar, popülasyondaki her bireyin optimizasyon probleminde bir aday çözümü temsil ettiği bir popülasyon oluşturarak optimizasyon sürecini başlatır. Popülasyon, stokastik operatörler kullanılarak mevcut popülasyonun yeni oluşturulan bir popülasyonla

değiştirilmesiyle iteratif olarak geliştirilmektedir. Optimizasyon süreci, bir durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam etmektedir [2], [7]. İlham aldıkları sürece göre popülasyon tabanlı algoritmalar literatürde dört grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar, evrimsel algoritmalar (Evolutionary Algorithm, EA), fizik tabanlı (Physics-based), insan tabanlı (Human-based) ve sürü tabanlı (Swarm-Based, SI) algoritmalarıdır [1]-[3], [8].

Evrimsel algoritmalar, çaprazlama, mutasyon ve seçim gibi biyolojik evrimsel davranışları taklit eder. En popüler EA, Darwin'in evrim teorisini taklit eden GA [7]'dir. Diğer popüler EA örnekleri, diferansiyel evrim (Differential Evolution, DE) [9], evrim stratejisi (Evolution Strategy, ES) [10] ve biyocoğrafya tabanlı optimize edici (Biogeography-Based Optimizer, BBO) [11]'dir. Fizik tabanlı algoritmalar, fiziksel yasalardan ilham alır. Bu algoritmalara örnek olarak, manyetik optimizasyon algoritması (Magnetic Optimization Algorithm, MOA) [12], merkezi kuvvet optimizasyonu (Central Force Optimization, CFO) [13] ve yerçekimi arama algoritması (Gravitational Search Algorithm, GSA) [14] verilebilir. Üçüncü MSA grubu, literatürde insan davranışlarından ilham alan algoritmaları içerir. Tabu arama (Tabu Search, TS) [15], emperyalist rekabetçi algoritma (Imperialist Competitive Algorithm, ICA) [16], öğretme ve öğrenme tabanlı optimizasyon (Teaching Learning Based Optimization, TLBO) [17] algoritmaları, insan-tabanlı algoritmalara örnektir. SI algoritmaları ise, sürülerde yaşayan organizmaların sosyal davranışlarını taklit eder. En popüler SI algoritmaları, parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) [18], karınca kolonisi optimizasyonu (Ant Colony Optimization, ACO) [19] ve yapay arı kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC) [20] algoritmalarıdır.

Popülasyon tabanlı bir arama yöntemi olan MSA süreci, genel olarak iki temel adımdan oluşmaktadır. İlk adımda, çözüm adayları (arama uzayındaki referans konumları) benimsenen seçim yöntemine bağlı olarak popülasyondan seçilir. İkinci adımda, seçilen referans konumları kullanarak arama işlemi yürütülür. İkinci adım, MSA algoritmalarının arama operatörleri tarafından gerçekleştirilir. MSA sürecinde arama operatörlerinin görevi, sömürü (exploitation) ve keşif (exploration) gereksinimlerini karşılamaktır [21], [22]. Sömürü, arama uzayındaki bir referans konumunun komşuluğunda yapılan aramadır [8], [21], [22]. Bu gereklilik MSA algoritmaları tarafından kolaylıkla yerine getirilebilmektedir. Çünkü bir referans konumunun komşuluğunda arama yapmanın yolları iyi bilinmektedir. Keşif, arama uzayını global olarak keşfetme yeteneğidir [8], [21], [22]. Bu yetenek, yerel optimumdan kaçınma ve yerel optimum tuzağı çözme ile

ilgilidir.

MSA sürecinde etkili çeşitlilik elde etmek zor bir iştir. Bunun nedeni, çok boyutlu, dışbükey olmayan ve karmaşık bir arama uzayında keşfedilmesi gereken sonsuz sayıda alternatif konum vardır. Böyle karmaşık bir arama uzayında, global bir çözüme yakınsamanın açık ve basit bir yolu yoktur. Bu nedenle, bu tür zor problemler için global optimum çözümü bulmak, arama sürecine rehberlik eden referans konumlarının doğru ve etkin seçimine bağlıdır. Bu konumların rastgele seçimi, arama sürecinde ve popülasyon içinde çeşitlilik yaratabilir. Ancak, referans konumlarının rastgele seçimi ile nitelikli çeşitlilik elde etmek mümkün değildir. Bunun sebebi, rehber konumlarının rastgele seçilmesinin optimizasyon sürecini rastgele bir aramaya dönüştürmesi ve arama sürecinin başarısız olmasına neden olmasıdır. Arama sürecinin başarılı olabilmesi için çeşitliliğin etkin bir şekilde sağlanması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek için, etkin ve istikrarlı bir yöntem kullanılarak arama sürecine rehberlik eden referans konumlar seçilmelidir [21], [22].

MSA sürecinin başarısı için temel koşul, seçim yöntemleri ve arama operatörlerinin birbirini destekleyecek şekilde çalışmasıdır. Arama operatörleri görevlerini yerine getirmek için giriş parametreleri olarak çözüm adayları/referans konumları alırlar. Diğer bir deyişle, arama sürecinin başarısı arama operatörlerinin yetenekleri kadar, seçim yöntemiyle belirlenen çözüm adaylarının arama uzayındaki konumuna da bağlıdır. Bu durum, MSA sürecinde seçim yöntemlerinin rolünü açıkça göstermektedir [21]-[23]. Genel olarak, MSA arama sürecinde üç farklı seçim yöntemi kullanılır: açgözlü, rastgele ve olasılıksal. Açgözlü seçim yönteminde, doğadaki elitizm süreci simüle edilir ve seçim yapılırken popülasyon içinden en güçlü olan birey seçilir. Olasılıksal seçim yönteminde, açgözlü ve rastgele seçim yöntemleri birlikte kullanılır ve seçimin olasılığı uygunluk değerine göre belirlenir. Rulet çarkı ve turnuva yöntemleri, olasılıksal seçim yöntemlerinin örnekleridir. Rastgele seçim yönteminde ise, popülasyondan bireyler rastgele olarak seçilir [23]-[25].

Klasik seçim yöntemlerinin yanında, literatürde farklı seçim yöntemleri önerilmiştir. Bunlardan biri, bu tez çalışmasında da kullanılan Uygunluk-Mesafe Dengesi (Fitness Distance Balance, FDB) seçim yöntemi olup, Kahraman ve arkadaşları tarafından MSA algoritmalarının arama performansını iyileştirmek için önerilmiştir. FDB, MSA sürecine en fazla katkı sağlayacak arama ajanı veya ajanlarının popülasyondan seçilmesini sağlar. Aynı zamanda FDB, açgözlü bir seçim yöntemidir. Ancak, diğer açgözlü veya olasılıksal

yöntemlerinden farklı olarak bu yöntemde, çözüm adaylarının uygunluk değerleri değil FDB puanları dikkate alınmaktadır. Puan hesaplamasında, çözüm adayının uygunluk fonksiyonu değerleri ile çözüm adayının popülasyondaki en iyi uygunluk değerine sahip çözüme olan uzaklık değeri dikkate alınmaktadır.

FDB seçim yöntemi, popülasyondaki aday çözümlerin durumu hakkında iki kritik bilgi sağlar. Bunlar, popülasyondaki en iyi çözüme çok benzeyen adayların belirlenmesini ve en iyi çözüme benzemeseler bile uygunluk değeri yüksek adayların belirlenmesini içerir. İlk bilgi dikkate alındığında, seçim sürecinde birbirine çok benzeyen üyelerin birlikte seçilmesi engellenmiş olur. Yani, arama uzayında konumları birbirine çok yakın olan adaylar aynı anda seçilemez. İkinci bilgi dikkate alınarak, popülasyondaki en iyi çözümün eksikliklerini giderebilecek adayların seçilmesi sağlanır [21].

Literatürde, FDB seçim yönteminin MSA algoritmalarına başarılı bir şekilde uygulandığı çalışmalar bulunmaktadır. FDB yöntemi ilk kez simbiyotik organizma arama (Symbiotic Organism Search, SOS) algoritmasının keşif ve sömürü yeteneklerini güçlendirmek için uygulanmıştır [21]. Bir başka çalışmada, stokastik fraktal arama (Stochastic Fractal Search, SFS) algoritmasına uygulanmıştır. SFS algoritması, çeşitliliği yeterli derecede sağlayamadığından dolayı erken yakınsama sorununa sahiptir. Bu sorunun çözümü için SFS algoritmasında çeşitliliğin artırılması ve sömürü-keşif dengesinin kurulması gerekmektedir. FDB yöntemi, SFS algoritmasının çeşitliliğini geliştirmek ve sömürü ile keşif arasındaki dengeyi sağlamak için kullanılmıştır [22]. Öğretme-öğrenme temelli yapay arı kolonisi (Teaching-Learning-Based Artificial Bee colony, TLABC) algoritmasının doğayı taklit etme yeteneğini en üst düzeye çıkarmak için algoritmadaki üç arama süreci FDB ile yeniden tasarlanmıştır [23]. Bir başka güçlü algoritma olan kır kurdu optimizasyon algoritmasının (Coyote Optimization Algorithm, COA) erken yakınsama problemini yok etmek ve dengeli arama yeteneğini güçlendirmek için algoritmada kültürel eğilim aşamasında sürüye maksimum katkıyı sağlayabilecek ve sürünün sosyal koşullarını iyileştirebilecek kır kurdunun belirlenmesi aşamasında FDB kullanılmıştır [24]. Başka bir çalışmada, DE versiyonu olan uyarlanabilir kılavuzlu diferansiyel evrim algoritmasının (Adaptive Guided Differential Evolution Algorithm, AGDE) keşif kabiliyetini iyileştirmek için mutasyon sürecinde FDB kullanılmıştır [25]. Bir başka çalışmada, FDB yöntemi, Levy uçuş dağılımı (Levy Flight Distribution, LFD) algoritmasının keşif ve dengeli arama yeteneklerinin iyileştirilmesi için kullanılmıştır [26].

Tez çalışmasında, enerji hub optimizasyon problemleri çalışılmıştır. Enerji hub, literatürde son yirmi yılda oldukça popüler olan bir konudur. Enerji hub kavramı açıklanmadan önce, enerjinin insan hayatındaki yeri açıklanmıştır.

Enerji, içinde bulunduğumuz yüzyılda insanlığın karşı karşıya olduğu temel zorluklardan biridir. Bu zorluklar, enerji arzı, değişimi ve tüketimi gibi çeşitli alanlarda ortaya çıkmaktadır. Sınırlı fosil yakıt kaynakları, nüfusun artması ve buna bağlı olarak artan enerji tüketimi, insan yaşamının enerjiye olan bağımlılığının artması ve çeşitli enerji tüketim teknolojilerinin ortaya çıkması sonucunda enerji ihtiyacı giderek daha önemli hale gelmiştir [27]-[30]. Enerjinin ekonomik, sosyal, çevresel ve güvenlik boyutlarıyla ilişkisi, enerji konularının önemini ise iki katına çıkarmıştır [28].

Son yıllarda, dünyada birçok ülkede büyük ölçekli termik santraller temel enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Fosil yakıtlar, çok düşük verimlilikle başka bir enerji türüne (esas olarak elektrik) dönüştürülen enerji santralleri için birincil yakıttır. Üretilen bu enerji, iletim sistemleri ile üretimden tüketim yerine çok uzun mesafelerde iletilir ve daha sonra karmaşık dağıtılmış sistemler tarafından tüketim yerinde son kullanıcılar arasında dağıtılır. Ancak, bu sistemler tüketimden üretime kadar ciddi sorunlarla karşı karşıyadır [28]. Fosil yakıtların kıtlığı nedeniyle termik santrallerde çok düşük verimle kullanılması mantıklı görünmemektedir. Ayrıca, fosil yakıt tüketimi ve sera gazı emisyonları ile ilgili sorunlar, artan çevresel kaygılara ve küresel ısınma gibi sorunlara yol açmaktadır [28], [31]. Öte yandan, iletim ve dağıtım altyapılarının yüksek yatırım maliyeti, önemli kayıpları ve bu altyapıların korunması ve kontrolündeki sorunlar, enerji sistemlerinin marjinal maliyetinde önemli bir artışa neden olmaktadır [28]. Bunlarla birlikte, fosil yakıt kaynaklarının sınırsız olmaması ve çevreye verdiği olumsuz etkilerden dolayı, insan yaşamını teşvik edecek yeni bir enerji arzı ve tüketim modelinin keşfedilmesi önemli hale gelmiştir [28], [29], [31].

Günümüzde, geleneksel enerji sistemleri bağımsız olarak işletilmekte ve planlanmaktadır. Diğer yandan, konut, ticari ve endüstriyel müşteriler, farklı enerji türlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, tüketicilerin çoklu enerji ihtiyaçlarının karşılanması büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, yeni teknolojilerin ortaya çıkmasıyla birlikte, entegre enerji sistemlerinin kullanımı son yıllarda kaçınılmaz hale gelmiştir [28], [32], [33]. Bu bağlamda, son yirmi yılda, kayıpların azaltılması, işletme maliyetlerinin düşürülmesi ve sistem güvenilirliğinin artırılması üzerinde yerel enerji sistemleri yüksek bir etkiye sahiptirler [34].

Çok taşıyıcılı enerji sistemlerinde (Multi-Carrier Energy System, MES), geleneksel tek taşıyıcılı enerji sistemlerine kıyasla daha yüksek enerji verimliliği elde etmek için çeşitli enerji taşıyıcılarını (elektrik, ısı, doğal gaz gibi) daha etkin bir şekilde kullanma yetenekleri nedeniyle literatürde son zamanlarda dikkate alınmıştır [28], [32], [33]. Çok enerjili sistemlerde, elektrik, doğal gaz ve ısı gibi farklı enerji altyapıları birlikte çalışabilmektedir. Bu nedenle, çok taşıyıcılı enerji sistemlerinde farklı ağların birbirleri ile bağlantısı, en iyi yerel enerji sistemlerinden biri olarak bilinen enerji hub (Energy Hub, EH) ile sağlanmıştır [34], [35].

Enerji hub konsepti ilk kez “Geleceğin Enerji Ağlarının Vizyonu” (A Vision of Future Energy Networks, VOFEN) isimli araştırma projesinde ETH Zürih’teki Güç Sistemleri ve Yüksek Gerilim Laboratuvarı’nda bir araştırma ekibi tarafından tanıtılmıştır [36]. Proje, yeşil alan yaklaşımını kullanarak uzun vadede (20-30 yıl) gelecekteki enerji sistemlerine ilişkin bir vizyon ve model elde etmeyi amaçlamıştır. Bu projede temel olarak iki kavram üzerinde durulmuştur. Bunlar; farklı enerji taşıyıcılarının tek iletim cihazlarında daha uzun mesafelerde kombine taşınmasını sağlayan enerji ara bağlantıları ve enerji taşıyıcılarının entegre bir birimde dönüştürülmesi ve depolanmasını sağlayan enerji hub kavramıdır [28], [30], [37].

EH kavramı, literatürde çoklu enerji sistemleri (multi-energy systems), çoklu enerji taşıyıcı sistemleri (multiple energy carrier systems), birleşik/hibrit enerji sistemleri (combined/hybrid energy systems) ve hibrit çoklu-üretim enerji sistemleri (hybrid poly-generation energy systems) olarak adlandırılmıştır [37]. EH, birden fazla enerji taşıyıcısının dönüştürülebildiği, koşullandırılabilirdiği ve depolanabildiği bir birim olarak tanımlanmıştır [27], [30]-[39]. Daha kesin bir tanım olarak EH, çoklu enerji taşıyıcılarının giriş, çıkış, dönüştürme ve depolama fonksiyonlarını sağlayan bir birimdir [28], [40], [41]. Aynı zamanda, farklı talep türlerini karşılamak amacıyla birden fazla enerji taşıyıcısını birleştirmek için kullanılan enerji üreticileri ve tüketiciler arasında bir ara yüz olarak da tanımlanmıştır [27], [34], [41].

Bir EH modelinde, giriş portunda enerji kaynakları alınır, dönüştürülür ve çıkış portunda tüketicilerin talep ettiği farklı enerji hizmetleri üretilir. Buna göre, EH modelinde giriş portunda kullanılan enerji kaynakları, enerji kaynaklarının farklı enerji türlerine dönüştürülmesini sağlayan enerji dönüşüm elemanları ve çıkışta üretilen yük talebi olmak üzere üç temel birim bulunmaktadır [28], [37].

EH modelinde tüketicilerin taleplerini karşılamak için giriş enerjisi olarak yenilenebilir enerji kaynakları, elektrik, doğal gaz ve ısı gibi farklı kaynaklar kullanılabilir [29], [30]. Girişte kullanılan enerji kaynaklarından bazıları herhangi bir dönüştürme yapılmadan çıkışa aktarılabilirken, bir kısmı da elektrik, ısı, soğutma, su, basınçlı hava ve diğer taleplere dönüştürülebilir. EH modelinde kullanılan temel unsurlar üç bölümde sınıflandırılabilir. Doğrudan bağlantılar, giriş portlarındaki enerji taşıyıcılarını başka bir forma dönüştürmeden çıkışa iletmek için kullanılırlar. Dönüştürücü elemanlar, giriş enerjisini çeşitli biçimlere dönüştürürler. Depolama cihazları ise, çeşitli enerji biçimlerini depolamak için kullanılır ve her bir enerji türü farklı teknolojiler kullanılarak depolanır [30], [36].

EH, tüketicilerin çeşitli taleplerini karşılamak için elektrik [43]-[46], doğalgaz [43]-[46], ısı [43]-[46], güneş ve rüzgar enerjisi [27]-[51], su enerji kaynakları [52] ve biokütle enerjisi [53], [54] gibi farklı kaynakları kullanabilmektedir. Bu enerji kaynaklarını kullanarak istenilen talebi üretmek için farklı enerji dönüşüm elemanları kullanılmaktadır. Farklı enerji formları arasındaki enerji dönüşümü, transformatörler, birleşik ısı ve güç (Combined Heat and Power, CHP) teknolojileri, birleşik ısı, soğutma ve güç (Combined Heat, Cooling and Power, CHCP) teknolojileri, ısı dönüştürücüsü, gaz fırını, kompresör gibi elemanlar ile gerçekleştirilmektedir [46], [55]. EH modelinin çıkışında ise elektrik, ısı, soğutma, basınçlı hava üretilmektedir [46].

Bu tez çalışmasında, EH'nin optimal çalışması üzerinde durulmuştur. Literatürde, EH'nin optimal çalışması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Geidl ve Andersson, elektrik, doğal gaz ve ısı gibi çeşitli enerji taşıyıcılarını içeren bir EH sistemi için genel bir matris modeli önermişlerdir. Çalışmanın amacı, sistemin toplam maliyetini minimize etmektir [56]. Aynı yazarlar tarafından, elektrik, doğal gaz ve ısı gibi çoklu enerji taşıyıcılarını içeren bir EH modeli önermişlerdir. Toplam üretim maliyetini en aza indirmeyi amaçlayan bu çalışmada, problemin çözümü için doğrusal olmayan programlama algoritmaları kullanılmıştır [57]. Başka bir çalışmada ise, birleşik gücün optimizasyonu için herhangi bir sayıda enerji taşıyıcısının dönüştürülmesini ve iletilmesini içeren bir kararlı durum güç akışı modeli sunmuşlardır. Sistem, elektrik ve doğal gaz tüketerek, elektrik ve ısı üreten üç aynı EH yapısından oluşmaktadır. Çalışmada, MEC'lerin optimal dağılımı için genel bir optimallik kriteri elde edilmiştir ve yaklaşım, güç sistemleri için kullanılan standart yöntemle karşılaştırılmıştır [41].

EH sistemlerinde OPF problemini çözmek için karışık tam sayılı doğrusal programlama (Mixed Integer Linear Programming, MILP) modeli önerilmiştir [58], [59]. Shao ve arkadaşları, OPF problemini çözmek için MILP yöntemini önermişlerdir. EH yapılarının çalışmasını açıklamak ve dağıtım faktörlerinin sisteme dahil edilmesini önlemek için durum değişkeni tabanlı bir model önermişlerdir. Ayrıca, doğal gaz iletim kısıtlamaları için parçalı doğrusal bir yaklaşım tekniği geliştirilmiştir. Bunlar dikkate alınarak, OPF problemi MILP yöntemi ile yeniden oluşturulmuştur. Çalışmada, amaç fonksiyonu sistemin işletme maliyetinin en aza indirgenmesidir. EH yapılarının giriş enerji taşıyıcıları elektrik ve doğal gaz olup, çıkışta elektrik ve ısı üretilmiştir. Önerilen model, 2-hub yapısının kullanıldığı modifiye 6-baralı test sistemi ve 5-hub yapısının kullanıldığı modifiye IEEE 118-bus test sistemi üzerinde uygulanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, önerilen yöntem mevcut yöntemlere göre bariz avantajlar elde ederek, kabul edilebilir bir sürede optimal güç akışı modelini yeterli doğrulukla çözebilmiştir [58]. Moghaddam ve arkadaşları, elektrik, ısı ve soğutmanın sağlandığı bir konut EH yönetimi için kapsamlı bir model önermişlerdir. Amaç, konut EH sisteminin günlük soğutma, ısı ve elektrik taleplerini maksimum kârla karşılamaktır. Çalışmada, amaç fonksiyonunun çözmek için MILP modeli uygulanmıştır [59].

EH giriş enerjisi olarak, elektrik, doğal gaz ve ısıyan yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgar enerjisi literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Geleneksel termik jeneratörlerin aksine, rüzgar ve güneş jeneratörleri yakıt gerektirmez. Rüzgar ve güneş santralleri bağımsız sistem operatörüne (Independent System Operator, ISO) aitse, ISO rüzgar/güneş enerjisi santralleri için ilk harcamaya bir geri ödeme maliyeti atamak istemediği sürece yakıt maliyeti mevcut olmayabilir ya da yenileme ve bakım maliyeti olarak atayabilir. Bununla birlikte, rüzgar veya güneş santralleri özel mülkiyete ait olduğunda, ISO sözleşmeyle kararlaştırılan planlanmış enerjiyle doğru orantılı olarak bir fiyat öder. Doğrudan maliyete ek olarak, rüzgar ve güneş enerjisi belirsizliklerinin varlığı nedeniyle operatörlerin dikkate alması gereken başka maliyetler de mevcuttur. Belirsiz kaynaktan sağlanan gücün, tahmin edilen güç değerinden daha az olduğu bir durum ortaya çıkabilir ve buna belirsiz kaynaktan gelen gücün fazla tahmin edilmesi denir. Bu durumda, tüketicilere kesintisiz arz talebi sağlamak için sistem operatörünün eğirme rezervlerine sahip olması gerekir. Fazla tahmin edilen miktarda rezerv üreten birimleri taahhüt etmenin maliyetine rezerv maliyeti denir. Fazla tahmin durumunun aksine, belirsiz kaynaklardan sağlanan gerçek güç, eksik tahmin durumu olarak adlandırılan tahmini güç değerinden daha

yüksek olabilir. Geleneksel jeneratörlerden gelen güç çıkışını azaltarak fazla gücü kullanmak mümkün değilse, bu güç boşa gitmiş olacaktır. Bu durumda, ceza maliyeti olarak da bilinen fazla maliyetlerden sistem işleticisi sorumludur. Özetle, rüzgar ve güneş santrallerinin maliyeti, doğrudan maliyet, ceza maliyeti ve rezerv maliyetinin toplamı olarak hesaplanmaktadır [60]-[63]. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerinde kullanılması sistemi zorlaştırmaktadır.

Rüzgar ve güneş enerjisinin kullanıldığı EH çalışmaları incelenecek olursa, Schulze ve arkadaşları, OPF problemi EH girişinde rüzgar ve güneş enerjisinin kullanıldığı sistemde uygulanmıştır. Sistemde iç ve dış kaynaklar bulunmaktadır. İç kaynaklar yakıt, elektrik ve doğal gaz iken, dış kaynaklar güneş ve rüzgar enerjisi, gaz ve ısıdan elde edilen elektriktir. Çalışmada amaç fonksiyonu, toplam maliyetin minimizasyonu ile her bir EH biriminin faydasını maksimize edilmesinden oluşmaktadır [47]. Pazouki ve arkadaşları, rüzgar enerjisinin belirsizliğini göz önünde bulundurarak EH' nin optimal performansını araştırmışlardır. EH yapısında girdiler elektrik, doğalgaz ve rüzgar enerjisi iken, talepler elektrik ve ısı enerjisidir. Güvenilirlik ve emisyon kısıtlamaları dikkate alınarak işletme maliyetinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır [48].

Nejafi ve arkadaşları, stokastik programlama ve koşullu riske maruz değer yöntemini kullanarak toplam maliyeti en aza indirmek için EH'de kesintili güç üretimi için bir enerji yönetimi çerçevesi önermiştir [33]. Pazouki ve Haghifam, EH'nin optimal yönetimi için deterministik ve stokastik bir matematiksel formülasyon geliştirmişlerdir. EH modelinin girişleri, elektrik, ısı ve rüzgar enerjisi iken, çıkışta elektrik ve ısı üretilmektedir. Rüzgar enerjisi, elektrik fiyatı ve merkez elektrik talebinin deterministik ve stokastik koşulları için iki amaç fonksiyonu önerilmiştir. MILP olarak formüle edilen amaç fonksiyonları, hub yatırımı, işletimi, güvenilirliği ve emisyonu ile ilgili maliyetleri içermektedir [49]. Ma ve arkadaşları, elektrik, ısı ve soğutma taleplerinin dikkate alındığı bir EH sisteminin optimal dağıtım stratejileri ve koordineli çalışmasını sunmuşlardır. Çalışmada önerilen optimal operasyon modeli, günlük işletme maliyetini minimize etmek için MILP ile formüle edilmiştir [64].

Dolatabadi ve arkadaşları, rüzgar enerjisi ile entegre bir EH modeli sunmuşlardır. EH modelinde elektrik, doğal gaz ve rüzgar enerjisi kullanılarak, elektrik, soğutma ve ısı üretilmektedir. EH tasarım problemini formüle etmek için iki aşamalı bir stokastik MILP modeli önerilmiştir. İlk aşamada, amaç fonksiyonu yatırım maliyetlerinin minimizasyonu iken, ikinci aşamada sistemin işletme maliyeti minimize edilmiştir [32]. Rakipour ve Barati,

rüzgar ve güneş enerjisi ile entegre bir EH'nin optimal çalışmasını ele almışlardır. EH' de giriş olarak elektrik, doğal gaz, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi kullanılmıştır. Çalışmanın amacı ise, gelir ve hub maliyetleri arasındaki fark olarak tanımlanan EH'nin karını artırmak olarak tanımlanmıştır [50]. Shams ve arkadaşları, EH yapısına sahip bir mikro şebekede elektrik ve termal kaynakların optimal yönetim stratejisini çalışmışlardır. Önerilen modelin amaç fonksiyonu, tüm ağ kısıtlamaları ve belirsizlikleri göz önünde bulundurularak beklenen işletme maliyetinin minimizasyonudur. EH yapısında giriş enerjileri doğal gaz ve şebekeden elde edilen elektrik, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisidir. Önerilen modelde, elektrik ve doğal gazın akışı bir MILP problemi olarak formüle edilmiştir [51]. Ebrahimi ve arkadaşları, elektrik, ısı ve soğutma taleplerinin dikkate alındığı rüzgar ve güneş enerjisi entegreli bir EH modeli önermişlerdir. Toplam işletme maliyetinin minimize edildiği sistemde, bu problem MILP ile modellenmiştir [65].

Literatürde EH'nin optimal çalışması ile ilgili yapılan çalışmalarda, optimizasyon problemlerinin çözümü için meta-sezgisel arama algoritmaları kullanılmıştır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Moeini-Aghaie ve arkadaşları, farklı enerji altyapıları üzerinde birleştirilmiş güç akışı çalışmaları için genel bir optimizasyon ve modelleme çerçevesi geliştirmeye çalışmışlardır. Önerilen yaklaşımda, çok taşıyıcılı optimal güç akışı (Multi-Carrier Optimal Power Flow, MCOPF) problemini, MEC sistemlerinin eş zamanlı analizinin başlıca avantajlarından ödün verilmeyecek şekilde geleneksel OPF problemine ayırıştırır. MCOPF probleminin amaç fonksiyonu toplam enerji maliyetinin minimize edilmesi olup, problemin çözümü için çok etmenli genetik algoritma (Multi-Agent Genetic Algorithm, MAGA) kullanılmıştır. Önerilen yöntem, enerji taşıyıcılarının elektrik, ısı ve doğal gaz olduğu 11 EH yapısına sahip bir test sisteminde uygulanmıştır [42]. Başka bir çalışmada, Moeini-Aghaie ve arkadaşları rüzgar belirsizliği varlığında EH'de iki seviyeli bir ekonomik dağıtım (Economic Dispatch, ED) problemini çözmek için MAGA yöntemini kullanmışlardır. EH modelinde giriş enerjisi olarak elektrik, doğal gaz ve rüzgar enerjisi kullanılmıştır. Çalışmada sunulan model, 24 saatlik bir süre içinde 11 EH yapısına sahip bir test sisteminde uygulanmıştır. Problemin çözümünde MAGA ile elde edilen sonuçlar, parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) ve GA algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, MAGA yöntemi rakiplerine göre daha iyi bir yakınsama davranışı sergilemiştir [43].

Başka bir çalışmada, Huo ve arkadaşları, konut EH sistemlerinin optimal çalışması için bir hibrit optimizasyon algoritması olarak iç nokta yöntemiyle birleştirilmiş PSO algoritması önermişlerdir. Çalışmada amaç fonksiyonu, enerji maliyeti ve pil ömrü maliyeti dahil olmak üzere sistem maliyetini en aza indirmektir. Hibrit PSO algoritmasının performansı klasik PSO ile karşılaştırılmıştır [54].

Shabanpour-Haghighi ve Seifi, amaç fonksiyonunun sistemin toplam enerji maliyetini azaltmak olduğu problem için değiştirilmiş öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (modified teaching-learning based optimization, MTLBO) algoritmasını önermişlerdir. Çalışmada, enerji dönüştürme elemanlarının verimlerinin sabit ve değişken olduğu durum için iki farklı test sistemi oluşturulmuştur. Tüm durumlar için MTLBO algoritmasının sonuçları, GA, PSO ve TLBO algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen MTLBO algoritmasının global optimum çözüme başarılı bir şekilde ulaştığını göstermektedir [67]. Aynı yazarlar, MTLBO algoritmasını kullanarak MEC sisteminin optimal çalışmasını incelemişlerdir. Çalışmanın amacı, sistemin toplam işletme maliyetini ve toplam emisyonunu minimize etmektir. MTLBO algoritmasından elde edilen sonuçlar, yerçekimi arama algoritması (gravitational search algorithm, GSA), PSO ve TLBO ile karşılaştırılmıştır [39]. Başka bir çalışmada, aynı yazarlar MEC sistemlerinin OPF problemini önermişlerdir. EH modelinde, giriş enerji taşıyıcıları elektrik, doğal gaz ve ısı olup, çıkış olarak elektrik ve ısı üretilmiştir. Amaç, toplam işletme maliyetini minimize etmek olup, bu problemi çözmek için MTLBO algoritması kullanılmıştır [55].

Beigvand ve arkadaşları, OPF problemini çözmek için zamanla değişen ivme katsayılı yerçekimi arama algoritması (time varying acceleration coefficient gravitational search algorithm, TVAC-GSA) adı verilen yeni bir hibrit algoritma geliştirmişlerdir. Tek amaçlı bir problem olarak enerji maliyetinin minimizasyonu ve çok amaçlı bir problem olarak enerji maliyetinin ve elektrik iletim kaybının minimizasyonu amaçlanmıştır. Çalışmada, giriş enerji taşıyıcılarının elektrik ve doğal gaz olduğu 8 hub yapısı oluşturulmuştur. Bu hub yapıları modifiye edilmiş IEEE 14-baralı test sistemi ile kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın performansını test etmek için, problemlerin çözümünden elde edilen sonuçlar diferansiyel evrim (DE), GA, PSO ve GSA ile karşılaştırılmıştır [68].

Başka bir çalışmada Beigvand ve arkadaşları, zamanla değişen ivme katsayılı parçacık sürüsü optimizasyon algoritmasını (time varying acceleration coefficients particle swarm optimization, TVAC-PSO) çoklu enerji taşıyıcıları ekonomik dağıtım probleminin (multiple energy carriers economic dispatch problem, MECED) çözümü için önermişlerdir.

Önerilen algoritma, çalışmada önerilen açık gaz kaybı formülü ve 8-hub kullanan IEEE 14-baralı test sisteminin değiştirilmiş bir versiyonunda elektrik ve gaz kaybı olan iki amaç fonksiyonu için uygulanmıştır. TVAC-PSO algoritmasından elde edilen sonuçlar, DE, GA ve PSO algoritmaları ile karşılaştırılmıştır [45].

Beigvand ve arkadaşları, enerji hub ekonomik dağıtım (energy hub economic dispatch, EHED) problemlerinin çözümü için TVAC-GSA algoritmasını geliştirerek zamanla değişen ivme katsayısı-yerçekimi arama algoritması ile kendi kendine uyarlamalı öğrenme (self-adaptive learning with time varying acceleration coefficient-gravitational search algorithm, SAL-TVAC-GSA) adı verilen yeni bir algoritma önermişlerdir. EHED problemleri, çeşitli EH yapıları, çoklu enerji taşıyıcıları, valf-nokta etkisi, farklı eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarını içermektedir. Giriş enerji taşıyıcılarının elektrik, ısı ve doğal gaz olduğu sistemde, çıkışta elektrik, ısı, doğal gaz ve basınçlı hava üretilmektedir. Buna göre, 39 EH birimi ve 29 farklı EH yapısı önerilmiştir. Enerji maliyetinin, enerji kayıplarının ve hem enerji maliyetinin hem de enerji kayıplarının eş zamanlı olarak minimize edildiği üç amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın problemlerin çözümü için elde ettiği sonuçlar, GA, PSO, GSA, ve TVAC-GSA algoritmaları ile karşılaştırılmıştır [46].

Genel olarak literatürde EH ile ilgili yapılan çalışmaları değerlendirmek gerekirse, EH yapılarında en çok kullanılan enerji taşıyıcıları elektrik, doğal gaz ve ısı olmuştur. [32], [33], [47], [50], [51], [64]-[67]'de verilen çalışmalarda, EH yapılarında rüzgar enerjisi, güneş enerjisi veya her ikisi birden kullanılmıştır. Ancak, bu çalışmalarda, EH maliyetinin hesaplanmasında rüzgar ve güneş enerjisi santrallerinin maliyeti amaç fonksiyonuna dahil edilmemiştir. [48] ve [49]'da yapılan çalışmalarda ise, amaç fonksiyonunun maliyet minimizasyonu olduğu problemde, rüzgar enerjisinin maliyeti sisteme dahil edilmiştir, fakat maliyet modeli [60]-[63]'de verildiği şekilde doğrudan maliyet, ceza maliyeti ve rezerv maliyetinin toplamı olarak değil de sadece bir katsayı ile gösterilmiştir. Bu eksikliği gidermek amacıyla, bu çalışmada rüzgar ve güneş enerjisinin maliyetinin toplam maliyete dahil edildiği yeni bir problem önerilmiştir.

Tez çalışmasında, giriş enerji taşıyıcılarının elektrik, doğal gaz, ısı, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi olduğu, çıkış taleplerinin ise elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı hava olduğu 69 EH yapısı oluşturulmuştur. Bu yapılar kullanılarak, IEEE 14-bus, 30-bus, 57-bus ve 118-bus test sistemlerinde bulunan jeneratör sayıları baz alınarak dört farklı ölçekte test sistemi oluşturulmuştur. Çalışmada, üç farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Bunlar; (i)

toplam enerji hub maliyetinin minimize edilmesi, (ii) toplam enerji hub kayıplarının minimize edilmesi ve (iii) toplam enerji hub maliyetinin ve toplam enerji hub kayıplarının eş zamanlı minimize edilmesidir. Bu amaç fonksiyonlarından toplam enerji hub maliyetinin ve kayıplarının minimize edildiği problemler tek-amaçlı optimizasyon problemleridir. Diğer problemde, toplam enerji hub maliyetinin ve toplam enerji hub kayıplarının eş zamanlı minimize edilmesi problemi çok-amaçlı bir optimizasyon problemi olup, tek-amaçlı optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. EH sisteminin toplam maliyeti elektrik, doğal gaz, ısı, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisinin maliyetlerini içermektedir. Literatürde yapılan çalışmaların aksine, rüzgar ve güneş enerjisinin maliyeti sisteme dahil edilmiştir. Tez çalışmasının orijinal katkılarından biri olan EH maliyetinde, literatürde ilk kez rüzgar ve güneş enerjisinin maliyet modelleri doğrudan maliyet, ceza maliyeti ve rezerv maliyetinin toplamı olarak hesaplanmış ve amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. Yani, yeni bir maliyet problemi ortaya konulmuştur. Rüzgar dağılımının modellenmesi için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF), güneş ışıınının modellenmesi için de Lognormal PDF kullanılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci orijinal katkısı ise, yarı parametre uyarlamalı LSHADE ile hibrit CMA-ES (LSHADE with Semi-Parameter Adaptation Hybrid with CMA-ES, LSHADE-SPACMA) algoritmasının arama performansının geliştirilmesi için FDB seçim yöntemi kullanılarak hibrit bir algoritma önerilmesidir ve bu hibrit algoritma FDB-LSHADESPACMA olarak isimlendirilmiştir. LSHADESPACMA algoritmasında arama süreci mutasyon stratejisi ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada, LSHADESPACMA algoritmasının mutasyon stratejisi FDB seçim yöntemi ile yeniden tasarlanmıştır. FDB-LSHADESPACMA algoritmasının performansını test etmek için kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle LSHADESPACMA algoritmasının farklı versiyonları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu versiyonların performansları CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri kullanılarak dört farklı problem tipinde ve üç farklı boyutta test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, istatistiksel analiz yöntemlerinden Friedman testi ve Wilcoxon ikili işaret testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda, en iyi versiyon seçilerek çalışmanın geri kalanında FDB-LSHADESPACMA olarak isimlendirilerek kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmaların ikinci bölümünde, önerilen FDB-LSHADESPACMA algoritmasının performans karşılaştırması için literatürde sıklıkla tercih edilen ve güncel olan 14 MSA algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmalar, deniz avcılığı algoritması

(Marine Predators Algorithm, MPA) [69], denge optimize edici (Equilibrium Optimizer, EO) [70], kaya midyesi çiftleşme optimize edici (Barnacle Mating Optimizer, BMO) [71], yapay elektrik alan algoritması (Artificial Electric Field Algorithm, AEFA) [72], yapay ekosistem tabanlı optimizasyon algoritması (Artificial Ecosystem-Based Optimization, AEO) [73], arz-talep tabanlı optimizasyon algoritması (Supply-Demand-Based Optimization, SDO) [74], uyarlanabilir kılavuzlu diferansiyel evrim algoritması (Adaptive Guided Differential Evolution Algorithm, AGDE) [75], kır kurdu optimizasyon algoritması (Coyote Optimization Algorithm, COA) [76], salp sürüsü algoritması (Salp Swarm Algorithm, SSA) [77], yarı parametre uyarlamalı LSHADE ile hibrit CMA-ES algoritması (LSHADE with Semi-Parameter Adaptation Hybrid with CMA-ES, LSHADE-SPACMA) [78], güve alevi optimizasyon algoritması (Moth Flame Optimization, MFO) [79], doğrusal popülasyon büyüklüğü azaltma başarı geçmişine dayalı diferansiyel evrim algoritması (Linear Population Size Reduction Success History Based Adaptive Differential Evolution, LSHADE) [80], yerçekimi arama algoritması (Gravitational Search Algorithm, GSA) [81] ve genetik algoritma (Genetic Algorithm, GA) [82]'dir. Öncelikle, FDB-LSHADESPACMA ve rakip MSA algoritmalarının performansı CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Friedman testi ve Wilcoxon ikili işaret testi kullanılarak değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmaların üçüncü bölümünde ise, tez çalışmasında önerilen üç amaç fonksiyonu ve EH yapılarından oluşturulan dört test sistemi kullanılarak, on iki durum çalışması oluşturulmuştur. FDB-LSHADESPACMA ve rakip MSA algoritmalarının bu problemler için elde ettiği sonuçlar, Friedman testi ve Wilcoxon ikili işaret testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, box-plot grafikleri ve yakınsama eğrileri çizdirilerek algoritmaların performansları incelenmiştir. Sonuç olarak, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının yapılan kapsamlı deneysel çalışmalar sonucunda rakip algoritmalarla karşı üstünlüğü gösterilmiştir.

Tez çalışmasının geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir:

- Bölüm 2'de, EH modeli açıklanmıştır ve oluşturulan EH yapılarının matematiksel modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Her bir enerji taşıyıcısının maliyet modeli, çalışmada kullanılacak olan amaç fonksiyonları, eşitlik ve eşitsizlik kısıtları ve uygunluk fonksiyonu açıklanmıştır. Ayrıca, rüzgar ve güneş enerji santrallerinin stokastik güç modeli verilmiştir.

- Bölüm 3’de, MSA optimizasyon süreci ve DE algoritmasının temel adımları verilmiştir. LSHADESPACMA algoritması, FDB seçim yöntemi, ve FDB-LSHADESPACMA algoritması için oluşturulan versiyonlar detaylı bir şekilde açıklanmıştır.
- Bölüm 4’de, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının performansını test etmek için kapsamlı bir çalışma sunulmuştur. Bu bölüm üç alt bölümden oluşmaktadır. İlk alt bölümde, LSHADESPACMA algoritmasının versiyonlarının performanslarının test edilmesi için CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. İkinci alt bölümde, literatürde verilen MSA algoritmaları ile önerilen algoritmanın performansları CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Üçüncü alt bölümde ise, EH optimizasyon problemleri için oluşturulan durum çalışmaları kullanılarak rakip MSA algoritmaları ve önerilen algoritmanın performans karşılaştırılması yapılmıştır.
- Bölüm 5’de tez çalışmasının sonuçları ve gelecekteki çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. ENERJİ HUB OPTİMİZASYON PROBLEMİ

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında önerilen enerji hub optimizasyon problemleri detaylı olarak açıklanmıştır. Bu kapsamda, dört alt bölüm hazırlanmıştır. Bu alt bölümlerde sırasıyla aşağıdaki konular ele alınmıştır:

- Birinci alt bölümde, oluşturulan enerji hub yapılarının matematiksel modelleri verilmiştir.
- İkinci alt bölümde, giriş enerji taşıyıcısı olarak kullanılan rüzgar ve güneş enerjisinin stokastik güç modellerinden bahsedilmiştir.
- İkinci alt bölümde, enerji hub yapılarında kullanılan enerji taşıyıcılarının maliyet modelleri verilmiştir.
- Dördüncü alt bölüm, enerji hub optimizasyonu için kullanılan amaç fonksiyonları, problemlere ait eşitlik ve eşitsizlik kısıtları ve uygunluk fonksiyonu hakkındadır.

2.1. ENERJİ HUBIN MATEMATİKSEL MODELİ

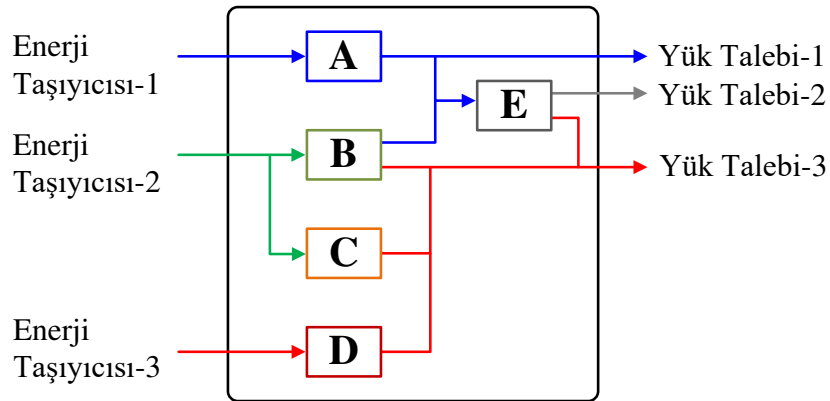
Enerji hub için literatürde farklı tanımlamalar mevcuttur. EH, birden fazla enerji taşıyıcısının dönüştürülebildiği, koşullandırılabilirdiği ve depolanabildiği bir birim olarak kabul edilmiştir [27], [30], [39]. Başka bir deyişle EH, farklı enerji taşıyıcılarının giriş ve çıkışını, dönüştürülmesini ve depolanmasını sağlayan bir birim olarak tanımlanmıştır [28], [40], [41]. Aynı zamanda, farklı talep türlerini karşılamak amacıyla birden fazla enerji taşıyıcısını birleştirmek için kullanılan enerji üreticileri ve tüketiciler arasında bir ara yüz olarak da tanımlanmıştır [30], [42], [46]. Bir başka tanımlamaya göre EH, enerji üretim, dönüştürme ve depolama sistemlerinden oluşan entegre enerji sistemleridir [37].

EH yapısında, giriş portlarında çeşitli enerji kaynakları tüketilerek, çıkış portlarında farklı enerji hizmetleri sağlanmaktadır. EH yapısında üç temel birim bulunmaktadır. Bunlar, giriş enerji kaynakları, enerji dönüşümü ve yük talebidir. EH modelinde tüketicilerin taleplerini karşılamak için giriş enerjisi olarak yenilenebilir enerji kaynakları, elektrik, doğal gaz ve ısı gibi farklı enerji kaynakları kullanılabilmektedir [28], [37]. Girişte kullanılan enerji kaynaklarından bazıları herhangi bir dönüştürme yapılmadan çıkışa

aktarılabılırken, bir kısmı da elektrik, ısı, soğutma, su, basınçlı hava ve diğer taleplere dönüştürülebilir. EH modelinde kullanılan temel unsurlar üç bölümde sınıflandırılabilir. Doğrudan bağlantılar, giriş portlarındaki enerji taşıyıcılarını başka bir forma dönüştürmeden çıkışa iletmek için kullanılırlar. Dönüştürücü elemanlar, giriş enerjisini çeşitli biçimlere dönüştürürler. Depolama cihazları ise, çeşitli enerji biçimlerini depolamak için kullanılır ve her bir enerji türü farklı teknolojiler kullanılarak depolanır [37], [46].

EH modelinde girişte istenilen sayıda enerji kaynağı kullanılabilir. Aynı zamanda, çıkışta farklı talep türleri de üretilebilir. Buna göre, EH modelleri giriş ve çıkış sayısına tek girişli tek çıkışlı (single input and single output, SISO), tek girişli çok çıkışlı (single input and multiple output, SIMO), çok girişli tek çıkışlı (multiple input and single output, MISO), çok girişli çok çıkışlı (multiple input and multiple output, MIMO) olarak dört sınıfa ayrılabilir [46].

Şekil 2.1’de basit bir EH modeli verilmiştir. Enerji taşıyıcısı- 1 ve 3’den ve gelen enerjiler başka bir forma dönüştürülmeden çıkışa iletilirler. Enerji taşıyıcısı-2’den gelen enerji, enerji dönüştürme cihazları B ve C arasında bölünür. B’den giren enerji taşıyıcısı, iki farklı enerji türüne dönüştürülür. A ve B dönüştürme cihazlarının çıkışından elde edilen ve mavi renk ile gösterilen çıkış enerjisi, E dönüştürme cihazının girişi olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak, EH modelinin girişinde üç enerji taşıyıcısı kullanarak, dönüştürme cihazları aracılığıyla çıkışta üç farklı talep türü üretilmiştir.



Şekil 2.1. Basit bir EH modeli.

EH modelinin birden fazla çıkışı olduğu durumda, giriş enerji taşıyıcılarından yüklere dönüşümü temsil eden bir dönüşüm (coupling) matrisi tanımlanır. SISO modele sahip bir EH, dönüşüm matrisi kullanılarak Eşitlik (2.1) ile ifade edilir [46].

$$E_{\beta}^{out} = C_{\alpha\beta} E_{\alpha}^{in} \quad (2.1)$$

Burada, $\{\alpha, \beta\}$ indisleri enerji taşıyıcılarını, E_{α}^{in} ve E_{β}^{out} sırasıyla giriş ve çıkış enerjisini temsil etmektedir. $C_{\alpha\beta}$ ise dönüşüm faktörüdür.

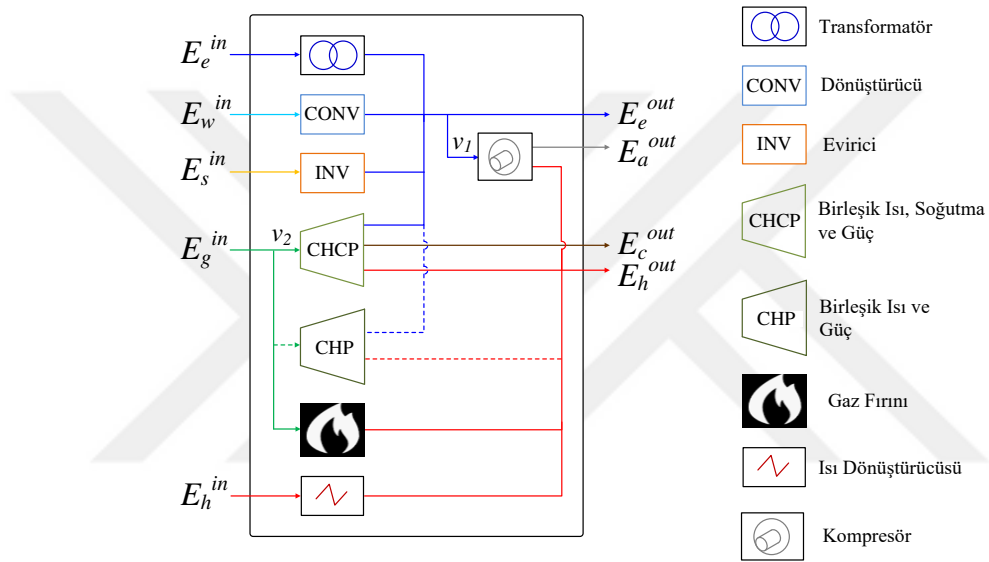
$$\underbrace{\begin{bmatrix} E_{\alpha}^{out} \\ E_{\beta}^{out} \\ \vdots \\ E_{\omega}^{out} \end{bmatrix}}_{E_{out}} = \underbrace{\begin{bmatrix} C_{\alpha\alpha} & C_{\beta\alpha} & \cdots & C_{\omega\alpha} \\ C_{\alpha\beta} & C_{\beta\beta} & \cdots & C_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\alpha\omega} & C_{\beta\omega} & \cdots & C_{\omega\omega} \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} E_{\alpha}^{in} \\ E_{\beta}^{in} \\ \vdots \\ E_{\omega}^{in} \end{bmatrix}}_{E_{in}} \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2)'de, E_{in} ve E_{out} sırasıyla giriş ve çıkış vektörünü, C dönüşüm matrisi, $\{\alpha, \beta, \dots, \omega\}$ ise enerji taşıyıcılarını temsil etmektedir. Dönüşüm matrisindeki her bir dönüşüm faktörü bir giriş ve çıkış ile ilişkilidir. SISO bir modelde, $C_{\alpha\beta}$ dönüştürme elemanının verimlilik katsayısına eşit olmaktadır. Ancak, MIMO bir modelde aynı durum söz konusu değildir. Şekil 2.1'den görüldüğü üzere, girişte kullanılan bir enerji taşıyıcısı birden fazla dönüştürme elemanına dağıtılabilir. Benzer şekilde, çıkışta üretilen enerji başka bir dönüştürme elemanının girişinde kullanılabilir. Bu durumda, her bir dönüştürme elemanına ne kadar enerji dağıtılacağını belirleyen dağıtım faktörü kullanılır.

Tez çalışmasında kullanılan EH modelinin genel yapısı Şekil 2.2'de verilmiştir. Şekil 2.2 incelendiğinde, hub girişinde elektrik (e), doğalgaz (g), ısı (h), rüzgar enerjisi (w) ve güneş enerjisi (s) olmak üzere beş farklı enerji taşıyıcısı kullanılmıştır. Çıkışta ise elektrik (e), ısı (h), basınçlı hava (a) ve soğutma (c) olarak dört farklı talep değeri üretilmektedir. Ayrıca, dönüştürme elemanları için iki farklı dağıtım faktörü tanımlanmıştır. Dağıtım faktörleri v_1 ve v_2 sırasıyla çıkış ve giriş için kullanılmaktadır. EH modelinde kullanılan enerji dönüştürme elemanları aşağıda açıklanmıştır:

- Transformatör (T): Elektrik enerjisini elektrik enerjisi üretir.
- Dönüştürücü (CONV): Rüzgar enerji santralinden üretilen AC gerilimi, AC gerilime dönüştürür.
- Evirici (INV): Güneş enerji santralinden üretilen DC gerilimi, AC gerilime dönüştürür.

- Birleşik ısı ve güç (CHP): Doğalgazın giriş enerjisi olarak kullanıldığı birimde, çıkışta ısı ve elektrik üretilir.
- Birleşik, ısı, soğutma ve güç (CHCP): Doğalgazın giriş enerjisi olarak kullanıldığı birimde, çıkış enerjisi olarak elektrik, ısı ve soğutma üretilir.
- Gaz fırını (GF): Doğalgazın tüketilerek ısı üretildiği birimdir.
- Kompresör (C): Girişinde elektrik enerjisini kullanarak, çıkış enerjisi olarak basınçlı hava ve ısı üretilir.
- Isı dönüştürücüsü (HE): Isı enerjisinin formunu değiştirilmediği birimde çıkışta ısı enerjisi elde edilir.



Şekil 2.2. EH modelinin genel yapısı.

Şekil 2.2’de verilen EH modelinde kullanılan giriş enerji taşıyıcılarının (elektrik (e), doğalgaz (g), ısı (h), rüzgar enerjisi (w) ve güneş enerjisi (s) ve dönüştürme elemanlarının (transformatör, dönüştürücü, evirici, CHP, CHCP, gaz fırını, ısı dönüştürücüsü ve kompresör) farklı kombinasyonlarda kullanıldığı 69 EH yapısı oluşturulmuştur. Bu EH yapıları Şekil 2.3’te verilmiştir. EH yapıları oluşturulurken dikkat edilen nokta, her bir yapıda mutlaka elektrik üretiminin üretilmesini sağlamak olmuştur. Oluşturulan EH yapılarının enerji dönüşüm ifadeleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

EH #1: EH yapısı sadece transformatörden oluşur ve Eşitlik (2.3) ile modellenir. Burada, n_T transformatörün verimlilik katsayısıdır.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \end{bmatrix} = [n_T] \begin{bmatrix} E_e^{in} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

EH #2: Transformatör ve CHP biriminden oluşan yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.4) ile ifade edilir. Burada, n_{CHPe} ve n_{CHPh} sırasıyla CHP biriminin elektrik ve ısı ile ilişkili olan verimlilik katsayısıdır.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CHPe} \\ 0 & n_{CHPh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

EH #3: Transformatör ve CHCP' den oluşan hub yapısında enerji dönüşümü Eşitlik (2.5) ile ifade edilir. Burada, n_{CHCPe} , n_{CHCP_h} , ve n_{CHCP_c} sırasıyla CHCP biriminin elektrik, ısı ve soğutma ile ilişkili olan verimlilik katsayısıdır.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CHCPe} \\ 0 & n_{CHCP_h} \\ 0 & n_{CHCP_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

EH #4: EH yapısı transformatör ve gaz fırınından oluşur. Giriş ve çıkış arasındaki enerji dönüşümü Eşitlik (2.6) ile formüle edilir. Burada, n_{GF} gaz fırınının verimlilik katsayısıdır.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & 0 \\ 0 & n_{GF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

EH #5: Elektrik ve ısı, transformatör ve ısı dönüştürücü kullanılarak elektrik ve ısıya dönüştürülür. Bu enerji dönüşümü Eşitlik (2.7) ile ifade edilir. Burada, n_{HE} ısı dönüştürücüsünün verimlilik katsayısıdır.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & 0 \\ 0 & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

EH #6: Transformatör ve kompresör birimlerinden oluşan yapıda sadece elektrik tüketilerek elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir. Giriş ve çıkış arasındaki enerji dönüşümü Eşitlik (2.8) ile ifade edilir. Burada, n_{Ch} ve n_{Ca} kompresör biriminin ısı ve

basınçlı hava ile ilişkili olan verimlilik katsayısıdır.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T \\ v_1 n_T n_{C_h} \\ v_1 n_T n_{C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

EH #7: Transformatör, CHP ve gaz fırınından oluşan yapıda elektrik ve ısı üretilmektedir. Giriş ve çıkış arasındaki enerji dönüşümü matematiksel olarak Eşitlik (2.9) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & v_2 n_{CHPe} \\ 0 & v_2 n_{CHPh} + (1-v_2)n_{GF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

EH #8: Bu EH yapısı, transformatör, CHP ve ısı dönüştürücüsünden oluşmaktadır. Elektrik ve ısı enerjisinin üretildiği yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.10) ile modellenir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CHPe} & 0 \\ 0 & n_{CHPh} & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

EH #9: Bu yapıda, rüzgar enerjisi ve doğal gaz kullanılarak dönüştürücü, CHP ve kompresör vasıtasıyla elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir. Enerji dönüşümü Eşitlik (2.11) ile ifade edilir. Burada, n_{CONV} dönüştürücünün verimlilik oranıdır.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{CHPe} \\ v_1 n_{CONV} n_{C_h} & n_{CHPh} + v_1 n_{CHPe} n_{C_h} \\ v_1 n_{CONV} n_{C_a} & v_1 n_{CHPe} n_{C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_w^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

EH #10: CHCP, kompresör ve gaz fırınının kullanıldığı yapıda, rüzgar enerjisi ve doğalgaz kullanılarak elektrik, ısı ve soğutma üretilmektedir. Enerji dönüşümü Eşitlik (2.12) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{CONV} & v_2 n_{CHCP_e} \\ 0 & v_2 n_{CHCP_h} + (1-v_2) n_{GF} \\ 0 & v_2 n_{CHCP_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_w^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

EH #11: Bu yapıda, güneş enerjisi, doğal gaz ve ısı, Eşitlik (2.13) ile elektrik, ısı ve soğutmaya dönüştürülmektedir. Burada, n_{INV} eviricinin verimlilik katsayısıdır.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{INV} & n_{CHCP_e} & 0 \\ 0 & n_{CHCP_h} & n_{HE} \\ 0 & n_{CHCP_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

EH #12: Güneş enerjisi ve doğal gaz kullanılarak elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı hava üretildiği yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.14) ile modellenir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1) n_{INV} & (1-v_1) n_{CHCP_e} \\ v_1 n_{INV} n_{C_h} & n_{CHCP_h} + v_1 n_{CHCP_e} n_{C_h} \\ 0 & n_{CHCP_c} \\ v_1 n_{INV} n_{C_a} & v_1 n_{CHCP_e} n_{C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

EH #13: Transformatör, kompresör ve gaz fırının kullanıldığı yapıda, elektrik ve doğalgaz Eşitlik (2.15) ile elektrik, ısıya ve basınçlı havaya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1) n_T & 0 \\ v_1 n_T n_{C_h} & n_{GF} \\ v_1 n_T n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

EH #14: Elektrik, ısı ve basınçlı hava üretmek için dönüştürücü, kompresör ve ısı dönüştürücüsü kullanılan yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.16) ile modellenir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1) n_{CONV} & 0 \\ v_1 n_{CONV} n_{C_h} & n_{HE} \\ v_1 n_{CONV} n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_w^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

EH #15: Güneş enerjisi, doğalgaz ve ısınin enerji taşıyıcısı olarak kullanıldığı yapıda, evirici, gaz fırını ve ısı dönüştürücüsü kullanılarak elektrik ve ısı üretilmektedir. Enerji dönüşümü ise Eşitlik (2.17) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{INV} & 0 & 0 \\ 0 & n_{GF} & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

EH #16: Elektrik, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi kullanılarak sadece elektrik enerjisinin üretildiği yapı Eşitlik (2.18) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

EH #17: Transformatör, dönüştürücü ve CHP birimlerinin kullanıldığı yapıda, elektrik, rüzgar enerjisi ve doğalgaz Eşitlik (2.19) ile elektrik ve ısıya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{CHPe} \\ 0 & 0 & n_{CHPh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

EH #18: Elektrik, güneş enerjisi ve doğalgaz kullanılarak transformatör, evirici ve CHCP birimleri vasıtasıyla elektrik, ısı ve soğutma üretilmektedir. Enerji dönüşümü Eşitlik (2.20) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{INV} & n_{CHCPe} \\ 0 & 0 & n_{CHCPh} \\ 0 & 0 & n_{CHCpc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

EH #19: Girişin elektrik, güneş enerjisi ve doğalgaz olduğu, çıkışın ise elektrik ve ısı olduğu yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.21) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{INV} & 0 \\ 0 & 0 & n_{GF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

EH #20: Transformatör, evirici ve ısı dönüştürücüsünün kullanıldığı yapıda, elektrik, güneş enerjisi ve ısı tüketilerek elektrik ve ısı üretilmektedir. Enerji dönüşümü ise Eşitlik (2.22) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{INV} & 0 \\ 0 & 0 & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_s^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

EH #21: Elektrik, ısı ve basınçlı hava üretmek için elektrik ve rüzgar enerjisinin transformatör, dönüştürücü ve kompresör tarafından tüketildiği yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.23) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

EH #22: Dönüştürücü, CHP, gaz fırını ve ısı dönüştürücüsünün kullanıldığı yapıda rüzgar enerjisi, doğalgaz ve ısı Eşitlik (2.24) ile elektrik ve ısıya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{CONV} & v_2n_{CHP_e} & 0 \\ 0 & v_2n_{CHP_h} + (1-v_2)n_{GF} & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_w^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

EH #23: Girişinde elektrik ve doğalgaz kullanılan yapıda, Eşitlik (2.25) ile elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)v_2n_{CHP_e} \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_2n_{CHP_h} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHP_e}n_{C_h} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1v_2n_{CHP_e}n_{C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

EH #24: Evirici, CHP, kompresör ve ısı dönüştürücüsünün kullanıldığı yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.26) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_{INV} & (1-v_1)n_{CHPe} & 0 \\ v_1n_{INV}n_{Ch} & n_{CHPh} + v_1n_{CHPe}n_{Ch} & n_{HE} \\ v_1n_{INV}n_{Ca} & v_1n_{CHPe}n_{Ca} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

EH #25: Elektrik, doğalgaz ve ısı olarak girişinde üç farklı enerji taşıyıcısının kullanıldığı yapıda elektrik, ısı ve soğutma üretilmektedir. Enerji dönüşümü Eşitlik (2.27) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & v_2n_{CHPe} & 0 \\ 0 & v_2n_{CHPh} + (1-v_2)n_{GF} & n_{HE} \\ 0 & v_2n_{CHPe} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

EH #26: Rüzgar enerjisi ve doğalgazın, elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı havaya dönüştürüldüğü yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.28) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)v_2n_{CHPe} \\ v_1n_{CONV}n_{Ch} & v_2n_{CHPh} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHPe}n_{Ch} \\ 0 & v_2n_{CHPe} \\ v_1n_{CONV}n_{Ca} & v_1v_2n_{CHPe}n_{Ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_w^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

EH #27: EH yapısında, elektrik, doğal gaz ve ısı kullanılarak elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı hava üretmek için transformatör, CHCP, kompresör ve ısı dönüştürücüsü kullanılmıştır. Enerji dönüşümü Eşitlik (2.29) ile modellenir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CHPe} & 0 \\ v_1n_Tn_{Ch} & n_{CHPh} + v_1n_{CHPe}n_{Ch} & n_{HE} \\ 0 & n_{CHPe} & 0 \\ v_1n_Tn_{Ca} & v_1n_{CHPe}n_{Ca} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

EH #28: Transformatör, evirici, CHCP ve kompresör içeren yapı, Eşitlik (2.30) ile elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{INV} & (1-v_1)n_{CHPe} \\ v_1n_Tn_{Ch} & v_1n_{INV}n_{Ch} & n_{CHPh} + v_1n_{CHPe}n_{Ch} \\ v_1n_Tn_{Ca} & v_1n_{INV}n_{Ca} & v_1n_{CHPe}n_{Ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

EH #29: Girişinde elektrik, rüzgar enerjisi ve doğalgazın kullanıldığı yapıda Eşitlik (2.31) ile elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı hava üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{CHPe} \\ v_1n_Tn_{Ch} & v_1n_{CONV}n_{Ch} & n_{CHPh} + v_1n_{CHPe}n_{Ch} \\ 0 & 0 & n_{CHPc} \\ v_1n_Tn_{Ca} & v_1n_{CONV}n_{Ca} & v_1n_{CHPe}n_{Ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

EH #30: Elektrik, güneş enerjisi ve doğal gaz kullanılarak elektrik ve ısı üretilen yapıda enerji dönüşümü matematiksel olarak Eşitlik (2.32) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{INV} & v_2n_{CHPe} \\ 0 & 0 & v_2n_{CHPh} + (1-v_2)n_{GF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

EH #31: Transformatör, dönüştürücü, CHCP ve gaz fırını kullanılarak elektrik, rüzgar enerjisi ve doğalgazın elektrik, ısı ve soğutmaya dönüştürüldüğü yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.33) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & v_2n_{CHPe} \\ 0 & 0 & v_2n_{CHPh} + (1-v_2)n_{GF} \\ 0 & 0 & v_2n_{CHPc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

EH #32: Rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısısının dönüştürücü, evirici, CHP ve ısı dönüştürücüsü tarafından tüketilerek elektrik ve ısıya dönüştürüldüğü yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.34) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{CONV} & n_{INV} & n_{CHPe} & 0 \\ 0 & 0 & n_{CHPh} & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

EH #33: Elektrik, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı Eşitlik (2.35) vasıtasıyla elektrik, ısı ve soğutmaya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{INV} & n_{CHPe} & 0 \\ 0 & 0 & n_{CHPh} & n_{HE} \\ 0 & 0 & n_{CHPc} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

EH #34: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve doğalgazın transformatör, dönüştürücü, evirici ve CHP tarafından tüketildiği yapıda Eşitlik (2.36) ile elektrik ve ısı üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & n_{CHPe} \\ 0 & 0 & 0 & n_{CHPh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

EH #35: Elektrik ve ısı enerjisi transformatör, dönüştürücü, evirici ve CHCP tarafından tüketilerek elektrik, ısı ve soğutma üretilmektedir. Enerji dönüşümü Eşitlik (2.37) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & n_{CHPe} \\ 0 & 0 & 0 & n_{CHPh} \\ 0 & 0 & 0 & n_{CHPc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

EH #36: Elektrik ve ısı üretildiği yapıda enerji dönüşümü matematiksel olarak Eşitlik (2.38) ile modellenir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{GF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

EH #37: Transformatör, dönüştürücü, evirici ve ısı dönüştürücüsünden oluşan yapı elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve ısıyı kullanarak Eşitlik (2.39) ile elektrik ve ısı üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

EH #38: Transformatör, dönüştürücü, evirici ve kompresör içeren yapıda, elektrik, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi Eşitlik (2.40) ile elektrik, ısı ve soğutmaya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

EH #39: Çıkış enerji taşıyıcılarının elektrik, ısı ve basınçlı hava olduğu yapıda girişte elektrik, rüzgar enerjisi ve doğalgaz tüketilmektedir. Enerji dönüşümü Eşitlik (2.41) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & 0 \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & n_{GF} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

EH #40: Giriş enerji taşıyıcılarının elektrik, güneş enerjisi ve ısı olduğu yapıda, transformatör, evirici, kompresör ve ısı dönüştürücüsü aracılığıyla elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir. Giriş ve çıkış arasındaki enerji dönüşümü Eşitlik (2.42) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{INV} & 0 \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & n_{HE} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_s^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

EH #41: Bu EH yapısında rüzgar enerjisi, doğalgaz ve ısı tüketilerek elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir. Enerji dönüşümü Eşitlik (2.43) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)v_2n_{CHP_e} & 0 \\ v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_2n_{CHP_h} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHP_e}n_{C_h} & n_{HE} \\ v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1v_2n_{CHP_e}n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_w^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

EH #42: Güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı kullanıldığı yapıda elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı hava üretilmektedir. Enerji dönüşümü Eşitlik (2.44) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_{INV} & (1-v_1)v_2n_{CHCP_e} & 0 \\ v_1n_{INV}n_{C_h} & v_2n_{CHCP_h} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHCP_e}n_{C_h} & n_{HE} \\ 0 & v_2n_{CHCP_c} & 0 \\ v_1n_{INV}n_{C_a} & v_1v_2n_{CHCP_e}n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

EH #43: Transformatör, dönüştürücü, CHP, kompresör ve gaz fırını birimlerini içeren yapıda elektrik, rüzgar enerjisi ve doğalgaz tüketilerek elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir. Giriş ve çıkış arasındaki enerji dönüşümü Eşitlik (2.45) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)v_2n_{CHP_e} \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_2n_{CHP_h} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHP_e}n_{C_h} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1v_2n_{CHP_e}n_{C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

EH #44: Transformatör, dönüştürücü, CHCP, kompresör ve gaz fırını birimlerini içeren yapıda elektrik, güneş enerjisi ve doğalgaz tüketilerek elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı hava üretilmektedir. Giriş ve çıkış arasındaki enerji dönüşümü Eşitlik (2.46) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{INV} & (1-v_1)v_2n_{CHCP_e} \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & v_2n_{CHCP_h} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHCP_e}n_{C_h} \\ 0 & 0 & v_2n_{CHCP_c} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & v_1v_2n_{CHCP_e}n_{C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

EH #45: Dönüştürücü, evirici, CHP, gaz fırını ve ısı dönüştürücüsünün kullanıldığı yapıda rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı Eşitlik (2.47) ile elektrik ve ısıya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{CONV} & n_{INV} & v_2n_{CHP_e} & 0 \\ 0 & 0 & v_2n_{CHP_h} + (1-v_2)n_{GF} & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

EH #46: Elektrik, rüzgar enerjisi, doğalgaz ve ısı transformatör, dönüştürücü, CHCP, gaz fırını ve ısı dönüştürücüsü aracılığıyla elektrik, ısı ve basınçlı havaya dönüştürülmektedir. Giriş ve çıkış arasındaki enerji dönüşümü Eşitlik (2.48) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & v_2n_{CHCP_e} & 0 \\ 0 & 0 & v_2n_{CHCP_h} + (1-v_2)n_{GF} & n_{HE} \\ 0 & 0 & v_2n_{CHCP_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

EH #: Elektrik, ısı ve basınçlı havanın üretildiği yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.49) ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{INV} & (1-v_1)n_{CHP_e} & 0 \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & n_{CHP_h} + v_1n_{CHP_e}n_{C_h} & n_{HE} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & v_1n_{CHP_e}n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

EH #48: Elektrik, rüzgar enerjisi, doğalgaz ve ısı tüketildiği yapıda elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı hava üretilmektedir. Enerji dönüşümü matematiksel olarak Eşitlik

(2.50) ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{CHCP_e} & 0 \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & n_{CHCP_h} + v_1n_{CHCP_e}n_{C_h} & n_{HE} \\ 0 & 0 & n_{CHCP_c} & 0 \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1n_{CHCP_e}n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

EH #49: Rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı Eşitlik (2.51) vasıtasıyla elektrik, ısı ve basınçlı havaya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & 0 & 0 \\ v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & n_{GF} & n_{HE} \\ v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

EH #50: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve doğalgazın tüketildiği yapıda Eşitlik (2.52) aracılığıyla elektrik ve ısı üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & v_2n_{CHP_e} \\ 0 & 0 & 0 & v_2n_{CHP_h} + (1-v_2)n_{GF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

EH #51: Transformatör, dönüştürücü, evirici, CHCP ve gaz fırınının kullanıldığı yapıda Eşitlik (2.53) ile elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & v_2n_{CHP_e} \\ 0 & 0 & 0 & v_2n_{CHP_h} + (1-v_2)n_{GF} \\ 0 & 0 & 0 & v_2n_{CHP_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

EH #52: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı Eşitlik (2.54) ile elektrik ve ısıya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & n_{CHPe} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{CHPh} & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

EH #53: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısıtın tüketildiği yapıda transformatör, dönüştürücü, evirici, CHCP ve ısı dönüştürücüsü vasıtasıyla Eşitlik (2.55) ile elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & n_{CHPCc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{CHPh} & n_{HE} \\ 0 & 0 & 0 & n_{CHPCc} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

EH #54: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve doğalgaz tüketilen yapıda Eşitlik (2.56) ile elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & (1-v_1)n_{CHPe} \\ v_1n_Tn_{Ch} & v_1n_{CONV}n_{Ch} & v_1n_{INV}n_{Ch} & n_{CHPh} + v_1n_{CHPe}n_{Ch} \\ v_1n_Tn_{Ca} & v_1n_{CONV}n_{Ca} & v_1n_{INV}n_{Ca} & v_1n_{CHPe}n_{Ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

EH #55: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve doğalgaz tüketilen yapıda Eşitlik (2.57) ile elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı hava üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & (1-v_1)n_{CHPe} \\ v_1n_Tn_{Ch} & v_1n_{CONV}n_{Ch} & v_1n_{INV}n_{Ch} & n_{CHPh} + v_1n_{CHPe}n_{Ch} \\ 0 & 0 & 0 & n_{CHPCc} \\ v_1n_Tn_{Ca} & v_1n_{CONV}n_{Ca} & v_1n_{INV}n_{Ca} & v_1n_{CHPe}n_{Ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

EH #56: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı enerji taşıyıcılarının giriş olarak kullanıldığı yapıda transformatör, dönüştürücü, evirici, gaz fırını ve ısı

dönüştürücüsü vasıtasıyla Eşitlik (2.58) ile elektrik ve ısı üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{GF} & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

EH #57: Transformatör, dönüştürücü, evirici, gaz fırını ve kompresör birimlerini içeren yapıda elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve doğalgaz Eşitlik (2.59) ile elektrik, ısı ve basınçlı havaya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & 0 \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & n_{GF} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

EH #58: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve ısınn tüketildiği yapıda transformatör, dönüştürücü, evirici, ısı dönüştürücüsü ve kompresör vasıtasıyla elektrik, ısı ve basınçlı havaya üretilmektedir. Enerji dönüşümü matematiksel olarak Eşitlik (2.60) ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & 0 \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{C_w}n_{C_h} & v_1n_{C_s}n_{C_h} & n_{HE} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{C_w}n_{C_a} & v_1n_{C_s}n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

EH #59: Transformatör, dönüştürücü, evirici, CHP, kompresör ve ısı dönüştürücüsü birimlerinden oluşan yapıda elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve ısı tüketilerek elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir. Enerji dönüşümü matematiksel olarak Eşitlik (2.61) ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)v_2n_{CHPe} \\ v_1n_Tn_{Ch} & v_1n_{CONV}n_{Ch} & v_2n_{CHPh} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHPe}n_{Ch} \dots \\ v_1n_Tn_{Ca} & v_1n_{CONV}n_{Ca} & v_1v_2n_{CHPe}n_{Ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

EH #60: Transformatör, dönüştürücü, evirici, CHCP, kompresör ve ısı dönüştürücüsü birimlerinden oluşan yapıda elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve ısı tüketilerek elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı hava üretilmektedir. Enerji dönüşümü matematiksel olarak Eşitlik (2.62) ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)v_2n_{CHCPe} \\ v_1n_Tn_{Ch} & v_1n_{CONV}n_{Ch} & v_2n_{CHCP_h} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHCPe}n_{Ch} \dots \\ 0 & 0 & v_2n_{CHCP_c} \\ v_1n_Tn_{Ca} & v_1n_{CONV}n_{Ch} & v_1v_2n_{CHCPe}n_{Ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

EH #61: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı Eşitlik (2.63) ile elektrik, ısı ve basınçlı havaya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & 0 & 0 \\ v_1n_Tn_{Ch} & v_1n_{CONV}n_{Ch} & v_1n_{INV}n_{Ch} & n_{GF} & n_{HE} \\ v_1n_Tn_{Ca} & v_1n_{CONV}n_{Ca} & v_1n_{INV}n_{Ca} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

EH #62: Transformatör, dönüştürücü, evirici, CHP, kompresör ve gaz fırını birimlerinden oluşan yapıda elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve doğalgaz tüketilerek elektrik, ısı

ve basınçlı hava üretilmektedir. Enerji dönüşümü matematiksel olarak Eşitlik (2.64) ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & & \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & \dots & \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & & \\ & (1-v_1)v_2n_{CHP_e} & & & \\ \dots & v_2n_{CHP_h} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHP_e}n_{C_h} & & & \\ & v_1v_2n_{CHP_e}n_{C_a} & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

EH #63: Transformatör, dönüştürücü, evirici, CHP, kompresör ve ısı dönüştürücüsü vasıtasıyla elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı tüketilerek elektrik, ısı ve basınçlı hava üretilmektedir. Enerji dönüşümü Eşitlik (2.65) ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & (1-v_1)n_{CHP_e} & 0 \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & n_{CHP_h} + v_1n_{CHP_e}n_{C_h} & n_{HE} \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & v_1n_{CHP_e}n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

EH #64: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı Eşitlik (2.66) ile elektrik ve ısıya dönüştürülmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & v_2n_{CHP_e} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_2n_{CHP_h} + (1-v_2)n_{GF} & n_{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

EH #65: Elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı havanın üretildiği yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.67) ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & & \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & & \\ 0 & 0 & 0 & & \dots \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & & \\ & (1-v_1)v_2n_{CHCP_e} & & & \\ & v_2n_{CHCP_h} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHCP_e}n_{C_h} & & & \\ \dots & & & & \\ & v_2n_{CHCP_c} & & & \\ & v_1v_2n_{CHCP_e}n_{C_a} & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

EH #66: Transformatör, dönüştürücü, evirici, CHCP, kompresör ve ısı dönüştürücüsü içeren yapıda enerji dönüşümü Eşitlik (2.68) ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & (1-v_1)n_{CHCP_e} & 0 \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & n_{CHCP_h} + v_1n_{CHCP_e}n_{C_h} & n_{HE} \\ 0 & 0 & 0 & n_{CHCP_c} & 0 \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & v_1n_{CHCP_e}n_{C_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

EH #67: Elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı Eşitlik (2.69) ile elektrik, ısı ve basınçlı havaya dönüştürülmektedir.

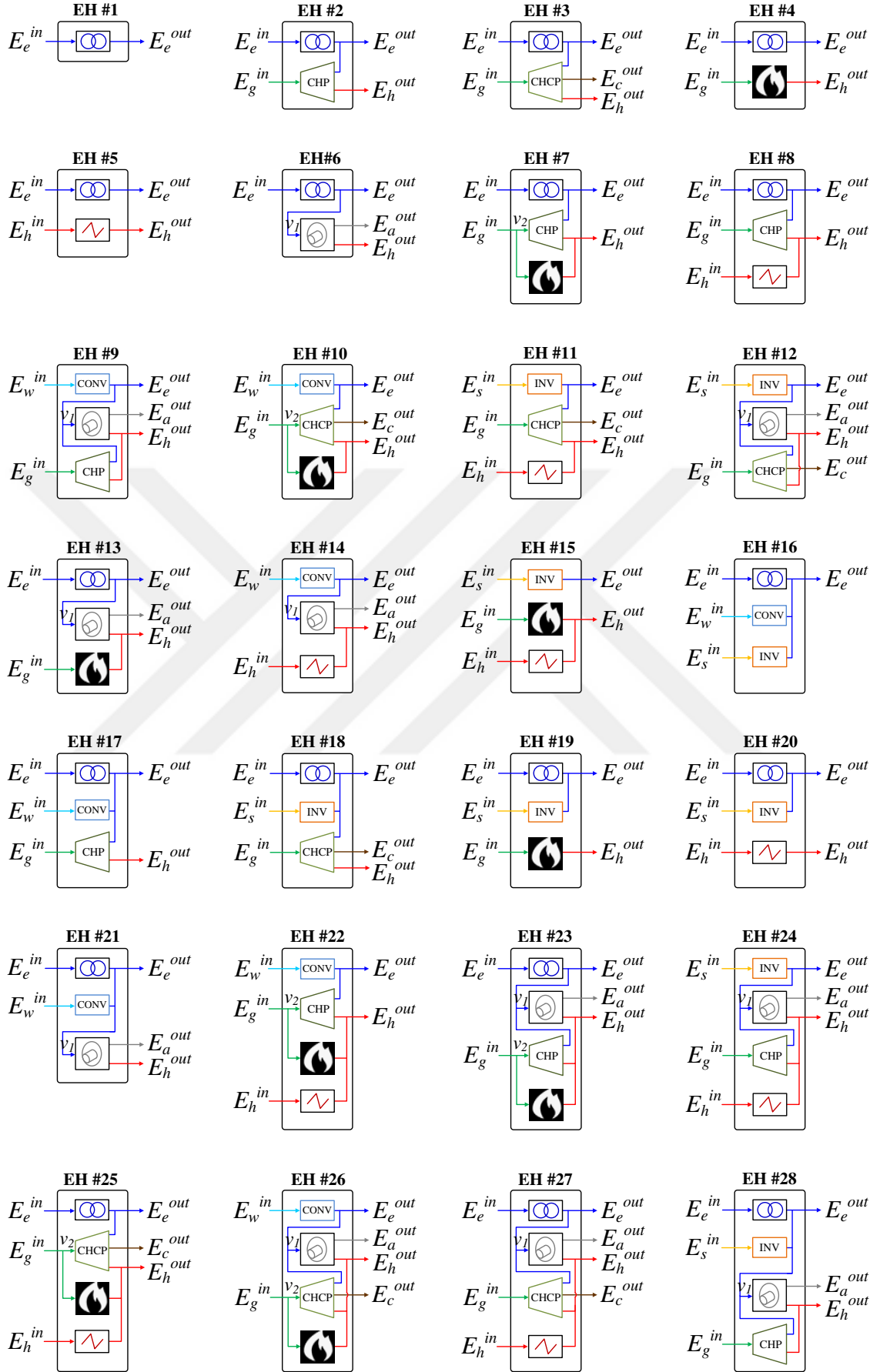
$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_T & n_{CONV} & n_{INV} & v_2n_{CHCP_e} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_2n_{CHCP_h} + (1-v_2)n_{GF} & n_{HE} \\ 0 & 0 & 0 & v_2n_{CHCP_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

EH #68: Transformatör, dönüştürücü, evirici, CHP, kompresör, gaz fırını ve ısı dönüştürücüsünün kullanıldığı yapıda elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı Eşitlik (2.70) ile elektrik, ısı ve basınçlı havaya dönüştürülmektedir.

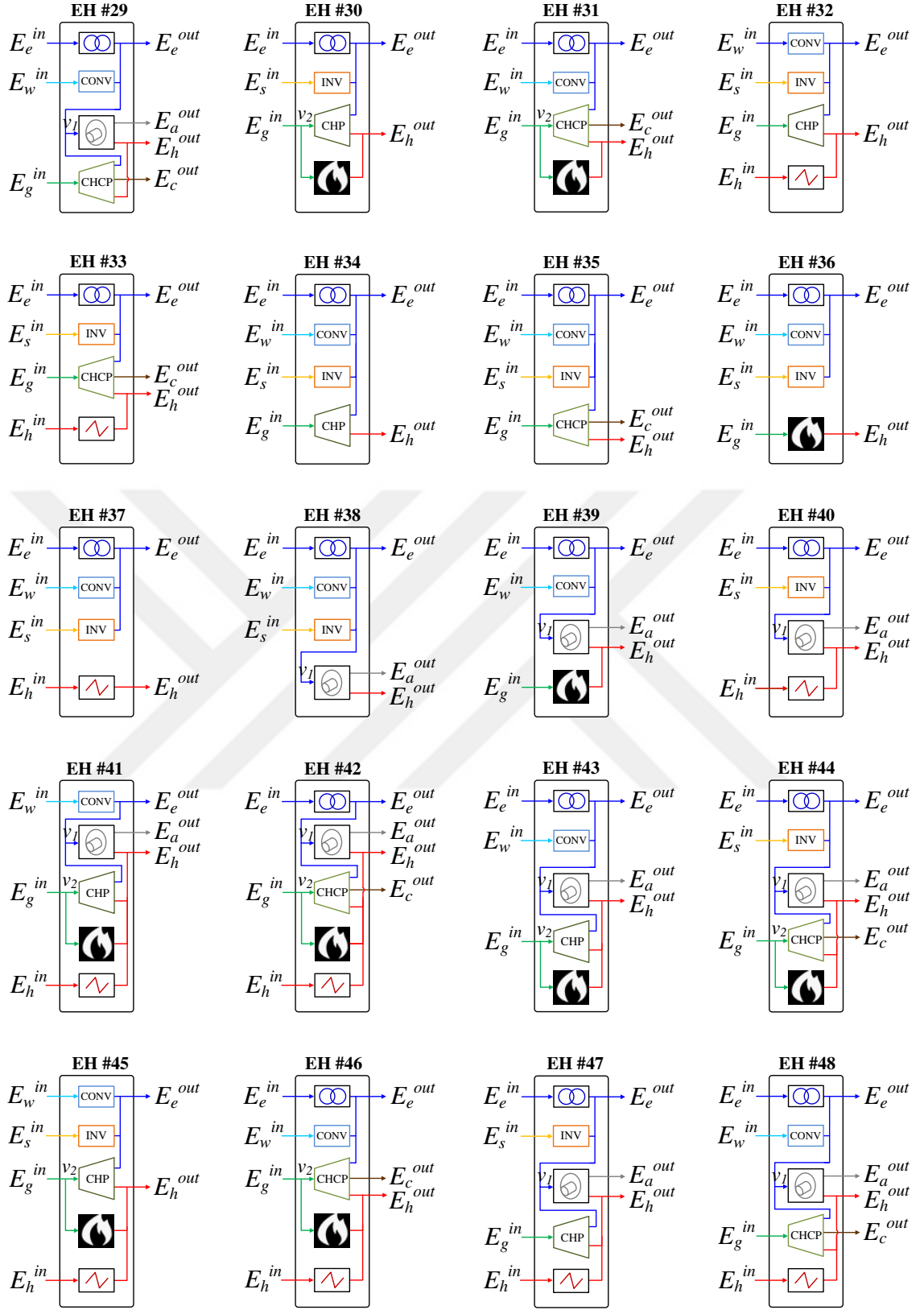
$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & \dots \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & \\ & (1-v_1)v_2n_{CHP_e} & 0 & \\ \dots & v_2n_{CHP_h} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHP_e}n_{C_h} & n_{HE} & \\ & v_1v_2n_{CHP_e}n_{C_a} & 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

EH #69: Transformatör, dönüştürücü, evirici, CHCP, kompresör, gaz fırını ve ısı dönüştürücüsünün kullanıldığı yapıda elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğalgaz ve ısı Eşitlik (2.71) ile elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı havaya dönüştürülmektedir.

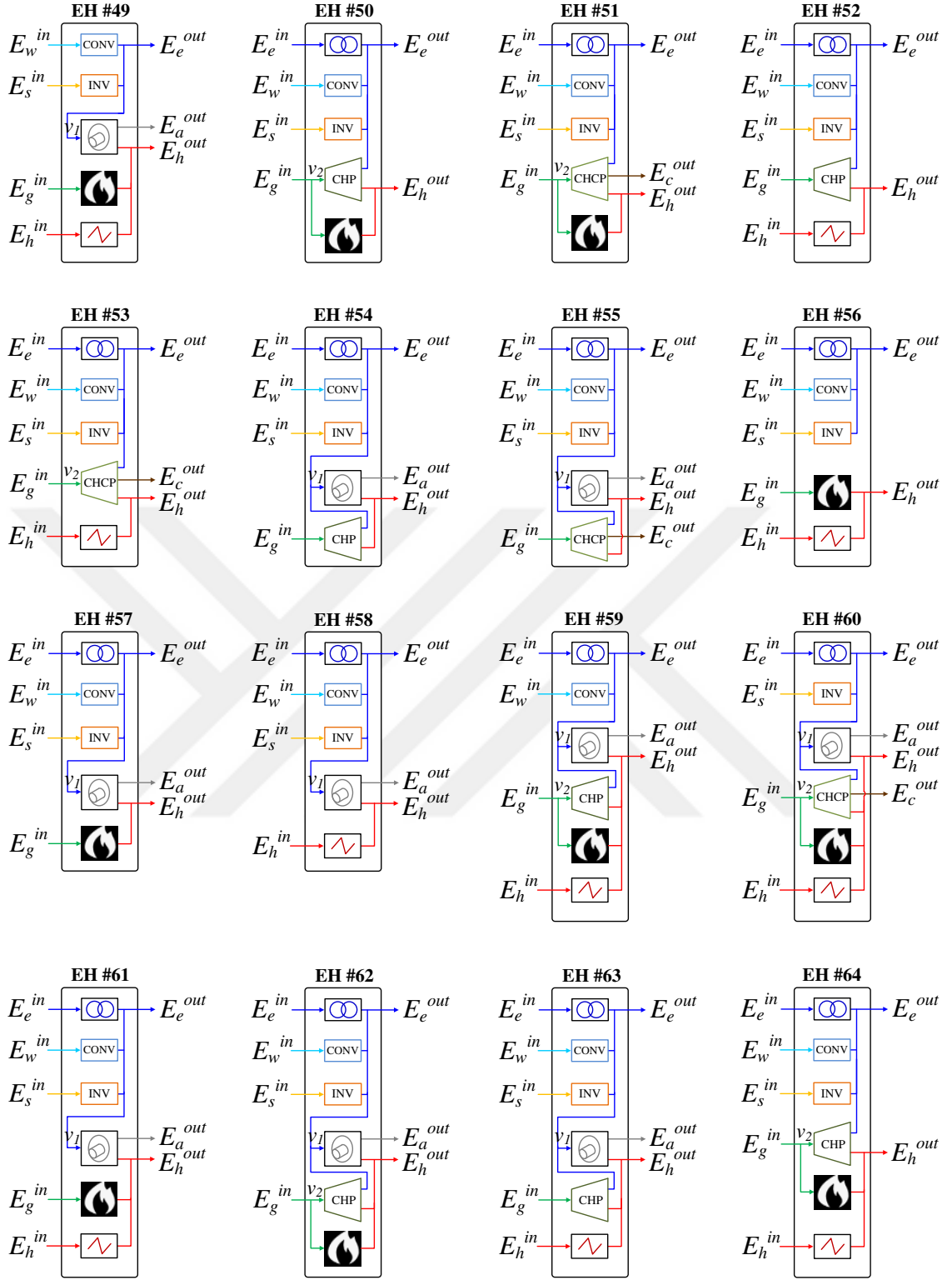
$$\begin{bmatrix} E_e^{out} \\ E_h^{out} \\ E_c^{out} \\ E_a^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_1)n_T & (1-v_1)n_{CONV} & (1-v_1)n_{INV} & \\ v_1n_Tn_{C_h} & v_1n_{CONV}n_{C_h} & v_1n_{INV}n_{C_h} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \\ v_1n_Tn_{C_a} & v_1n_{CONV}n_{C_a} & v_1n_{INV}n_{C_a} & \\ & (1-v_1)v_2n_{CHCP_e} & 0 & \\ & v_2n_{CHCP_h} + (1-v_2)n_{GF} + v_1v_2n_{CHCP_e}n_{C_h} & n_{HE} & \\ \dots & v_2n_{CHCP_c} & 0 & \\ & v_1v_2n_{CHCP_e}n_{C_a} & 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e^{in} \\ E_w^{in} \\ E_s^{in} \\ E_g^{in} \\ E_h^{in} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$



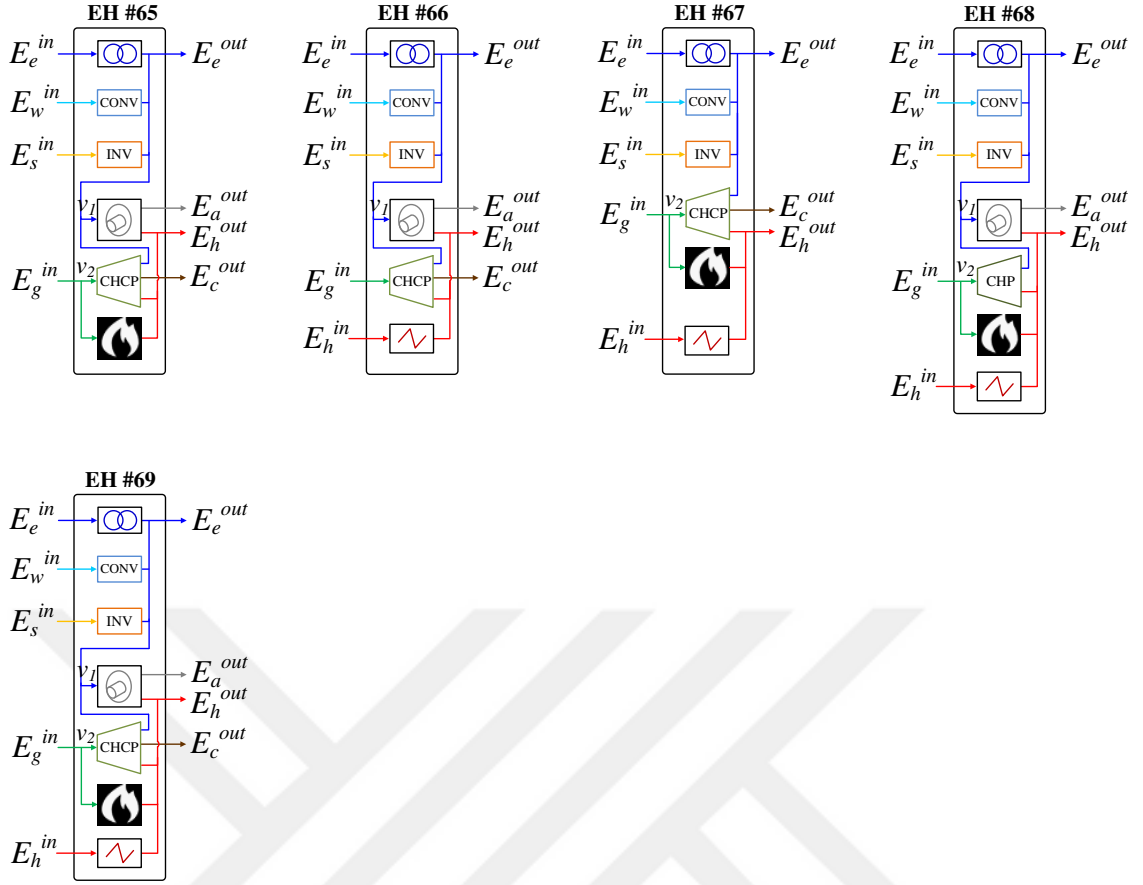
Şekil 2.3. Önerilen EH yapıları.



Şekil 2.3. (devam) Önerilen EH yapıları.



Şekil 2.3. (devam) Önerilen EH yapıları.



Şekil 2.3. (devam) Önerilen EH yapıları.

2.2. ENERJİ KAYNAKLARININ MALİYET MODELLERİ

Bu bölümde, “Bölüm 2.1. Enerji Hubın Matematiksel Modellenmesi” bölümünde matematiksel modelleri verilen EH yapılarında kullanılan enerji taşıyıcılarının maliyet modelleri açıklanmıştır. EH yapılarında, elektrik, doğalgaz, ısı, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi olmak üzere beş enerji taşıyıcısı bulunmaktadır ve her bir enerji taşıyıcısının maliyeti ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bu bölüme ait alt bölümlerde, enerji taşıyıcılarının maliyet modelleri tanımlanmıştır.

2.2.1. Elektrik Enerji Taşıyıcısının Maliyet Modeli

Termik üretim birimlerindeki klasik yakıt maliyet fonksiyonu, Eşitlik (2.72)’de verilen ikinci dereceden bir maliyet fonksiyonu olarak tanımlanır. Burada, CF maliyeti, a_j , b_j ve c_j j . jeneratörün maliyet katsayıları, P_j j . jeneratörün çıkış gücü ve N toplam jeneratör sayısını ifade etmektedir [46], [61], [62].

$$CF = \sum_{j=1}^N \left(a_j + b_j P_j + c_j (P_j)^2 \right) \quad (2.72)$$

Generatörlerin maliyet fonksiyonunu daha gerçekçi ve hassas bir şekilde modellemek için valf nokta etkisinin dikkate alınması gerekir. Bu nedenle, bu çalışmada elektrik enerjisi taşıyıcısının enerji üretim maliyeti Eşitlik (2.73) ile hesaplanmaktadır. Burada, CF_e elektrik enerji taşıyıcısının toplam maliyeti, $d_{j,e}$ ve $e_{j,e}$ j . jeneratörün valf nokta etkisinin maliyet katsayıları, $E_{j,e}^{in}$ j . jeneratörün enerji üretimi ve N_e elektrik enerji taşıyıcılarının toplam sayısıdır [46], [61], [62].

$$CF_e = \sum_{j=1}^{N_e} \left(a_{j,e} + b_{j,e} E_{j,e}^{in} + c_{j,e} (E_{j,e}^{in})^2 + \left| d_{j,e} \sin \left(e_{j,e} (E_{j,e}^{in, \min} - E_{j,e}^{in}) \right) \right| \right) \quad (2.73)$$

2.2.2. Doğalgaz ve Isı Enerji Taşıyıcılarının Maliyet Modeli

Doğalgaz ve ısı enerji taşıyıcılarının maliyeti, Eşitlik (2.72)'de verilen jeneratörlerin klasik maliyet modeline göre modellenmiştir. Doğal gaz ve ısı enerji taşıyıcılarının maliyeti sırasıyla Eşitlik (2.74) ve (2.75)'te verilmiştir [46]. Denklemlerde CF_g ve CF_h sırasıyla doğal gaz ve ısı enerji taşıyıcılarının toplam enerji üretim maliyetini, N_g ve N_h sırasıyla doğalgaz ve ısı enerji taşıyıcılarının toplam sayısıdır.

$$CF_g = \sum_{j=1}^{N_g} \left(a_{j,g} + b_{j,g} E_{j,g}^{in} + c_{j,g} (E_{j,g}^{in})^2 \right) \quad (2.74)$$

$$CF_h = \sum_{j=1}^{N_h} \left(a_{j,h} + b_{j,h} E_{j,h}^{in} + c_{j,h} (E_{j,h}^{in})^2 \right) \quad (2.75)$$

2.2.3. Rüzgar Enerji Taşıyıcısının Maliyet Modeli

Rüzgar enerji sistemlerinin toplam maliyeti planlanan güçle ilgili doğrudan maliyet, eksik tahmin için ceza maliyeti ve fazla tahmin için rezerv maliyetinden oluşur. Rüzgar enerjisinin toplam maliyeti Eşitlik (2.76) ile hesaplanır [60], [61].

$$CF_w = \sum_{j=1}^{N_{wg}} \left[C_{w,j}(P_{ws,j}) + C_{Rw,j}(P_{ws,j} - P_{wav,j}) + C_{Pw,j}(P_{wav,j} - P_{ws,j}) \right] \quad (2.76)$$

Burada $C_{w,j}(P_{ws,j})$, $C_{Pw,j}(P_{wav,j} - P_{ws,j})$, ve $C_{Rw,j}(P_{ws,j} - P_{wav,j})$ sırasıyla doğrudan maliyet, rezerv maliyeti, ve ceza maliyetini göstermektedir. N_{wg} ise toplam rüzgar jeneratörlerinin sayısıdır.

Rüzgar enerjisinin doğrudan maliyeti,

$$C_{w,j}(P_{ws,j}) = g_j P_{ws,j} \quad (2.77)$$

ile hesaplanır. Eşitlik (2.77)'de, $P_{ws,j}$ j . rüzgar jeneratörünün planlanan gücü ve g_j doğrudan maliyet katsayısıdır.

Rüzgar enerjisinin ceza maliyeti Eşitlik (2.78) ile hesaplanır. Burada $K_{Pw,j}$ ve $f_{w,j}(p_{w,j})$ sırasıyla j . rüzgar santralinin ceza maliyet katsayısı ve rüzgar gücü olasılık yoğunluk fonksiyonudur. $P_{wr,j}$ ve $P_{wav,j}$ aynı jeneratörün nominal çıkış gücü ve kullanılabilir gerçek gücüdür.

$$C_{Pw,j}(P_{wav,j} - P_{ws,j}) = K_{Pw,j}(P_{wav,j} - P_{ws,j}) = K_{Pw,j} \int_{P_{ws,j}}^{P_{wr,j}} (p_{w,j} - P_{ws,j}) f_{w,j}(p_{w,j}) dp_{w,j} \quad (2.78)$$

Rüzgar enerjisinin rezerv maliyeti Eşitlik (2.79) ile hesaplanır. $K_{Rw,j}$ j . jeneratörün rezerv maliyet katsayısıdır.

$$C_{Rw,j}(P_{ws,j} - P_{wav,j}) = K_{Rw,j}(P_{ws,j} - P_{wav,j}) = K_{Rw,j} \int_0^{P_{ws,j}} (P_{ws,j} - p_{w,j}) f_{w,j}(p_{w,j}) dp_{w,j} \quad (2.79)$$

2.2.4. Güneş Enerji Taşıyıcısının Maliyet Modeli

Güneş enerji sistemlerinin toplam maliyeti rüzgar enerjisinin maliyet modelinde olduğu gibi doğrudan maliyet, ceza maliyeti ve rezerv maliyetinden oluşur ve Eşitlik (2.80) ile hesaplanır. Burada, $C_{s,k}(P_{ss,k})$, $C_{Ps,k}(P_{sav,k} - P_{ss,k})$ ve $C_{Rs,k}(P_{ss,k} - P_{sav,k})$ doğrudan maliyet, ceza maliyeti ve rezerv maliyetini göstermektedir. N_{SG} toplam güneş santralinin sayısıdır [60], [61].

$$CF_s = \sum_{j=1}^{N_{sg}} \left[C_{s,k} (P_{ss,k}) + C_{Ps,k} (P_{sav,k} - P_{ss,k}) + C_{Rs,k} (P_{ss,k} - P_{sav,k}) \right] \quad (2.80)$$

Güneş enerji sistemleri için doğrudan maliyet Eşitlik (2.81) ile hesaplanır. Burada, $P_{ss,k}$ ve h_k k . güneş santralının planlanan gücü ve doğrudan maliyet katsayısıdır.

$$C_{s,k} (P_{ss,k}) = h_k P_{ss,k} \quad (2.81)$$

Güneş enerji sistemlerinin ceza maliyeti,

$$C_{Ps,k} (P_{sav,k} - P_{ss,k}) = K_{Ps,k} (P_{sav,k} - P_{ss,k}) = K_{Ps,k} f_{s,k} (P_{sav,k} > P_{ss,k}) [E(P_{sav,k} > P_{ss,k}) - P_{ss,k}] \quad (2.82)$$

ile hesaplanır. $P_{sav,k}$ k . güneş santralının kullanılabilir gerçek gücü, $K_{Ps,k}$ ceza maliyet katsayısı, $f_{s,k} (P_{sav,k} > P_{ss,k})$ ve $E(P_{sav,k} > P_{ss,k})$ sırasıyla planlanan enerji ($P_{ss,k}$) değerinden güneş enerjisinin fazlalığının olma olasılığını ve $P_{ss,k}$ değerinin üzerindeki güneş enerjisinin beklentisini ifade eder.

Güneş enerji sistemlerinin rezerv maliyeti,

$$C_{Rs,k} (P_{ss,k} - P_{sav,k}) = K_{Rs,k} (P_{ss,k} - P_{sav,k}) = K_{Rs,k} f_{s,k} (P_{sav,k} < P_{ss,k}) [P_{ss,k} - E(P_{sav,k} < P_{ss,k})] \quad (2.83)$$

ile hesaplanır. $K_{Rs,k}$ k . güneş santralının rezerv maliyet katsayısı, $f_{s,k} (P_{sav,k} < P_{ss,k})$ planlanan enerjiye göre kesinti olma olasılığı ve $E(P_{sav,k} < P_{ss,k})$ güneş santralının gücünün planlanan enerji altındaki beklentisidir.

2.3. AMAÇ FONKSİYONLARI

Enerji hub optimizasyonu ile ilgili üç amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

2.3.1. Toplam Enerji Hub Maliyetinin Minimizasyonu

Bu çalışmada, EH sisteminde elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğal gaz ve ısı enerji taşıyıcıları kullanılmıştır. Her bir enerji taşıyıcısının maliyeti ise ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bir EH sisteminde toplam üretim maliyeti, bütün enerji taşıyıcılarının

maliyet toplamına eşittir ve Eşitlik (2.84) ile ifade edilmiştir. Burada, OF_1 toplam EH maliyet minimizasyonuna ait amaç fonksiyonunu ve N_{hub} sistemdeki toplam EH sayısını göstermektedir.

$$OF_1 = \sum_{m=1}^{N_{hub}} (CF_{e,m} + CF_{g,m} + CF_{h,m} + CF_{w,m} + CF_{s,m}) \quad (2.84)$$

2.3.2. Toplam Enerji Hub Kayıplarının Minimizasyonu

Enerji hub kayıpları, giriş enerjisi ile çıkış enerjisi arasındaki fark olarak ifade edilir. Tüm EH kayıpları Eşitlik (2.85) ile hesaplanır [46]. Burada, OF_2 toplam EH maliyet minimizasyonuna ait amaç fonksiyonunu ve $E_{m,n}^{out}$ n . enerji taşıyıcısının çıkış enerjisini göstermektedir.

$$OF_2 = \sum_{\substack{i \in \{e,g,h,w,s\} \\ n \in \{e,h,c,a\}}} \sum_{m=1}^{N_{hub}} (E_{m,i}^{in} - E_{m,n}^{out}) \quad (2.85)$$

2.3.3. Toplam Enerji Hub Maliyetinin ve Kayıplarının Minimizasyonu

Toplam EH maliyetinin ve kayıplarının aynı anda minimize edilmesi amaçlanan bu problem çok amaçlı bir optimizasyon problemidir. Ancak, Eşitlik (2.86) ile tek amaçlı bir probleme dönüştürülmüştür [46]. Burada, OF_3 bu probleme ait amaç fonksiyonunu temsil etmektedir.

$$OF_3 = OF_1 \left(1 + \frac{OF_2}{\sum_{n \in \{e,h,c,a\}} E_n^{demand}} \right) \quad (2.86)$$

2.3.4. Eşitlik ve Eşitsizlik Kısıtları

2.3.4.1. Eşitlik kısıtları

EH birimlerinde çıkışta üretilen enerji ile talep arasında denge olması gerekmektedir. Yani, EH birimlerinden elde edilen çıkış enerjilerinin toplamı talep değerine eşit olmalıdır ve Eşitlik (2.87) ile formüle edilir.

$$\sum_{m=1}^{N_{hub}} E_{m,n}^{out} = E_n^{demand}, \quad n \in \{e, h, c, a\} \quad (2.87)$$

2.3.4.2. Eşitsizlik kısıtları

Enerji taşıyıcılarının çalışma kısıtları: EH birimlerinde çıkış değerleri üretilirken, girişte kullanılan enerji taşıyıcıları için Eşitlik (2.88)'de verilen kısıt dikkate alınmalıdır.

$$E_{m,i}^{in,min} \leq E_{m,i}^{in} \leq E_{m,i}^{in,max}, \quad i \in \{e, g, h, w, s\} \text{ ve } m = 1, \dots, n_i \quad (2.88)$$

Dağıtım faktörü kısıtı: EH birimlerinde kullanılan dağıtım faktörlerinin Eşitlik (2.89)'da verilen koşulu sağlaması gerekmektedir.

$$0 \leq v_1, v_2 \leq 1 \quad (2.89)$$

2.3.5. Uygunluk Fonksiyonu

Amaç fonksiyonlarının eşitlik kısıtlarını sağlayabilmesi için bir ceza katsayısı kullanılmıştır. Her bir talep değeri ile bir çıkış enerji taşıyıcısı için üretilen değer arasındaki fark toplanır ve bu değer ceza katsayısı ile çarpılır. Daha sonra bu değer, ilgili amaç fonksiyonu değerinden elde edilen değer ile toplanarak uygunluk fonksiyonu hesaplanır. Uygunluk fonksiyonunun matematiksel ifadesi Eşitlik (2.90)'da verilmiştir. Eşitlik (2.90)'da, $penalty_{coef}$ ceza katsayısı değerini temsil etmektedir.

$$fitness = OF_i + penalty_{coef} \times \sum_{n \in \{e, h, c, a\}} \left(E_n^{demand} - \sum_{m=1}^{N_{hub}} E_{m,n}^{out} \right), \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad (2.90)$$

2.4. RÜZGAR VE GÜNEŞ ENERJİSİNİN BELİRSİZ GÜÇ MODELİ

2.4.1. Rüzgar ve Güneş Enerjisinin Olasılık Dağılımı

Rüzgar hızının dağılımını belirlemek için genellikle Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) kullanılır [60], [61]. Weibull PDF denklemini,

$$f_{v,t}(v_t) = \left(\frac{k_t}{c_t}\right) \left(\frac{v_t}{c_t}\right)^{k_t-1} e^{-\left(v_t/c_t\right)^{k_t}}, \quad 0 < v_t < \infty, \quad t = 0, 1, 2, \dots, T \quad (2.91)$$

ile ifade edilir. Denklemden v_t , k_t , c_t ve t sırasıyla rüzgar hızının yoğunluğunu, boyutsuz şekil ve ölçek parametrelerini ve zamanı göstermektedir. Weibull PDF'nin ortalama değeri Eşitlik (2.92) ile hesaplanır.

$$M_{wbl} = c_w * \Gamma(1 + k_w^{-1}) \quad (2.92)$$

Eşitlik (2.92)'de M_{wbl} Weibull PDF'nin ortalama değerini göstermekte olup, Γ gama fonksiyonunu temsil etmektedir ve bu fonksiyon Eşitlik (2.93) ile ifade edilir.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (2.93)$$

Güneş enerji sistemlerinde çıkış gücü güneş ışıınımı (G) ile ilişkilidir [60], [61]. Lognormal PDF, güneş ışıınımının dağılımını doğru bir şekilde göstermektedir. Lognormal olasılık yoğunluk fonksiyonu, Eşitlik (2.94) ile hesaplanır.

$$f_{G,t}(G_t) = \frac{1}{G_t * \sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln G_t - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right\}, \quad G_t > 0, \quad t = 0, 1, 2, \dots, T \quad (2.94)$$

Eşitlik (2.94)'te, μ_t ve σ_t sırasıyla Lognormal PDF'nin ortalama ve standart sapma değerlerini göstermektedir. Ortalama Lognormal PDF değeri Eşitlik (2.95) ile hesaplanmaktadır.

$$M_{lg_n} = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (2.95)$$

2.4.2. Rüzgar ve Güneş Santralinin Güç Modeli

Rüzgar türbininin çıkış gücü rüzgar hızıyla ilişkilidir ve belirli bir rüzgar hızı (v_t) için çıkış gücü,

$$p_{w,t}(v_t) = \begin{cases} 0, & v_t < v_{in} , v_t > v_{out} \\ p_{wr} \left(\frac{v_t - v_{in}}{v_r - v_{in}} \right), & v_{in} \leq v_t \leq v_r \\ p_{wr}, & v_r < v_t \leq v_{out} \end{cases} \quad (2.96)$$

ile ifade edilir. Burada, p_{wr} rüzgar jeneratörünün nominal gücü, v_{in} , v_r ve v_{out} sırasıyla aynı generatörün devreye girme, nominal ve devreden çıkma hızıdır. Eşitlik (2.96)'ya göre, rüzgar jeneratörünün çıkış gücü, bazı hız değerlerinde ayrıktır. Bu ayrık bölgedeki belirli sınırlar için rüzgar gücünün olasılıkları Eşitlik (2.97)-(2.98) ile tanımlanabilir [60], [61].

$$f_w(p_{w,t})\{p_{w,t} = 0\} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v_{in}}{c_t}\right)^{k_t}\right] + \exp\left[-\left(\frac{v_{out}}{c_t}\right)^{k_t}\right] \quad (2.97)$$

$$f_w(p_{w,t})\{p_{w,t} = p_{wr}\} = \exp\left[-\left(\frac{v_r}{c_t}\right)^{k_t}\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_{out}}{c_t}\right)^{k_t}\right] \quad (2.98)$$

Rüzgar hızı devreye girme ve devreden çıkma hızı arasında olduğu durumda, çıkış gücü süreklidir. Bu bölgede olasılık değeri, Eşitlik (2.99) ile hesaplanır.

$$f_w(p_{w,t}) = \frac{k_t(v_r - v_{in})}{c_t^{k_t} * p_{wr}} \left[v_{in} + \frac{p_{w,t}}{p_{wr}}(v_r - v_{in}) \right]^{k_t-1} \exp\left[-\left(\frac{v_{in} + \frac{p_{w,t}}{p_{wr}}(v_r - v_{in})}{c_t}\right)^{k_t}\right] \quad (2.99)$$

Güneş enerji sistemlerinde çıkış gücü ise Eşitlik (2.100) ile hesaplanmaktadır. Burada, P_{sr} nominal çıkış gücü, G_{std} standart güneş ışıınım seviyesi (W/m^2), R_c t . zamandaki güneş ışıınım değeridir. Çalışmada, G_{std} ve R_c sırasıyla $1000 W/m^2$ ve $500 W/m^2$ olarak kullanılmıştır [60], [61].

$$P_{s,t}(G_t) = \begin{cases} P_{sr} \left(\frac{G_t^2}{G_{std} R_{c,t}} \right), & 0 < G_t < R_c \\ P_{sr} \left(\frac{G_t}{G_{std}} \right), & G_t \geq R_c \end{cases} \quad (2.100)$$

Çizelge 2.1’de, enerji hub yapılarında kullanılan rüzgar ve güneş santralleri için kullanılan parametreler verilmiştir.

Çizelge 2.1. Rüzgar ve güneş enerji santrallerinin parametreleri [60].

Rüzgar Santrali				Güneş Enerji Santrali	
No	Türbin Sayısı	Nominal Güç (MW)	Weibull PDF parametreleri	Nominal Güç (MW)	Lognormal PDF parametreleri
#1	20	60	k = 2, c = 10	50	$\mu = 6, \sigma = 0,6$
#2	25	75	k = 2, c = 9		

3. YÖNTEM

Bu bölüm, Enerji Hub Optimizasyonu için önerilen problemlerin çözümü için tez çalışması kapsamında geliştirilen FDB tabanlı LSHADESPACMA algoritmasını sunar. Bu kapsamda, bu bölüm beş alt bölümden oluşmaktadır ve bu alt bölümlerde sırasıyla aşağıdaki konular ele alınmıştır:

- İlk alt bölümde, meta-sezgisel optimizasyon süreci tanıtılmıştır.
- İkinci alt bölümde, Diferansiyel Evrim algoritmasının temel adımları anlatılmıştır.
- Üçüncü alt bölüm, tez çalışmasında kullanılan LSHADESPACMA algoritması hakkındadır.
- Dördüncü alt bölümde, tez çalışmasında algoritma geliştirme sürecinde kullanılan Uygunluk-Mesafe Dengesi seçim yöntemi sunulmuştur.
- Beşinci alt bölümde, tez çalışması kapsamında geliştirilmiş Uygunluk-Mesafe Dengesi tabanlı LSHADESPACMA algoritması detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.1. META-SEZGİSEL OPTİMİZASYON SÜRECİ

Optimizasyon, eşitlik ve eşitsizlik kısıtları dahilinde bir amaç fonksiyonunun minimize ya da maksimize edilme süreci olarak tanımlanabilir. Sürekli ve kısıtlı bir optimizasyon problemi matematiksel olarak Eşitlik (3.1) ile ifade edilebilir [24], [26].

$$\begin{aligned} \min/\max_{x \in R^N} OF_t(x), \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_D), \quad t = 1, 2, \dots, T \\ \phi_j(x) = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, J) \\ \varphi_k(x) \leq 0, \quad (k = 1, 2, \dots, K) \end{aligned} \tag{3.1}$$

Burada, D tasarım değişkenlerinin sayısı, x tasarım değişkenleri vektörü ve $x_1, x_2, \dots, x_D$ tasarım değişkenleridir. Tasarım değişkenlerinin alt ve üst limitleri $[lb, ub]$, $lb, ub \in R$ ve $-\infty < (lb, ub) < +\infty$ şeklinde ifade edilir. $OF(x)$ amaç fonksiyonunu, ϕ_j ve φ_k sırasıyla eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarını göstermektedir. Buna göre, kısıtlar dahilinde

Eşitlik (3.1)' de verilen amaç fonksiyonunu minimize ya da maksimize eden tek bir global çözüm vardır.

Optimizasyon algoritmalarının amacı, arama uzayında bir problem için global bir çözüm noktası bulmaktır. Global çözüm noktası bulunamadığında, buna en yakın vektör çözüm olarak kabul edilmektedir. Çoğu zaman gerçek dünyada, optimizasyon problemlerinin global çözümü bilinmemektedir. Bu durumda, mevcut adaylar arasında kısıtları sağlayan ve amaç fonksiyonunu optimize eden tasarım değişkenleri vektörü, problemin çözümü olarak kabul edilmektedir.

Meta-sezgisel arama (MSA) algoritmaları, optimizasyon problemleri için en iyi çözümü bulmaya çalışır. MSA algoritmaları, doğadan ilham alan popülasyon tabanlı arama algoritmalarıdır. Popülasyondaki her birey bir çözüm adaydır. MSA algoritmalarının optimizasyon sürecindeki genel adımları Çizelge 3.1'de verilmiştir [24]. MSA süreci iki aşamada gerçekleşir. İlk aşamada, çözüm adaylarının popülasyonu rastgele oluşturulur ve uygunluk değerleri hesaplanır. Bu süreçte, tasarım değişkenleri alt ve üst sınırlar arasında oluşturulmalıdır. İlk olarak, bir popülasyon (P) oluşturulur ve Eşitlik (3.2) ile gösterilir. Burada, N popülasyondaki çözüm adayları sayısını göstermektedir. Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra, çözüm adaylarının uygunluk değerleri Eşitlik (3.1)' e göre hesaplanır ve F vektörü Eşitlik (3.3) ile gösterilir [21], [22], [24].

$$P \equiv \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & \cdots & x_{ND} \end{bmatrix}_{N \times D} \quad (3.2)$$

$$F \equiv \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (3.3)$$

MSA sürecinin ikinci aşamasında, arama süreci yaşam döngüsü başlar. Bu aşamada, seçim, arama ve güncelleme olmak üzere üç temel adım bulunmaktadır. MSA algoritmalarının performansı bu üç adımın başarısına bağlıdır. Seçim sürecinde, arama operatörlerine rehberlik etmek için popülasyondan aday bireyler (P_t) seçilir. Burada, t indeksi referans çözüm adaylarının sayısını gösterir. Seçilen bireyler, arama sürecinde kullanıldığından dolayı popülasyonun geleceğinde önemli bir role sahiptir [21], [22].

Seçim sürecinden sonra, arama süreci başlar. Arama operatörlerinin görevi, popülasyonun gücünü arttırmak ve popülasyonu mevcut durumundan daha iyi hale getirmektir. Bunun için, keşif ve sömürü görevlerinin etkin bir şekilde yerine getirilmesi gerekmektedir. Sömürü sürecinde, arama uzayındaki bir referans çözüm adayının yerel komşuluğunda arama yapılır. MSA algoritmalarında, sömürü sürecinde arama performansı benzer ve başarılıdır. Keşif süreci, umut vaat eden çözüm adaylarının araştırılmasıdır ve popülasyonda çeşitlilik oluşturmak için kullanılır. Özellikle çok modlu optimizasyon problemlerinde birçok yerel çözüm tuzağı vardır. Bu tür sorunlara global çözümler bulmanın tek yolu, güçlü bir çeşitlilik operatörüne sahip olmaktır. Asıl amaç, çözüm adayının çevresinde yerel aramada en iyi çözümü bulmaktır [21], [22], [24], [25], [83].

Arama süreci yaşam döngüsünün son aşamasında, güncelleme süreci bulunmaktadır. Bu süreçte, çözüm adaylarının uygunluk değerleri hesaplanır ve popülasyon güncellenir. Seçim, arama ve güncelleme süreçleri, problemin sonlandırma kriteri sağlanıncaya kadar devam eder. Sonlandırma kriteri genellikle maksimum uygunluk değerlendirme sayısı olarak belirlenir [24].

Çizelge 3.1. MSA algoritmalarının optimizasyon sürecindeki genel adımları.

1.	Başla
2.	Başlangıç popülasyonunu (P) oluştur.
3.	for $i = 1:n$ (aday çözümlerinin sayısı) do
4.	Çözüm adaylarının uygunluk değerini (F) hesapla.
5.	end for
6.	while arama süreci yaşam döngüsü süreci do
7.	Seçim süreci Popülasyondan referans çözüm adaylarının seçilmesi.
8.	Arama süreci Sömürü (Referans çözüm adaylarının komşuluğunda arama) Keşif (Popülasyonda çeşitlilik sağlanması)
9.	Güncelleme süreci Çözüm adaylarının uygunluk değerlerine göre popülasyonun (P) güncellenmesi
10.	end while
11.	Bitir

3.2. DİFERANSİYEL EVRİM ALGORİTMASI

Diferansiyel Evrim (Differential Evolution, DE) algoritması Storn ve Price tarafından geliştirilen popülasyon tabanlı sezgisel bir algoritmadır. DE, karmaşık sürekli doğrusal olmayan fonksiyonları çözmek için sunulan basit ama güçlü bir arama tekniğidir. DE,

sürekli optimizasyon, ayrık optimizasyon, kısıtlı optimizasyon ve kısıtsız optimizasyon dahil olmak üzere çeşitli optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılmaktadır [84]-[86].

DE algoritmasında başlangıç popülasyonu P , N adet birey içerir. Her bir birey X_i vektörü ile temsil edilir ve $X_i = (x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{D,i})$ ile gösterilir. Burada, D çözüm uzayındaki boyutu temsil etmektedir. Popülasyon evrimsel sürecin işleyişi ile değişeceğinden dolayı, nesil süresi $G = 0, 1, \dots, G_{max}$ ile ifade edilmektedir. Burada, G_{max} maksimum nesil süresini göstermektedir. G . nesildeki P popülasyonunun i . bireyi X_i^G Eşitlik (3.4) ile gösterilir. Arama uzayındaki her bir boyutun alt ve üst sınırları sırasıyla X_L ve X_U ile temsil edilir [84]-[86].

$$X_i^G = [x_{1,i}^G, x_{2,i}^G, \dots, x_{D,i}^G], i = 1, 2, \dots, N \quad (3.4)$$

Başlangıç popülasyonu P^0 sınırlar içerisinde (X_L, X_U) tekdüze (uniform) dağılıma göre rastgele oluşturulur. DE’ de, popülasyondaki her bir bireye hedef vektör denir. Global optimuma ulaşmak amacıyla optimizasyon sürecinde temel olarak popülasyona mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleri uygulanmaktadır. Mutasyon aşamasında, popülasyondaki diğer bireylerin fark vektörü kullanılarak hedef vektörü bozan bir mutant vektör oluşturulur. Çaprazlamada, mutant vektörünün parametrelerini popülasyondan seçilen bir ebeveyn vektörün parametreleriyle birleştirilerek deneme vektörü oluşturulur. Seçim aşamasında ise, bir sonraki nesle kadar hayatta kalması gereken vektörü seçmek için ebeveyn ve deneme vektörü arasında bir karşılaştırma yapılır [84]-[86].

DE algoritmasının performansı temel olarak mutasyon stratejisine ve çaprazlama operatörüne bağlıdır. Ayrıca, popülasyon büyüklüğü (NP), ölçeklendirme faktörü (F) ve çaprazlama oranı (Cr) olarak üç önemli kontrol parametre bulunmaktadır. Bu kontrol parametreleri, popülasyon çeşitliliğini ve algoritmanın yakınsama hızını dengelemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu parametrelerin optimal ayarları probleme bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, DE algoritmasını gerçek dünya problemlerine uygularken istenilen sonuçları elde etmek için bu parametrelerin ayarlanması gerekmektedir. DE’ de global optimuma ulaşmak amacıyla optimizasyon sürecinde temel olarak popülasyona mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleri uygulanmaktadır [84]-[86].

Literatürde sıklıkla kullanılan mutasyon stratejileri Eşitlik (3.5)-(3.10) arasında verilmiştir [84], [85].

$$\text{DE/best/1/bin: } v_i^G = x_{best}^G + F \cdot (x_{r1}^G - x_{r2}^G) \quad (3.5)$$

$$\text{DE/best/2/bin: } v_i^G = x_{best}^G + F \cdot (x_{r1}^G - x_{r2}^G) + F \cdot (x_{r3}^G - x_{r4}^G) \quad (3.6)$$

$$\text{DE/rand/1/bin: } v_i^G = x_{r1}^G + F \cdot (x_{r2}^G - x_{r3}^G) \quad (3.7)$$

$$\text{DE/rand/2/bin: } v_i^G = x_{r1}^G + F \cdot (x_{r1}^G - x_i^G) + F \cdot (x_{r2}^G - x_{r3}^G) \quad (3.8)$$

$$\text{DE/current-to-best/1/bin: } v_i^G = x_i^G + F \cdot (x_{best}^G - x_i^G) + F \cdot (x_{r1}^G - x_{r2}^G) \quad (3.9)$$

$$\text{DE/current-to-rand/1/bin: } v_i^G = x_i^G + F \cdot (x_{r1}^G - x_i^G) + F \cdot (x_{r2}^G - x_{r3}^G) \quad (3.10)$$

Burada, r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 birbirinden ve i indeksinden farklı olarak $(1, 2, \dots, NP)$ içinde rastgele üretilmiş farklı tamsayılardır. Bu indeksler, her mutant vektör için rastgele bir kez oluşturulur. x_{best}^G ise G . nesilde popülasyondaki en iyi uygunluk değerine sahip vektördür. Ölçeklendirme faktörü F , fark vektörünü ölçeklendirmek için kullanılan bir kontrol parametresidir.

3.3. ÖNERİLEN FDB-LSHADESPACMA ALGORİTMASI

3.3.1. LSHADESPACMA Algoritmasına Genel Bakış

Bu bölümde, doğrusal popülasyon büyüklüğü azaltma başarı geçmişine dayalı diferansiyel evrim (Linear Population Size Reduction Success History Based Adaptive Differential Evolution, LSHADE) algoritması ile kovaryans matrisi uyarlaması-evrim stratejisi (Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy, CMA-ES) algoritmasının hibrit olarak kullanıldığı yarı parametre uyarlamalı LSHADE ile hibrit CMA-ES algoritması (LSHADE with Semi-Parameter Adaptation Hybrid with CMA-ES, LSHADESPACMA) algoritması anlatılacaktır. Bu bölüm, dört alt bölümden oluşmaktadır. İlk alt bölümde, LSHADE algoritması detaylı bir şekilde açıklanmıştır. İkinci alt bölümde, CMA-ES algoritması sunulmuştur. Üçüncü alt bölümde, LSHADE

algoritmasına uyarlanan yarı parametre adaptasyon süreci anlatılmıştır. Dördüncü alt bölümde ise, ilk üç alt bölümde bahsedilen, LSHADE, CMA-ES ve yarı parametre adaptasyonunun hibrit olarak kullanıldığı LSHADESPACMA algoritması sunulmuştur.

3.3.1.1. LSHADE Algoritması

LSHADE algoritması, başarı geçmişine dayalı uyarlamalı diferansiyel evrim (Success History Based Adaptive Differential Evolution, SHADE [87]) algoritmasının doğrusal popülasyon büyüklüğü azaltma (Linear Population Size Reduction, LPSR) yöntemiyle genişletilmiş versiyonudur. LPSR’ de popülasyon büyüklüğü, doğrusal bir fonksiyona göre sürekli olarak azaltılır. Diğer evrimsel algoritmalara benzer şekilde, LSHADE algoritması bir başlangıç popülasyonu P^0 ile başlar. P^0 içerisindeki her i . bireyin ($i = 1, 2, \dots, N$) j . bileşeni ($j = 1, 2, \dots, D$) Eşitlik (3.11) ile belirlenir. Burada, $rand$ $[0, 1]$ aralığında düzgün dağılıma göre elde edilmiş rastgele bir sayıdır [80].

$$x_{i,j}^0 = x_{j,L} + rand(x_{j,U} - x_{j,L}) \quad (3.11)$$

LSHADE algoritmasında, JADE [88] algoritmasında kullanılan DE/current-to-pbest/1/bin mutasyon stratejisi kullanılmaktadır. Buna göre, G . nesilde her hedef vektör x_i^G için Eşitlik (3.12) ile mutant vektör v_i^G elde edilir [80].

$$v_i^G = x_i^G + F_i^G \cdot (x_{pbest}^G - x_i^G) + F_i^G \cdot (x_{r1}^G - x_{r2}^G) \quad (3.12)$$

Burada, r_1 ve r_2 popülasyondan rastgele seçilmiş indekslerdir. x_{pbest}^G G . nesilde popülasyondaki en iyi uygunluk değerine sahip bireysel vektördür. Ölçeklendirme faktörü F_i^G , fark vektörünün kontrol edilmesinde kullanılan bir parametredir.

Çaprazlamada, hedef vektör x_i^G , deneme vektörü u_i^G ’ yi elde etmek için Eşitlik (3.13) kullanılarak mutant vektör v_i^G ile karıştırılır. Burada, $rand$ $[0, 1]$ aralığında uniform dağılıma göre elde edilmiş rastgele bir sayıdır. Çaprazlama oranı, mutant vektörden kaç tane bileşenin miras alınacağını kontrol eder. j_{rand} ise $[1, D]$ aralığında uniform dağılıma göre elde edilmiş rastgele bir sayıdır [80].

$$u_{i,j}^G = \begin{cases} v_{i,j}^G, & \text{eğer } (rand < Cr \text{ ya da } j = j_{rand}) \\ x_{i,j}^G, & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.13)$$

DE algoritmasında açgözlü seçim yöntemi kullanılmaktadır. Eğer deneme vektörü u_i^G , x_i^G kadar iyi veya ondan daha iyi bir uygunluk değeri verirse, o zaman u_i^G vektörü x_i^G vektörüne atanır. Aksi durumda, eski vektör x_i^G korunur. Buna göre, seçim yöntemi Eşitlik (3.14) ile ifade edilir.

$$x_i^{G+1} = \begin{cases} u_i^G, & f(u_i^G) \leq f(x_i^G) \\ x_i^G, & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.14)$$

LSHADE algoritmasının son bölümü, LPSR yöntemidir. LPSR’de popülasyon büyüklüğü Eşitlik (3.15)’de verilen doğrusal bir fonksiyonla azalır. Burada, $max FEs$ maksimum uygunluk fonksiyonu değerlendirme sayısını, FEs mevcut uygunluk fonksiyonu değerlendirme sayısını, N^{init} başlangıç popülasyonu sayısını ve N^{min} minimum popülasyon sayısını temsil etmektedir. Eşitlik (3.15)’e göre, 1. nesilde popülasyon sayısı N^{init} iken, son nesilde popülasyon sayısı N^{min} olur [80].

$$N_{G+1} = round \left[\left(\frac{N^{min} - N^{init}}{max FEs} \right) * FEs + N^{init} \right] \quad (3.15)$$

3.3.1.2. CMA-ES Algoritması

CMA-ES, çeşitli optimizasyon problemlerini verimli bir şekilde çözebilen evrim stratejilerinden biridir [89]. CMA-ES’de arama uzayı çok değişkenli normal dağılım yani Gauss dağılımı kullanılarak modellenir. Algoritmada, yeni bir çözüm noktasının üretilmesi için ortalama ve kovaryans matrisi hesaplanmaktadır. Yeni üretilen çözüm noktaları ise, uygunluk değerlerine göre ağırlıklandırılmaktadır. Bu ağırlık değerleri, bir sonraki nesildeki ortalama ve kovaryans matrisi hesaplama işleminde kullanılmaktadır [89], [90]. CMA-ES algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir [78], [89]:

1. Başlangıç popülasyonu oluşturulur ve uygunluk değerleri hesaplanır.
2. Eşitlik (3.16)’da verilen Gauss dağılımı kullanılarak yeni bireyler oluşturulur. Burada,

G . nesildeki ortalama vektör m^G , kovaryans matrisi C^G ve adım büyüklüğü σ^G ile gösterilmektedir.

$$x_i^{G+1} = N\left(m^G, (\sigma^G)^2 C^G\right) \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (3.16)$$

3. Arama dağılımının yeni ortalaması m^{G+1} , popülasyondaki en iyi μ bireyleri kullanılarak güncellenir ve Eşitlik (3.17) ile ifade edilir.

$$m^{G+1} = \sum_{i=1}^{\mu} w_i x_{i:N}^{G+1} \quad (3.17)$$

Burada, $\sum_{i=1}^{\mu} w_i = 1$ ve $w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_{\mu} \geq 0$.

4. Adım büyüklüğü σ^G ve kovaryans matrisi C^G güncellenir.

5. Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar adım 2 ve 3 tekrar eder.

CMA-ES algoritması ile ilgili detaylı bilgiye referans [89]' dan ulaşılabilir.

3.3.1.3. Yarı Parametre Uyarlama Yöntemi

Parametre ayarının DE algoritmasının performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Parametre uyarlama alanındaki uygulamalar, problemin kendisi ile parametre değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu parametreler, F ve Cr parametreleridir. Yarı parametre uyarlama (Semi Parameter Adaptation, SPA) yöntemi bu parametreler üzerinde iki bölümde gerçekleştirilir [78].

SPA'nın ilk bölümünde, uyarlama orijinal LSHADE adaptasyonu kullanılarak Cr parametresi üzerinde gerçekleştirilmiştir. F parametresi ise belirli bir limit dahilinde uniform dağılım kullanılarak rastgele olarak üretilmiştir. Bu bölüm, arama sürecinin $(FEs < max FEs / 2)$ aralığında uygulanmıştır. SPA boyunca, her bir birey kendi F_i ve Cr_i değerine sahiptir. F_i değeri (0,45; 0,55) aralığında uniform dağılım ile Eşitlik (3.18) kullanılarak elde edilir. Cr_i değeri ise Eşitlik (3.19) kullanılarak üretilir [78].

$$F_i = 0.45 + 0.1 * rand \quad (3.18)$$

$$Cr_i = randn(Mcr_i, 0.1) \quad (3.19)$$

Burada, Mcr_i önceki nesillerin başarılı ortalamalarının depolandığı rastgele seçilmiş bir bellek yuvasıdır. Bellek indeksi i , $[1, h]$ aralığından rastgele seçilir ve h bellek boyutunu göstermektedir. Başlangıçta, tüm değerler 0,5'e ayarlanır ve her neslin sonunda, değerlerin aritmetik ortalaması kullanılarak bir bellek yuvası güncellenir. Böylelikle, başarıyla yeni bireyler oluşturulur.

SPA' nın ikinci bölümünde LSHADE adaptasyonu Eşitlik (3.20) kullanılarak F parametresi üzerinde uyarlanacaktır. Her bir birey kendi F_i değerine sahiptir ve Cauchy dağılımı kullanılarak üretilir. σ Cauchy dağılımının standart sapma değerini gösterir ve 0,1'e ayarlanır. MF_i ise önceki nesillerin başarılı ortalama değerlerinin depolandığı rastgele seçilen bir bellek yuvasıdır. Her neslin sonunda bir bellek yuvası MF , başarıyla yeni bireyler üreten F_i değerlerinin Lehmer ortalaması kullanılarak güncellenir. SPA'nın ilk bölümünün son 5 neslinin F_i değerleri, SPA'nın ikinci bölümü için başlangıç bellek yuvası MF_i olarak kullanılır [78].

$$F_i = randc(MF_i, \sigma) \quad (3.20)$$

Cr parametresi adaptasyon süreci bu bölümde olduğu gibi kalacaktır. Bununla birlikte, LSHADE parametre uyarlamasına göre, bir nesildeki tüm Cr değerleri başarılı bireyler üretmediğinde, karşılık gelen bellek yuvası bir terminal değerine ayarlanır. Böylelikle, Mcr değeri arama sürecinin sonuna kadar değişmeyecektir.

3.3.1.4. LSHADESPACMA Hibridizasyon Süreci

LSHADESPACMA algoritması, LSHADE-SPA algoritması ile modifiye edilmiş CMA-ES algoritmasının hibrit versiyonudur. Önerilen hibrit algoritmanın keşif kabiliyetini geliştirmek için CMA-ES algoritmasına bir çaprazlama işlemi uygulanmaktadır. CMA-ES'de yavru oluşturma adımından sonra Eşitlik (3.13)'de verilen çaprazlama eşitliği uygulanmaktadır [78].

Çizelge 3.2'de LSHADESPACMA algoritmasının sözde kodu verilmiştir [78]. Algoritma, ortak bir P popülasyonu ile başlar. P ' deki her x bireyi, LSHADE veya CMA-ES algoritmalarından birini kullanarak yavru birey u üretir. Bu atama, sınıf olasılık

değişkenine (class probability value, FCP) göre yapılır. FCP değerleri, bellek yuvalarından (M_{FCP}) rastgele olarak seçilir. Her neslin sonunda, her algoritmanın performansına göre bir bellek yuvası güncellenir. Böylece, daha iyi performans gösteren algoritmaya kademeli olarak daha fazla popülasyon atanmaktadır. Güncelleme işlemi, yalnızca yeni bireyleri başarıyla oluşturan bireyler kullanılarak gerçekleştirilir. Bellek yuvası M_{FCP} , Eşitlik (3.21) kullanılarak güncellenir [78].

$$M_{FCP,G+1} = (1-c)M_{FCP,G} + c\Delta_{Alg1} \quad (3.21)$$

Burada, c öğrenme oranını ve Δ_{Alg1} her algoritmanın iyileşme oranını göstermektedir. Δ_{Alg1} değeri, Eşitlik (3.22) kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlik (3.22)'de, 0,2 ve 0,8 değerleri, her bir algoritmaya atanan minimum ve maksimum olasılıktır. Böylece, aynı anda yürütülen iki algoritmayı sürdürmek için, FCP değerleri her zaman (0.2, 0.8) değer aralığında tutulmalıdır. w_{Alg1} ise her bir bireye ait algoritma için eski ve yeni uygunluk değerleri arasındaki farkların toplamıdır ve Eşitlik (3.23) ile hesaplanır. Eşitlik (3.23)'de, f amaç fonksiyonunu, x eski bireyi, u yavru bireyi, n ise $Alg1$ 'e ait birey sayısını temsil etmektedir [78].

$$\Delta_{Alg1} = \min \left(0.8, \max \left(0.2, \frac{w_{Alg1}}{w_{Alg1} + w_{Alg2}} \right) \right) \quad (3.22)$$

$$w_{Alg1} = \sum_{i=1}^n f(x) - f(u) \quad (3.23)$$

Çizelge 3.2. LSHADESPACMA algoritmasının sözde kodu.

1.	$G = 1$, $N_G = N^{init}$, Arşiv $A = \emptyset$, $FES = 0$.
2.	Başlangıç popülasyonunu $P_G = (x_{1,G}, x_{2,G}, \dots, x_{N,G})$ ile başlat.
3.	M_{CR} , M_F , M_{FCP} değerlerini 0,5 olarak ayarla.
4.	CMA algoritmasının parametrelerini başlat.
5.	while $FES < \max FES$
6.	<i>//Yarı Parametre Uyarlama Süreci//</i>
7.	$S_{CR} = \emptyset$, $S_F = \emptyset$, $S_{FCP} = \emptyset$.
8.	for $i = 1 : N$ do

Çizelge 3.2. (devam) LSHADESPACMA algoritmasının sözde kodu.

9.	r_i değerini rastgele $[1, H]$ aralığından seç.
10.	$CR_{i,G} = randn_i(M_{CR,r_i}, 0.1)$ //Eşitlik (3.19)//
11.	$FCP_{i,G} = M_{FCP,r_i}$
12.	if $FES < max FES / 2$
13.	$F_{i,G} = 0.45 + 0.1 * rand$ //Eşitlik (3.18)//
14.	else
15.	$F_i = randc(MF_i, \sigma)$ //Eşitlik (3.20)//
16.	end if
17.	end for
18.	<i>//Mutasyon Süreci//</i>
19.	$[P_{LSHADE,G}, P_{CMA,G}] = \text{Ayr}(P_G, FCP_G)$
20.	LSHADE' yi kullanarak mutant vektör $V_{LSHADE,G}$ üret. //Eşitlik (3.12)//
21.	CMA' yı kullanarak mutant vektör $V_{CMA,G}$ üret.
22.	<i>//Çaprazlama Süreci//</i>
23.	$V_G = \text{Birleştir}(V_{LSHADE,G}, V_{CMA,G})$
24.	$U_G = \text{Deneme vektörünü üret}(V_G, CR_G)$
25.	<i>//Güncelleme Süreci//</i>
26.	U_G vektörünün uygunluk değerlerini hesapla.
27.	FES değerini güncelle.
28.	<i>//Seçim Süreci//</i>
29.	P_G ' yi U_G ' nin değerlendirme sonuçlarına göre güncelle.
30.	Başarılı FCP_G, F_G, CR_G değerlerini depola.
31.	Arşiv A ' yı güncelle.
32.	if (arşiv boyutu $> A $)
33.	arşivden rastgele seçilen bireyleri sil.
34.	end if
35.	M_{CR}, M_{FCP} değerlerini güncelle.
36.	if $FES > max FES / 2$
37.	M_F değerini güncelle.
38.	end if
39.	<i>//LPSR Yöntemi//</i>
40.	N_{G+1} değerini hesapla. // Eşitlik (3.15)//
41.	if $N_G < N_{G+1}$
42.	P popülasyonundaki bireyleri uygunluk değerine göre sırala ve $N_G - N_{G+1}$ kadar kötü uygunluk değerine sahip bireyi sil.
43.	Arşiv boyutu $ A $ 'yı yeni $ P $ değerine göre güncelle.
44.	end if
45.	CMA algoritmasının parametrelerini güncelle.
46.	$G++$
47.	end while

3.3.2. Uygunluk-Mesafe Dengesi Seçim Yöntemi

Uygunluk-mesafe dengesi (Fitness Distance Balance, FDB) seçim yöntemi, Kahraman ve arkadaşları tarafından 2020 yılında önerilen geliştirilmiş bir seçim yöntemidir. FDB yönteminin amacı, arama sürecinde MSA algoritmalarına etkin bir şekilde rehberlik etmektir. MSA algoritmalarında seçim yöntemleri, arama operatörlerinin ihtiyaç duyduğu referans konumları belirlemek için kullanılır [21]-[26]. Bu nedenle, seçim yöntemleri popülasyonun geleceğinin şekillenmesine olanak sağladığı için MSA algoritmalarının performansı açısından oldukça önemlidir. MSA algoritmalarındaki diğer unsurlarda olduğu gibi, seçim yöntemlerinin tasarımında da doğadaki süreçler referans alınır. Buna göre, MSA algoritmalarında kullanılan seçim yöntemleri açgözlü, rastgele ve olasılıksal olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmaktadır. Açgözlü seçim yöntemi, doğadaki elitizm mantığına dayanmaktadır. Buna göre, popülasyon üyeleri arasından en güçlü olanın seçildiği yöntemdir. Rastgele seçim yöntemi, doğada sıklıkla meydana geldiği varsayılan rastgeleliğe dayanmaktadır. Buna göre, popülasyondaki bireyler arasında tamamen rastgele bir seçim yapılır. Olasılıksal seçim yönteminde açgözlü ve rastgele seçim yöntemleri birlikte kullanılır ve seçimin olasılığı uygunluk değerine göre belirlenir. Rulet tekerleği ve turnuva yöntemleri, olasılıksal seçim yöntemlerinin örnekleridir [21]-[23].

FDB açgözlü bir seçim yöntemidir. Ancak, FDB'nin diğer açgözlü yöntemlerden en önemli farkı, seçim işleminin sadece uygunluk değerine göre değil, puan değerine göre yapılmasıdır. FDB yönteminde, her bir çözüm adayının puan değeri hesaplanır. Puan hesabında, popülasyondaki her bir çözüm adayının uygunluk değeri ve en iyi çözüm adayına olan uzaklığı dikkate alınmaktadır. FDB yöntemi, en yüksek puana sahip çözüm adayının arama sürecini yönlendirmesine izin verir. Sonuç olarak, en iyi çözüm adayının komşuluğunda bir çözüm adayının seçimini de engellemiş olur. Böylece, keşif ve sömürü görevlerinin dengeli bir şekilde yürütülmesi sağlanmaktadır [21]-[26].

FDB yöntemini uygulamak için aşağıdaki adımlar izlenmelidir:

(i) FDB yönteminin ilk adımında, çözüm adaylarının en iyi çözüme (x_{best}) olan uzaklığı hesaplanır. Popülasyondaki çözüm aday sayısı N ve problem boyutu D ise, i . çözüm adayının en iyi çözüm adayına olan Öklid uzaklığı Eşitlik (3.24) kullanılarak hesaplanır.

$$\forall_{i=1}^N x_i \neq x_{best}, D_{P_i} = \sqrt{(x_{i[1]} - x_{best[1]})^2 + (x_{i[2]} - x_{best[2]})^2 + \dots + (x_{i[D]} - x_{best[D]})^2} \quad (3.24)$$

(ii) P -popülasyonu için uzaklık vektörü D_p , Eşitlik (3.25) ile gösterilir.

$$D_p \equiv \begin{bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_N \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (3.25)$$

(iii) Popülasyondaki çözüm adaylarının FDB puanları, Eşitlik (3.3)'de verilen çözüm adaylarının uygunluk değerleri ve Eşitlik (3.24)'te verilen en iyi çözüme olan uzaklık değerleri kullanılarak belirlenir. Bu iki değer, birinin diğerine baskın çıkmasını önlemek için $[0, 1]$ aralığında normalize edilir. $normF$ ve $normD_p$ değerleri sırasıyla, normalize edilmiş uygunluk değerini ve uzaklık değerini göstermektedir. Bu iki normalize edilmiş değere göre, i . çözüm adayının FDB puanı Eşitlik (3.26) kullanılarak hesaplanır.

$$\forall_{i=1}^N x_i, S_{P_i} = w * normF_i + (1 - w) * normD_{P_i} \quad (3.26)$$

Burada, w ağırlık katsayısı olup, uygunluk ve uzaklık değerlerinin etkisini ayarlamak için $[0, 1]$ aralığında değer alır. Eğer w parametresinin değeri 1'e yakınsa, uygunluk değeri ağırlıklı olarak çözüm adayının puanını etkiler. Bu durumda, arama sürecinde sömürü etkisi görülür. Tam tersi olarak, w parametresinin değeri 0'a yakınsa, çözüm adayının puanında uzaklık etkisi baskındır. Bu durumda, popülasyondaki en iyi çözüm adayına en az benzeyen çözüm adayı rehber olarak seçilir. Dolayısıyla bu rehber sayesinde arama sürecinde çeşitlilik yaratılmaktadır.

(iv) Çözüm adaylarının FDB puan değerlerini temsil eden S_p vektörü Eşitlik (3.27)'de verilmiştir.

$$S_p \equiv \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_N \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (3.27)$$

FDB yöntemine göre, MSA algoritmalarının arama sürecinde, S_p vektörü oluşturulduktan sonra, bir çözüm adayı seçmek için olasılıksal veya açgözlü yöntemlerden biri uygulanır.

Örneğin; açgözlü seçim yöntemi kullanıldığında uygunluk değeri en yüksek olan çözüm adayı yerine FDB puanı en yüksek olan çözüm adayı seçilmiş olur.

3.3.3. FDB-LSHADESPACMA Algoritması Tasarımı

LSHADESPACMA algoritması popülasyon tabanlı bir MSA algoritmasıdır ve DE algoritmasının gelişmiş bir varyantıdır. DE algoritması, optimizasyon sürecinde mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörlerini kullanarak doğadaki popülasyonun evrim sürecini simüle eder. DE, uygulama kolaylığı, güvenilirlik ve gürbüzlük gibi birçok avantaja sahiptir. Ancak, diğer tüm evrimsel arama tekniklerinde olduğu gibi DE'nin birçok zayıf yönü vardır. Genel olarak DE, global optimum çözüme ulaşabilen iyi bir global keşif yeteneğine sahiptir, ancak çözümün komşuluk aramasında yavaştır. DE parametreleri probleme bağlı olarak değişir ve farklı problemler için parametreleri ayarlamak zordur. Ayrıca, problem boyutu arttıkça da DE'nin performansı azalır. Son olarak, erken yakınsama durumunda DE'nin performansı önemli ölçüde bozulur. Sonuç olarak, araştırmacılar temel DE'yi geliştirmek için birçok yöntem önermişlerdir. Literatürden, DE üzerinde önerilen bu modifikasyonlar, iyileştirmeler ve gelişmeler, yeni mutasyon kuralı geliştirmede birkaç girişimde bulunurken, kontrol parametrelerini uyarlamalı veya kendi kendine uyarlamalı bir şekilde ayarlamaya odaklanır.

DE algoritmasının performansı temel olarak mutasyon stratejisine ve çaprazlama operatörüne bağlıdır. Literatürde, yeni mutasyon stratejileri önerilerek geliştirilmiş farklı DE versiyonları bulunmaktadır. Bu versiyonlardan biri, DE algoritmasının optimizasyon performansını iyileştirmek için önerilen JADE algoritmasıdır. JADE'de popülasyonda çeşitliliği arttırmak için DE/current-to-pbest/1/bin mutasyon stratejisi önerilmiştir. Bu mutasyon stratejisi, DE'nin güçlü versiyonlarından olan LSHADE algoritmasında da kullanılmıştır. LSHADE algoritması CEC2014 yarışmasında 1. sırada yer almıştır. LSHADESPACMA algoritması ise LSHADE algoritmasının geliştirilmiş versiyonu olup, CEC2017 yarışmasında 4. sırada yer almıştır. Bu algorithmada, LSHADE'nin performansını önemli ölçüde artırmak için yeni bir yarı parametre uyarlama yaklaşımı önerilmiştir. Ancak, yapılan geliştirmelere rağmen LSHADE algoritmasında yerel çözüm tuzaklarına yakalanma sorunu devam etmektedir. Bu durumdan algoritmayı kurtarmak için arama sürecinin iyileştirilmesi gerekmektedir. LSHADESPACMA algoritmasında arama süreci mutasyon ile sağlanmaktadır. Bu nedenle, FDB seçim yöntemi, algoritmanın mutasyon stratejisine entegre edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, LSHADESPACMA algoritmasının mutasyon stratejisi FDB yöntemi kullanılarak yeniden tasarlanmıştır. Dört farklı FDB temelli LSHADESPACMA versiyonu oluşturulmuştur. FDB tabanlı rehber seçim yöntemi kullanılarak oluşturulan FDB-LSHADESPACMA versiyonlarının (Versiyon-1, Versiyon-2, Versiyon-3, Versiyon-4) tanımları ve matematiksel modelleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Eşitlik (3.12)’de x_{r1}^G aday çözümü yerine FDB ile seçilen aday çözüm kullanılmıştır. x_{r2}^G aday çözümü, x_{r1}^G aday çözümüne göre seçildiğinden dolayı olarak FDB bu aday çözümün seçimi için de kullanılmıştır. Ayrıca, LSHADESPACMA algoritmasında kullanılan “DE/current-to-pbest/1” mutasyon stratejisinin yerine, Eşitlik (3.10)’da verilen “DE/current-to-rand/1/bin” mutasyon stratejisi de versiyonların oluşturulmasında düşünülmüştür. Bunlara göre Versiyon-1’ de mutant vektörün oluşturulması için Eşitlik (3.12)’de verilen “DE/current-to-pbest/1/bin” mutasyon stratejisi kullanılmıştır. Bu eşitlikte, x_{r1}^G aday çözümü yerine FDB ile seçilen çözüm adayı x_{FDB}^G kullanılmıştır. Versiyon-2’de ise orijinal LSHADESPACMA algoritmasında kullanılan mutasyon stratejisi değiştirilerek Eşitlik (3.10)’da verilen “DE/current-to-rand/1/bin” mutasyon stratejisi kullanılmıştır. Burada, FDB seçim yöntemi x_{r1}^G aday çözümü yerine FDB ile seçilen çözüm adayı x_{FDB}^G kullanılmıştır. Versiyon-3, Versiyon-1 ile benzer yapıdadır. Ancak, x_{r1}^G aday çözümünün yerine Rulet FDB ile seçilen aday çözüm x_{RFDB}^G kullanılmıştır. Versiyon-4’de, Versiyon-2 ile aynı yapıda olup, x_{r1}^G aday çözümünün yerine Rulet FDB ile seçilen aday çözüm x_{RFDB}^G kullanılmıştır. Önerilen FDB-LSHADESPACMA versiyonlarının sözde kodu Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. FDB-LSHADESPACMA versiyonlarının matematiksel modeli.

Algoritma	Açıklama	FDB-LSHADESPACMA Versiyonunun Matematiksel Modeli
Versiyon-1	Çizelge 3.2-Satır 20’ de verilen mutant vektörün oluşturulduğu denklemde, x_{r1}^G aday çözümü yerine FDB yöntemi ile seçilen çözüm adayı x_{FDB}^G kullanılmıştır.	$v_i^G = x_i^G + F_i^G \cdot (x_{pbest}^G - x_i^G) + F_i^G \cdot (x_{FDB}^G - x_{r2}^G) \quad (3.28)$

Çizelge 3.3. (devam) FDB-LSHADESPACMA versiyonlarının matematiksel modeli.

Algoritma	Açıklama	FDB-LSHADESPACMA Versiyonunun Matematiksel Modeli
Versiyon-2	Çizelge 3.2-Satır 20' de verilen mutant vektörü oluşturmak için Eşitlik (3.10)'da verilen "DE/current-to-rand/1/bin" mutasyon stratejisinde x_{r1}^G aday çözümü yerine FDB yöntemi ile seçilen çözüm adayı x_{FDB}^G kullanılmıştır.	$v_i^G = x_i^G + F_i^G \cdot (x_{FDB}^G - x_i^G) + F_i^G \cdot (x_{r2}^G - x_{r3}^G) \quad (3.29)$
Versiyon-3	Çizelge 3.2-Satır 20' de verilen mutant vektörün oluşturulduğu denklemde, x_{r1}^G aday çözümü yerine Rulet FDB yöntemi ile seçilen çözüm adayı x_{RFDB}^G kullanılmıştır.	$v_i^G = x_i^G + F_i^G \cdot (x_{pbest}^G - x_i^G) + F_i^G \cdot (x_{RFDB}^G - x_{r2}^G) \quad (3.30)$
Versiyon-4	Çizelge 3.2-Satır 20' de verilen mutant vektörü oluşturmak için Eşitlik (3.10)'da verilen "DE/current-to-rand/1/bin" mutasyon stratejisinde x_{r1}^G aday çözümü yerine Rulet FDB yöntemi ile seçilen çözüm adayı x_{RFDB}^G kullanılmıştır.	$v_i^G = x_i^G + F_i^G \cdot (x_{RFDB}^G - x_i^G) + F_i^G \cdot (x_{r2}^G - x_{r3}^G) \quad (3.31)$

Çizelge 3.4. FDB-LSHADESPACMA algoritmasının sözde kodu.

1.	$G = 1, N_G = N^{init}, \text{Arşiv } A = \emptyset, FE_s = 0.$
2.	Başlangıç popülasyonunu $P_G = (x_{1,G}, x_{2,G}, \dots, x_{N,G})$ ile başlat.
3.	M_{CR}, M_F, M_{FCP} değerlerini 0,5 olarak ayarla.
4.	CMA algoritmasının parametrelerini başlat.
5.	while $FE_s < \max FE_s$
6.	<i>//Yarı Parametre Uyarlama Süreci//</i>
7.	$S_{CR} = \emptyset, S_F = \emptyset, S_{FCP} = \emptyset.$
8.	for $i = 1 : N$ do
9.	r_i değerini rastgele $[1, H]$ aralığından seç.
10.	$CR_{i,G} = randn_i(M_{CR,r_i}, 0.1).$ //Eşitlik (3.19)//
11.	$FCP_{i,G} = M_{FCP,r_i}.$
12.	if $FE_s < \max FE_s / 2$
13.	$F_{i,G} = 0.45 + 0.1 * rand$ //Eşitlik (3.18)//
14.	else
15.	$F_i = randc(MF_i, \sigma)$ //Eşitlik (3.20)//
16.	end if
17.	end for

Çizelge 3.4. (devam) FDB-LSHADESPACMA algoritmasının sözde kodu.

18.	<i>//Mutasyon Süreci//</i>
19.	$[P_{LSHADE,G}, P_{CMA,G}] = \text{Ayr}(P_G, FCP_G)$
20.	<i>//Versiyon-1//</i>
21.	$V_{LSHADE,i}^G = x_i^G + F_i^G \cdot (x_{pbest}^G - x_i^G) + F_i^G \cdot (x_{FDB}^G - x_{r2}^G)$ //Eşitlik (3.28)//
22.	<i>//Versiyon-2//</i>
23.	$V_{LSHADE,i}^G = x_i^G + F_i^G \cdot (x_{FDB}^G - x_i^G) + F_i^G \cdot (x_{r2}^G - x_{r3}^G)$ //Eşitlik (3.29)//
24.	<i>//Versiyon-3//</i>
25.	$V_{LSHADE,i}^G = x_i^G + F_i^G \cdot (x_{pbest}^G - x_i^G) + F_i^G \cdot (x_{RFDB}^G - x_{r2}^G)$ //Eşitlik (3.30)//
26.	<i>//Versiyon-4//</i>
27.	$V_{LSHADE,i}^G = x_i^G + F_i^G \cdot (x_{RFDB}^G - x_i^G) + F_i^G \cdot (x_{r2}^G - x_{r3}^G)$ //Eşitlik (3.31)//
28.	CMA'yı kullanarak mutant vektör $V_{CMA,G}$ üret.
29.	<i>//Çaprazlama Süreci//</i>
30.	$V_G = \text{Birleştir}(V_{LSHADE,G}, V_{CMA,G})$
31.	$U_G = \text{Deneme vektörünü üret}(V_G, CR_G)$
32.	<i>//Güncelleme Süreci//</i>
33.	U_G vektörünün uygunluk değerlerini hesapla.
34.	FES değerini güncelle.
35.	<i>//Seçim Süreci//</i>
36.	P_G 'yi U_G 'nin değerlendirme sonuçlarına göre güncelle.
37.	Başarılı FCP_G, F_G, CR_G değerlerini depola.
38.	Arşiv A 'yı güncelle.
39.	if (arşiv boyutu $> A $)
40.	arşivden rastgele seçilen bireyleri sil.
41.	end if
42.	M_{CR}, M_{FCP} değerlerini güncelle.
43.	if $FES > \max FES / 2$
44.	M_F değerini güncelle.
45.	end if
46.	<i>//LPSR Yöntemi//</i>
47.	N_{G+1} değerini hesapla. // Eşitlik (3.15)//
48.	if $N_G < N_{G+1}$
49.	P popülasyonundaki bireyleri uygunluk değerine göre sırala ve $N_G - N_{G+1}$ kadar kötü uygunluk değerine sahip bireyi sil.
50.	Arşiv boyutu $ A $ 'yı yeni $ P $ değerine göre güncelle.
51.	end if
52.	CMA algoritmasının parametrelerini güncelle.
53.	$G++$
54.	end while

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Önerilen FDB-LSHADESPACMA algoritmasının performansının test edildiği bu bölüm, üç alt bölümden oluşmaktadır.

- İlk alt bölümde, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının performansı incelenmiştir. “*Bölüm 3.3.3. FDB-LSHADESPACMA Algoritması Tasarımı*” bölümünde detaylı olarak açıklanan FDB-LSHADESPACMA algoritmasına ait versiyonlar ve orijinal LSHADESPACMA algoritması, CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri üzerinde test edilmiştir. En başarılı performans sergileyen FDB-LSHADESPACMA versiyonu belirlenmiştir.
- İkinci alt bölümde, önerilen FDB-LSHADESPACMA algoritmasının performansını test etmek için CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri, literatürde sıklıkla kullanılan 14 MSA algoritması ile optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, istatistiksel analiz yöntemleri ile değerlendirilmiştir.
- Üçüncü alt bölümde ise, “*Bölüm 2.1. Enerji Hubın Matematiksel Modeli*” bölümünde verilen enerji hub modelleri kullanılarak test sistemleri oluşturulmuştur. Bu test fonksiyonları ile “*Bölüm 2.4. Amaç Fonksiyonları*” bölümünde verilen problemler kullanılarak on iki senaryo oluşturulmuştur. Oluşturulan bu senaryolar, önerilen FDB-LSHADESPACMA algoritması ve 14 MSA algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir ve karşılaştırılmıştır.

4.1. DENEYSEL AYARLAR

MSA algoritmaları deterministik olmayan yöntemler olduğundan, deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin ve analiz sonuçlarının güvenilirliği oldukça hassas bir konudur. Bu nedenle, MSA algoritmalarını test ederken ve karşılaştırırken adaletin ve standartlara uygunluğun sağlanması esastır. Bu bölümde, ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilecek olan deneysel çalışmalar için kullanılacak ayarlar tanımlanacaktır. Deneysel çalışmaların yürütülmesinde, CEC17 [91] ve CEC20’de [92] tanımlanan

rekabet koşulları ve standartlar referans alınmıştır. EK-1’de CEC2017 test fonksiyonları ve EK-2’de CEC2020 test fonksiyonları ile ilgili tanımlamalar verilmiştir. Bu standartlar dikkate alınarak hazırlanan deneysel çalışma koşulları aşağıda verilmiştir:

- Maksimum uygunluk fonksiyonu değerlendirme sayısı (maxFEs), MSA algoritmaları arasında adaleti sağlamak amacıyla, arama süreci sonlandırma kriteri olarak kullanılmıştır. Tüm algoritmalar için maxFE değeri 10000*Boyut olarak ayarlanmıştır.
- Farklı özelliklere sahip arama uzaylarında rakip algoritmaların performansını test etmek için dört farklı tipte 39 kıyaslama problemi kullanılmıştır. Problemler küçük, orta ve büyük arama uzaylarını temsil edecek şekilde 30, 50 ve 100 boyutlu olarak tasarlanmıştır.
- Her bir kıyaslama probleminin optimizasyonu için algoritmalar 51 kez çalıştırılmıştır.
- Deneysel çalışmalar, MATLAB® R2016b’de uygulanmış ve Intel® Core™ i5-CPU @ 2.90 GHz 8 GB RAM ve x64 tabanlı bir işlemci üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda, önerilen algoritmanın performansını karşılaştırmak için literatürde sıklıkla kullanılan ve güncel olan 14 MSA algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmalar, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, COA, LSHADESPACMA, MFO, LSHADE, GSA ve GA’dır.

Deneysel çalışmalarda, bu algoritmaların parametre ayarları kendi orijinal makalelerinde verildiği şekilde kullanılmıştır. 14 MSA algoritmasının parametre ayarları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. MSA algoritmalarının parametre ayarları.

Algoritma	Yıl	Parametre Ayarları
MPA [69]	2020	arama ajanı sayısı (n) = 25, $FADs$ etkisi = 0,2
EO [70]	2020	parçacık sayısı = 30, $a_1 = 2$, $a_2 = 1$, nesil olasılığı (GP) = 0,5
BMO [71]	2020	arama ajanı sayısı = 30
AEFA [72]	2019	popülasyon sayısı (N) = 20, Coulomb sabitinin ilk değeri (K_0) = 500, $\alpha = 30$
AEO [73]	2019	popülasyon sayısı = 50
SDO [74]	2019	market boyutu (n) = 50
AGDE [75]	2019	popülasyon sayısı (NP) = 50, $p = 0,1$

Çizelge 4.1. (devam) MSA algoritmalarının parametre ayarları.

Algoritma	Yıl	Parametre Ayarları
COA [76]	2018	popülasyon sayısı = $N_p * N_c$, paket sayısı (N_p) = 5, kır kurdu sayısı (N_c) = 20
SSA [77]	2017	salp popülasyon sayısı = 30
LSHADE SPACMA [78]	2017	popülasyon sayısı = $18 * \text{Boyut}$, $p = 0,11$, arşiv oranı = 1,4, bellek boyutu = 5, olasılık değişkeni (FCP) = 0,5, öğrenme oranı (c) = 0,8
MFO [79]	2015	güve sayısı (n)= 30, r değeri doğrusal olarak 1'den 2'ye azalır
LSHADE [80]	2014	minimum popülasyon sayısı = 4, maksimum popülasyon sayısı = $18 * \text{Boyut}$, arşiv oranı = 1,4, bellek boyutu = 5, $p = 0,11$
GSA [81]	2009	popülasyon sayısı (N) = 50, azalma katsayısı (α) = 20, yerçekimi sabitinin ilk değeri (G_0) = 100
GA [82]	1975	popülasyon sayısı = 50

4.2. FDB-LSHADESPACMA ALGORİTMASININ CEC 2017 VE CEC 2020 KİYASLAMA PROBLEMLERİNDE TEST EDİLMESİ

Bu alt bölümde, FDB-LSHADESPACMA versiyonlarının performansları değerlendirilmiştir. FDB-LSHADESPACMA algoritmasının Versiyon-1, Versiyon-2, Versiyon-3 ve Versiyon-4 olmak üzere dört farklı versiyonu kullanılmıştır. Önerilen bu versiyonlar ile ilgili ayrıntılı bilgi “Bölüm 3.3.3. FDB-LSHADESPACMA Algoritması Tasarımı” bölümünde yer almaktadır. Takip eden alt bölümlerde, önerilen FDB-LSHADESPACMA versiyonlarının CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri kullanılarak performansları istatistiksel analiz yöntemleri ve yakınsama analizi ile detaylı olarak incelenmiştir.

4.2.1. İstatistiksel Analiz

Deney sonuçlarından elde edilen veriler, istatistiksel test yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Buna göre, ikiden fazla algoritma arasında karşılaştırma yapmak için Friedman testi ve algoritmalar arasında ikili karşılaştırmalar için Wilcoxon ikili işaret testi kullanılmıştır.

İstatistiksel analiz için veri 39 test problemi, 3 farklı boyut ve 51 bağımsız deneme ve 5 MSA algoritmasını (LSHADESPACMA ve versiyonları) içermektedir. En iyi FDB-LSHADESPACMA versiyonunu belirlemek için deneysel çalışmalardan elde edilen 29.835 ($39 \times 3 \times 51 \times 5$) veri, Friedman testi kullanılarak analiz edilmiştir. Friedman puanları, her deneysel çalışmada algoritmalar tarafından elde edilen hata değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu puanlar, algoritmaların istatistiksel olarak elde ettiği sıraları temsil eder. Friedman testi ile elde edilen algoritmaların puan değerleri Çizelge

4.2’de verilmiştir. CEC2017 ve CEC2020 test takımları kullanılarak, 30, 50 ve 100 boyut olmak üzere altı deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.2’nin son sütununda, algoritmaların tüm deneylerden elde ettiği puanların ortalaması verilmiştir. Ayrıca, her deney için elde edilen en iyi puan, Çizelge 4.2’de koyu renk ile işaretlenmiştir.

Çizelge 4.2. LSHADESPACMA ve FDB-LSHADESPACMA versiyonları için Friedman testi ile elde edilen sıralama sonuçları.

Algoritma	Boyut = 30		Boyut = 50		Boyut = 100		Ortalama Sıra
	CEC2017	CEC2020	CEC2017	CEC2020	CEC2017	CEC2020	
Versiyon-3	2,3891	2,5549	2,2657	2,2314	2,0801	1,8324	2,2256
Versiyon-1	2,6528	2,8137	2,4804	2,6833	2,6085	2,6882	2,6545
Versiyon-4	3,1670	3,0431	3,4493	3,1314	3,4459	3,3627	3,2666
Versiyon-2	3,3465	3,1010	3,4385	3,3392	3,6464	3,5922	3,4106
LSHADESPACMA	3,4446	3,4873	3,3661	3,6147	3,2191	3,5245	3,4427

Çizelge 4.2’de, beş algoritmanın performansı, üç farklı problem boyutu ve her bir test takımı için ayrı ayrı verilmiştir. Bu sonuçlara göre, Versiyon-1 ve Versiyon-3, tüm deneylerde, orijinal LSHADESPACMA algoritmasından daha iyi arama performansı göstermiştir. Versiyon-2, CEC2017 test takımında 50 ve 100 boyutta ve CEC2020 test takımında 100 boyutta yapılan deneylerde, orijinal LSHADESPACMA algoritmasına göre kötü performans göstermiştir. Versiyon-4, CEC2017 test takımında 50 ve 100 boyutta yapılan deneylerde, orijinal LSHADESPACMA algoritmasına göre kötü puan elde etmiştir. Ortalama sıra değerine göre, LSHADESPACMA algoritmasının FDB ile geliştirilmiş tüm versiyonları orijinal algoritmayı geçmiştir. Sonuç olarak, Versiyon-3 tüm deneysel çalışmalarda rakiplerinden daha iyi arama performansı göstermiş ve birinci sırada yer almıştır.

Friedman sıralamaları, algoritmaların performansı hakkında genel bilgi sağlarken, Wilcoxon testinde algoritmalar arasında ikili karşılaştırma yapılır. Sonuç olarak, LSHADESPACMA ile her bir versiyon arasında Wilcoxon testi kullanılarak ikili karşılaştırma yapılmıştır. Wilcoxon ikili işaret testi %5 anlamlılık düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Toplam 24 farklı karşılaştırmadan elde edilen analiz sonuçları Çizelge 4.3’te verilmiştir. Çizelge 4.3’te verilen her bir hücrenin toplamı, ilgili CEC kıyaslama takımındaki test problemlerinin sayısını vermektedir. Her bir hücrede verilen puanlar (+/=-) sırasıyla ilgili FDB versiyonunun orijinal algoritmadan üstün olduğu, eşit performans sergilediği ve mağlup olduğu test problemlerinin sayısını göstermektedir. Bir örnekle açıklamak gerekirse, Çizelge 4.3’ün ilk hücresinde Versiyon-1 ile

LSHADESPACMA arasında CEC2017 kıyaslama takımı için 30 boyutta gerçekleşen karşılaştırma sonucunda elde edilen (21/8/0) skora göre, LSHADESPACMA algoritması yirmi dokuz test probleminin yirmi birinde Versiyon-1'e kaybetmiş ve sekiz problemde benzer sonuç göstermiştir.

Çizelge 4.3. LSHADESPACMA ve FDBLSHADESPACMA versiyonları arasında Wilcoxon ikili karşılaştırma sonuçları.

vs. LSHADESPACMA +/-/-	Boyut=30		Boyut=50		Boyut=100	
	CEC2017	CEC2020	CEC2017	CEC2020	CEC2017	CEC2020
Versiyon-1	22/7/0	5/5/0	21/8/0	7/3/0	22/7/0	9/1/0
Versiyon-2	10/17/2	4/6/0	11/10/8	5/4/1	8/9/12	3/5/2
Versiyon-3	23/6/0	8/2/0	26/3/0	8/2/0	25/4/0	10/0/0
Versiyon-4	12/16/1	4/6/0	10/10/9	5/4/1	9/7/13	5/2/3

Çizelge 4.3'te verilen Wilcoxon ikili test sonuçları, algoritmaların rakip algoritmalarla karşı performansı hakkında önemli bilgiler sağlar. Boyut=30 için CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama takımlarında LSHADESPACMA ile versiyonları arasında gerçekleştirilen ikili karşılaştırmalarda, FDB tabanlı versiyonların orijinal algoritmaya göre üstün performans sergilemiştir. Versiyon-3 bu deneylerde, CEC2017 test problemleri için (23/6/0) ve CEC2020 test problemleri için (8/2/0) skorları ile diğer FDB versiyonlarına göre en iyi sonuçları elde etmiş, toplamda 39 test probleminin 31 tanesinde orijinal algoritmayı geçmiş ve 8 tanesinde benzer sonuç göstermiştir. Boyut=50 için yapılan deneylerde, CEC2017 ve CEC2020 test problemleri için FDB versiyonları, orijinal algoritmaya göre daha iyi performans göstermişlerdir. Versiyon-3, CEC2017 ve CEC2020 test problemlerinde sırasıyla elde ettiği (26/3/0) ve (8/2/0) skorları ile rakiplerine üstünlük göstermiştir. Boyut=100 için gerçekleştirilen deneylerde ise, CEC2017 test problemlerinde (25/4/0) skoru ve CEC2020 test problemleri için elde ettiği (10/0/0) skoru ile Versiyon-3 rakiplerine üstünlük sağlamıştır.

LSHADESPACMA ve FDB tabanlı LSHADASPACMA versiyonlarının sömürü, keşif ve dengeli arama performansları, CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama takımında bulunan dört farklı problem tipine göre araştırılmıştır. Bu amaçla, tek-modlu, çok-modlu, hibrit ve birleşik problem tipleri için Friedman sıralama sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Buna göre, algoritmalar arasında karşılaştırma yapmak için toplam yirmi dört deneyden elde edilen veriler analiz edilmiştir. Her bir deney için en iyi Friedman skoruna sahip veri koyu renk ile işaretlenmiştir.

Çizelge 4.4. Farklı problem tipleri için LSHADESPACMA ve FDB-LSHADESPACMA versiyonlarının Friedman sıralaması.

	Problem Tipi	Arama Uzayı	LSHADESPACMA	Versiyon-1	Versiyon-2	Versiyon-3	Versiyon-4
CEC 2017	Tek-modlu	Boyut = 30	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
		Boyut = 50	3,0523	2,9869	2,9869	2,9869	2,9869
		Boyut = 100	3,3954	3,1699	2,9575	2,8562	2,6209
	Çok-modlu	Boyut = 30	3,5082	2,7059	3,0654	2,4265	3,2941
		Boyut = 50	3,4853	2,3154	3,1552	2,3971	3,6471
		Boyut = 100	3,2549	2,7075	3,2124	2,4804	3,3448
	Hibrit	Boyut = 30	3,4853	2,0853	4,0324	1,7951	3,6020
		Boyut = 50	3,1588	1,8569	4,1598	1,7363	4,0882
		Boyut = 100	2,9804	2,0137	4,1500	1,6745	4,1814
	Birleşik	Boyut = 30	3,4990	3,0843	2,9333	2,7775	2,7059
		Boyut = 50	3,5961	3,0510	3,0225	2,5000	2,8304
		Boyut = 100	3,3833	2,9755	3,6098	2,0127	3,0186
CEC 2020	Tek-modlu	Boyut = 30	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
		Boyut = 50	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
		Boyut = 100	3,6961	2,9608	2,6667	3,0098	2,6667
	Çok-modlu	Boyut = 30	3,6601	3,0196	3,0915	2,5229	2,7059
		Boyut = 50	3,8301	2,5948	3,0915	2,4641	3,0196
		Boyut = 100	3,8954	2,9150	3,1373	2,1046	2,9477
	Hibrit	Boyut = 30	3,6078	2,1634	3,3595	2,2745	3,5948
		Boyut = 50	3,3203	2,0980	4,0523	1,6013	3,9281
		Boyut = 100	3,2157	2,3007	3,9542	1,3464	4,1830
	Birleşik	Boyut = 30	3,3562	3,1961	2,8856	2,7190	2,8431
		Boyut = 50	3,8987	3,2516	2,9869	2,3725	2,4902
		Boyut = 100	3,4052	2,7582	3,9935	1,6536	3,1895

Tek-modlu problemlerde, yerel çözüm tuzakları olmadığı için algoritmaların sömürü performansını analiz etmek için idealdir. Çizelge 4.4'te verilen sonuçlara göre, CEC2017 kıyaslama takımındaki tek modlu problemlerde, Boyut=30 için LSHADESPACMA ve FDB-LSHADESPACMA versiyonları benzer performans gösterirken, Boyut=50 için tüm FDB-LSHADESPACMA versiyonları benzer performans göstermişlerdir ve orijinal algoritmayı geçmişlerdir. Boyut=100 için ise, Versiyon-4 rakipleri arasında en iyi puanı elde etmiştir. CEC2020 kıyaslama takımındaki tek-modlu problemlerde ise, Boyut=30 ve Boyut=50 için LSHADESPACMA ve FDB-LSHADESPACMA versiyonları benzer performans gösterirken, Boyut=100 için Versiyon-2 en iyi puana sahiptir.

Çok-modlu problemlerde yerel çözüm tuzakları olduğundan dolayı, bu tür sistemlerde erken yakınsama problemlerinden kaçınmak için algoritmalar güçlü bir keşif yeteneğine sahip olmalıdır. Çizelge 4.4'te çok-modlu problemler için yapılan deney sonuçlarına göre, hem CEC2017 hem de CEC2020 çok-modlu kıyaslama problemlerinde, FDB-LSHADESPACMA versiyonları orijinal algoritmaya göre daha iyi puanlar elde

etmişlerdir. CEC2017 kıyaslama takımındaki problemlerde, Boyut=30 ve Boyut=100 için, en iyi puan Versiyon-3'ten elde edilirken, Boyut=50 için en iyi puan Versiyon-1'den elde edilmiştir. CEC2020 kıyaslama takımındaki problemlerde, Versiyon-3 tüm boyutlarda en iyi puana sahiptir. Sonuç olarak, FDB versiyonlarının orijinal LSHADESPACMA algoritmasına üstün bir arama performansı sergilediği görülmektedir.

Hibrit problemler, sömürü ve keşif arasındaki dengenin sağlanmasında algoritmaların performansını test etmek için kullanılırlar. Bu problem tipleri için gerçekleştirilen deney sonuçlarından elde edilen ve Çizelge 4.4'te verilen sonuçlara göre, Versiyon-2 ve Versiyon-4 orijinal algoritmaya göre kötü performans göstermişlerdir. CEC2017 kıyaslama takımından elde edilen sonuçlara göre tüm boyutlarda Versiyon-3 en iyi puanı elde etmiştir. CEC2020 kıyaslama takımından Boyut=30 için Versiyon-1 birinci sırada gelirken, Boyut=50 ve Boyut=100 için Versiyon-3 birinci sırada gelmiştir. Sonuç olarak, Versiyon-3'ün hibrit tip problem uzayındaki performansı, dengeli arama yeteneğinin rakiplerinden daha güçlü olduğunu göstermektedir.

Birleşik problemler, karmaşıklığı en yüksek olan ve diğer problem tiplerine göre optimize edilmesi en zor olan problemlerdir. Bu problemler de hibrit problem tipleri gibi, algoritmaların sömürü ve keşif arasındaki dengeyi ölçmek için kullanılırlar. CEC2017 kıyaslama takımında yapılan deneylerde, tüm boyutlar için FDB versiyonları orijinal algoritmadan üstün performans göstermişlerdir. Boyut=30 için en iyi performans Versiyon-4 tarafından gerçekleştirilirken, Boyut=50 ve Boyut=100 için Versiyon-3 tüm rakiplerine üstünlük göstermiştir. CEC2020 kıyaslama takımında tüm boyutlarda en iyi puan Versiyon-3 tarafından elde edilmiştir.

Çizelge 4.5'te 30, 50 ve 100 boyutlu arama uzaylarında CEC2017 kıyaslama takımındaki test problemlerinden elde edilen hata değerlerinin ortalama ve standart sapma istatistikleri verilmiştir. Çizelge 4.5'teki her bir hücrede sırasıyla ortalama ve standart sapma değerleri verilmiştir. Ayrıca, her bir test fonksiyonu için ilgili boyutta elde edilen en iyi değer koyu renk ile işaretlenmiştir. Çizelge 4.5 incelendiğinde, tek-modlu problemler için LSHADESPACMA ve FDB versiyonlarının 30 ve 50 boyutlar için benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Genel olarak değerlendirmek gerekirse, Versiyon-3 ve Versiyon-1 rekabetçi performans göstermişlerdir.

Çizelge 4.5. CEC 2017 test problemleri için elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri.

Fonksiyon	Arama Uzayı	LSHADESPACMA	Versiyon-1	Versiyon-2	Versiyon-3	Versiyon-4
F1	Boyut = 30	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
	Boyut = 50	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
	Boyut = 100	4,74E-15 (6,77E-15)	3,07E-15 (5,90E-15)	0,00E+00 (0,00E+00)	3,07E-15 (5,90E-15)	0,00E+00 (0,00E+00)
F2	Boyut = 30	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
	Boyut = 50	9,80E-02 (3,61E-01)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
	Boyut = 100	2,38E+04 (1,48E+05)	1,88E+01 (3,64E+01)	1,91E+01 (3,64E+01)	3,76E+00 (7,01E+00)	4,25E+00 (9,61E+00)
F3	Boyut = 30	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
	Boyut = 50	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
	Boyut = 100	2,23E-15 (1,11E-14)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
F4	Boyut = 30	5,86E+01 (5,02E-14)	5,86E+01 (5,02E-14)	5,86E+01 (5,02E-14)	5,86E+01 (5,02E-14)	5,86E+01 (5,02E-14)
	Boyut = 50	3,77E+01 (4,08E+01)	7,67E+00 (1,12E+01)	1,53E+01 (1,37E+01)	1,39E+01 (1,39E+01)	1,96E+01 (1,28E+01)
	Boyut = 100	2,05E+02 (9,75E+00)	2,00E+02 (1,01E+01)	1,96E+02 (8,58E+00)	1,95E+02 (9,47E+00)	1,95E+02 (1,03E+01)
F5	Boyut = 30	4,41E+00 (2,97E+00)	2,30E+00 (1,38E+00)	2,97E+00 (1,33E+00)	2,32E+00 (1,50E+00)	3,28E+00 (1,75E+00)
	Boyut = 50	6,13E+00 (1,99E+00)	4,41E+00 (1,71E+00)	6,85E+00 (1,79E+00)	4,60E+00 (1,66E+00)	7,84E+00 (1,78E+00)
	Boyut = 100	1,19E+01 (3,11E+00)	8,86E+00 (2,46E+00)	1,67E+01 (2,92E+00)	9,56E+00 (2,62E+00)	1,80E+01 (2,80E+00)
F6	Boyut = 30	2,01E-14 (4,38E-14)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
	Boyut = 50	2,36E-10 (1,68E-09)	1,11E-13 (1,59E-14)	1,14E-13 (1,27E-29)	1,05E-13 (3,09E-14)	1,07E-13 (2,70E-14)
	Boyut = 100	1,14E-13 (1,27E-29)	1,14E-13 (1,27E-29)	1,14E-13 (1,27E-29)	1,14E-13 (1,27E-29)	1,14E-13 (1,27E-29)
F7	Boyut = 30	3,39E+01 (9,71E-01)	3,33E+01 (8,54E-01)	3,29E+01 (6,44E-01)	3,33E+01 (7,13E-01)	3,28E+01 (5,42E-01)
	Boyut = 50	5,69E+01 (9,57E-01)	5,59E+01 (8,80E-01)	5,56E+01 (8,03E-01)	5,61E+01 (8,83E-01)	5,56E+01 (7,62E-01)
	Boyut = 100	1,12E+02 (1,50E+00)	1,11E+02 (1,26E+00)	1,10E+02 (1,10E+00)	1,11E+02 (1,29E+00)	1,10E+02 (1,28E+00)
F8	Boyut = 30	3,51E+00 (1,47E+00)	2,30E+00 (1,28E+00)	3,10E+00 (1,54E+00)	1,97E+00 (1,38E+00)	3,12E+00 (1,46E+00)
	Boyut = 50	6,32E+00 (2,30E+00)	4,41E+00 (1,71E+00)	7,12E+00 (2,00E+00)	4,04E+00 (1,97E+00)	8,10E+00 (2,00E+00)
	Boyut = 100	1,13E+01 (2,97E+00)	8,72E+00 (2,54E+00)	1,58E+01 (2,64E+00)	8,78E+00 (2,50E+00)	1,72E+01 (2,42E+00)
F10	Boyut = 30	1,43E+03 (2,41E+02)	1,29E+03 (2,05E+02)	1,37E+03 (1,94E+02)	1,23E+03 (2,24E+02)	1,43E+03 (1,88E+02)
	Boyut = 50	3,56E+03 (5,44E+02)	3,06E+03 (5,32E+02)	3,29E+03 (4,48E+02)	3,06E+03 (5,13E+02)	3,29E+03 (4,90E+02)
	Boyut = 100	9,71E+03 (9,65E+02)	9,33E+03 (7,12E+02)	9,81E+03 (8,45E+02)	9,38E+03 (8,91E+02)	9,83E+03 (7,46E+02)
F11	Boyut = 30	2,01E+01 (2,60E+01)	3,38E+00 (2,70E+00)	3,92E+00 (2,32E+00)	3,06E+00 (2,44E+00)	3,90E+00 (2,23E+00)
	Boyut = 50	3,31E+01 (5,16E+00)	2,89E+01 (3,93E+00)	3,59E+01 (6,16E+00)	2,80E+01 (3,63E+00)	3,50E+01 (5,34E+00)
	Boyut = 100	4,80E+01 (1,96E+01)	3,57E+01 (7,62E+00)	5,35E+01 (1,12E+01)	3,52E+01 (8,35E+00)	5,40E+01 (1,37E+01)

Çizelge 4.5. (devam) CEC 2017 test problemleri için elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri.

Fonksiyon	Arama Uzayı	LSHADESPACMA	Versiyon-1	Versiyon-2	Versiyon-3	Versiyon-4
F12	Boyut = 30	5,92E+02 (2,90E+02)	3,41E+02 (2,13E+02)	4,79E+02 (2,63E+02)	3,54E+02 (2,19E+02)	4,11E+02 (2,36E+02)
	Boyut = 50	1,66E+03 (4,07E+02)	1,32E+03 (3,88E+02)	1,52E+03 (3,93E+02)	1,23E+03 (3,89E+02)	1,51E+03 (3,95E+02)
	Boyut = 100	4,72E+03 (6,70E+02)	4,28E+03 (7,07E+02)	4,35E+03 (6,30E+02)	4,16E+03 (7,06E+02)	4,29E+03 (5,91E+02)
F13	Boyut = 30	1,22E+01 (6,47E+00)	9,23E+00 (6,73E+00)	1,06E+01 (6,93E+00)	9,17E+00 (6,88E+00)	1,03E+01 (7,50E+00)
	Boyut = 50	3,60E+01 (1,83E+01)	2,36E+01 (1,73E+01)	3,37E+01 (2,02E+01)	2,39E+01 (1,67E+01)	3,18E+01 (1,92E+01)
	Boyut = 100	1,33E+02 (3,35E+01)	1,03E+02 (2,46E+01)	1,68E+02 (3,74E+01)	1,06E+02 (2,50E+01)	1,69E+02 (3,45E+01)
F14	Boyut = 30	2,27E+01 (3,30E+00)	2,19E+01 (1,14E+00)	2,27E+01 (1,54E+00)	2,12E+01 (3,65E+00)	2,29E+01 (3,35E+00)
	Boyut = 50	2,81E+01 (3,19E+00)	2,65E+01 (2,28E+00)	2,94E+01 (2,80E+00)	2,67E+01 (2,34E+00)	2,96E+01 (2,78E+00)
	Boyut = 100	7,29E+01 (1,07E+01)	6,58E+01 (1,03E+01)	1,17E+02 (1,53E+01)	6,56E+01 (9,93E+00)	1,19E+02 (1,38E+01)
F15	Boyut = 30	5,11E+00 (3,50E+00)	3,12E+00 (1,52E+00)	3,80E+00 (1,78E+00)	3,24E+00 (1,57E+00)	3,87E+00 (1,66E+00)
	Boyut = 50	3,03E+01 (5,99E+00)	2,74E+01 (4,43E+00)	3,32E+01 (5,70E+00)	2,69E+01 (3,69E+00)	3,41E+01 (6,57E+00)
	Boyut = 100	1,08E+02 (2,74E+01)	8,60E+01 (1,98E+01)	1,43E+02 (2,71E+01)	8,56E+01 (2,24E+01)	1,37E+02 (2,53E+01)
F16	Boyut = 30	3,23E+01 (3,88E+01)	2,07E+01 (1,29E+01)	5,14E+01 (6,49E+01)	1,79E+01 (6,74E+00)	4,66E+01 (5,76E+01)
	Boyut = 50	4,32E+02 (1,93E+02)	2,80E+02 (1,57E+02)	4,96E+02 (1,76E+02)	2,81E+02 (1,70E+02)	4,97E+02 (1,67E+02)
	Boyut = 100	1,44E+03 (4,35E+02)	1,04E+03 (3,81E+02)	1,64E+03 (4,26E+02)	9,72E+02 (3,39E+02)	1,67E+03 (4,53E+02)
F17	Boyut = 30	3,12E+01 (8,00E+00)	2,40E+01 (8,01E+00)	2,83E+01 (7,17E+00)	2,30E+01 (8,09E+00)	2,71E+01 (7,05E+00)
	Boyut = 50	2,65E+02 (9,17E+01)	2,35E+02 (6,20E+01)	2,94E+02 (8,53E+01)	2,25E+02 (7,12E+01)	2,93E+02 (8,44E+01)
	Boyut = 100	1,07E+03 (3,66E+02)	7,66E+02 (3,15E+02)	1,29E+03 (2,94E+02)	7,55E+02 (3,37E+02)	1,31E+03 (2,88E+02)
F18	Boyut = 30	2,36E+01 (2,09E+00)	2,21E+01 (1,18E+00)	2,42E+01 (1,84E+00)	2,20E+01 (1,22E+00)	2,39E+01 (2,21E+00)
	Boyut = 50	3,37E+01 (8,09E+00)	2,80E+01 (3,93E+00)	3,82E+01 (8,06E+00)	2,80E+01 (3,43E+00)	3,79E+01 (7,76E+00)
	Boyut = 100	1,34E+02 (3,04E+01)	1,09E+02 (2,63E+01)	1,65E+02 (2,94E+01)	1,06E+02 (2,52E+01)	1,69E+02 (3,28E+01)
F19	Boyut = 30	1,02E+01 (2,04E+00)	8,43E+00 (1,86E+00)	1,29E+01 (2,45E+00)	8,15E+00 (1,78E+00)	1,22E+01 (2,42E+00)
	Boyut = 50	2,18E+01 (3,79E+00)	1,84E+01 (3,21E+00)	2,30E+01 (3,49E+00)	1,88E+01 (2,89E+00)	2,30E+01 (3,43E+00)
	Boyut = 100	7,20E+01 (1,09E+01)	6,62E+01 (8,08E+00)	1,09E+02 (1,57E+01)	6,55E+01 (8,31E+00)	1,06E+02 (1,17E+01)
F20	Boyut = 30	9,82E+01 (6,32E+01)	4,58E+01 (2,00E+01)	7,76E+01 (5,54E+01)	4,77E+01 (2,05E+01)	7,63E+01 (5,81E+01)
	Boyut = 50	1,57E+02 (9,12E+01)	1,06E+02 (2,00E+01)	1,85E+02 (1,02E+02)	1,14E+02 (3,62E+01)	1,92E+02 (9,97E+01)
	Boyut = 100	1,40E+03 (3,79E+02)	1,09E+03 (2,87E+02)	1,43E+03 (2,42E+02)	1,12E+03 (2,93E+02)	1,44E+03 (2,80E+02)
F21	Boyut = 30	2,07E+02 (3,68E+00)	2,05E+02 (2,60E+00)	2,04E+02 (1,59E+00)	2,05E+02 (3,02E+00)	2,03E+02 (1,89E+00)
	Boyut = 50	2,15E+02 (1,11E+01)	2,09E+02 (6,49E+00)	2,08E+02 (2,47E+00)	2,09E+02 (7,13E+00)	2,09E+02 (2,30E+00)
	Boyut = 100	2,40E+02 (3,69E+00)	2,38E+02 (2,99E+00)	2,43E+02 (3,44E+00)	2,38E+02 (3,38E+00)	2,43E+02 (3,41E+00)

Çizelge 4.5. (devam) CEC 2017 test problemleri için elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri.

Fonksiyon	Arama Uzayı	LSHADESPACMA	Versiyon-1	Versiyon-2	Versiyon-3	Versiyon-4
F22	Boyut = 30	1,00E+02 (0,00E+00)	1,00E+02 (0,00E+00)	1,00E+02 (0,00E+00)	1,00E+02 (0,00E+00)	1,00E+02 (0,00E+00)
	Boyut = 50	1,43E+03 (1,96E+03)	8,75E+02 (1,49E+03)	1,00E+02 (0,00E+00)	3,92E+02 (8,90E+02)	1,00E+02 (2,41E+00)
	Boyut = 100	1,02E+04 (9,56E+02)	9,28E+03 (8,79E+02)	1,04E+04 (7,54E+02)	9,43E+03 (8,63E+02)	1,06E+04 (8,19E+02)
F23	Boyut = 30	3,55E+02 (3,16E+00)	3,53E+02 (3,47E+00)	3,52E+02 (3,98E+00)	3,53E+02 (2,94E+00)	3,52E+02 (3,75E+00)
	Boyut = 50	4,41E+02 (6,71E+00)	4,36E+02 (6,48E+00)	4,38E+02 (7,45E+00)	4,35E+02 (6,64E+00)	4,37E+02 (7,63E+00)
	Boyut = 100	5,82E+02 (7,24E+00)	5,79E+02 (5,82E+00)	5,84E+02 (7,57E+00)	5,76E+02 (7,02E+00)	5,78E+02 (8,14E+00)
F24	Boyut = 30	4,28E+02 (2,80E+00)	4,27E+02 (2,70E+00)	4,26E+02 (2,60E+00)	4,27E+02 (2,36E+00)	4,26E+02 (2,78E+00)
	Boyut = 50	5,13E+02 (6,44E+00)	5,11E+02 (4,83E+00)	5,09E+02 (3,77E+00)	5,09E+02 (4,02E+00)	5,07E+02 (3,12E+00)
	Boyut = 100	9,12E+02 (1,77E+01)	9,11E+02 (1,43E+01)	9,13E+02 (8,13E+00)	9,04E+02 (1,06E+01)	9,04E+02 (6,27E+00)
F25	Boyut = 30	3,87E+02 (8,35E-03)	3,87E+02 (6,16E-03)	3,87E+02 (8,10E-03)	3,87E+02 (4,96E-03)	3,87E+02 (7,21E-03)
	Boyut = 50	4,80E+02 (4,03E-01)	4,80E+02 (5,64E-01)	4,80E+02 (8,92E-03)	4,80E+02 (7,82E-01)	4,80E+02 (9,42E-03)
	Boyut = 100	6,97E+02 (4,84E+01)	6,71E+02 (3,32E+01)	6,86E+02 (4,92E+01)	6,68E+02 (3,75E+01)	6,95E+02 (4,37E+01)
F26	Boyut = 30	9,44E+02 (6,11E+01)	9,29E+02 (4,21E+01)	9,32E+02 (1,04E+02)	9,15E+02 (3,63E+01)	9,28E+02 (4,08E+01)
	Boyut = 50	1,14E+03 (4,96E+01)	1,12E+03 (4,72E+01)	1,16E+03 (5,47E+01)	1,11E+03 (4,87E+01)	1,14E+03 (4,62E+01)
	Boyut = 100	3,13E+03 (8,48E+01)	3,14E+03 (6,75E+01)	3,30E+03 (8,90E+01)	3,07E+03 (6,93E+01)	3,20E+03 (7,63E+01)
F27	Boyut = 30	5,06E+02 (5,62E+00)	5,03E+02 (4,15E+00)	5,02E+02 (4,14E+00)	5,02E+02 (5,39E+00)	5,01E+02 (4,58E+00)
	Boyut = 50	5,33E+02 (1,22E+01)	5,25E+02 (7,24E+00)	5,21E+02 (7,49E+00)	5,24E+02 (8,01E+00)	5,22E+02 (7,13E+00)
	Boyut = 100	6,00E+02 (2,11E+01)	5,91E+02 (1,69E+01)	5,75E+02 (1,25E+01)	5,87E+02 (1,57E+01)	5,73E+02 (1,40E+01)
F28	Boyut = 30	3,20E+02 (4,30E+01)	3,00E+02 (0,00E+00)	3,00E+02 (0,00E+00)	3,00E+02 (0,00E+00)	3,00E+02 (0,00E+00)
	Boyut = 50	4,60E+02 (6,84E+00)	4,59E+02 (4,02E-13)	4,59E+02 (4,02E-13)	4,59E+02 (4,02E-13)	4,59E+02 (4,02E-13)
	Boyut = 100	5,18E+02 (1,88E+01)	5,07E+02 (1,62E+01)	5,02E+02 (2,01E+01)	5,02E+02 (2,04E+01)	5,03E+02 (1,93E+01)
F29	Boyut = 30	4,44E+02 (1,44E+01)	4,37E+02 (1,20E+01)	4,45E+02 (1,05E+01)	4,36E+02 (9,79E+00)	4,45E+02 (1,28E+01)
	Boyut = 50	3,84E+02 (4,55E+01)	3,59E+02 (1,53E+01)	3,91E+02 (2,41E+01)	3,55E+02 (1,75E+01)	3,90E+02 (2,39E+01)
	Boyut = 100	1,53E+03 (3,49E+02)	1,33E+03 (2,70E+02)	1,46E+03 (2,63E+02)	1,31E+03 (2,96E+02)	1,47E+03 (2,75E+02)
F30	Boyut = 30	1,99E+03 (5,96E+01)	1,96E+03 (1,81E+01)	1,96E+03 (1,71E+01)	1,96E+03 (2,03E+01)	1,97E+03 (1,72E+01)
	Boyut = 50	6,57E+05 (9,82E+04)	6,06E+05 (3,16E+04)	5,95E+05 (2,51E+04)	6,15E+05 (4,01E+04)	6,02E+05 (2,84E+04)
	Boyut = 100	2,45E+03 (2,24E+02)	2,30E+03 (1,20E+02)	2,25E+03 (8,98E+01)	2,29E+03 (1,23E+02)	2,24E+03 (8,84E+01)

Algoritmaların sömürü ve keşif yeteneklerini analiz etmek için box-plot grafikleri kullanılmaktadır. Farklı problem tipleri (tek-modlu, çok-modlu, hibrit ve birleşik) üzerindeki arama performansını göstermek için CEC 2017 kıyaslama takımında her bir problem tipinden bir tane seçilmiştir. Şekil 4.1’de FDB-LSHADESPACMA versiyonlarının ve LSHADESPACMA algoritmasının F3 (tek-modlu), F10 (çok-modlu), F12 (hibrit) ve F23 (birleşik) tipi problemler için bulunan hata değerlerine göre box-plot grafikleri verilmiştir.

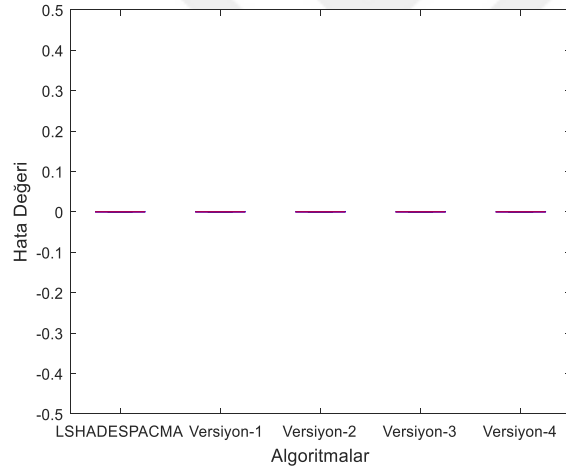
Box-plot grafiklerinde her kutuda, ortadaki işaret medyan değerini gösterir ve kutunun alt ve üst kenarları sırasıyla %25 ve %75’lik dilimleri gösterir. Kesikli olarak uzanan çizgiler aykırı değer olarak kabul edilmeyen en uç veri noktalarına kadar uzanır ve aykırı değerler “+” işaret sembolü kullanılarak ayrı ayrı çizilir.

F3 tek-modlu problemi için, bütün algoritmalar 30/50/100 boyutlarının tamamında global optimum çözüme istikrarlı bir şekilde yakınsamıştır. Bu, algoritmaların sömürü görevini başarıyla yerine getirebildiğini göstermektedir.

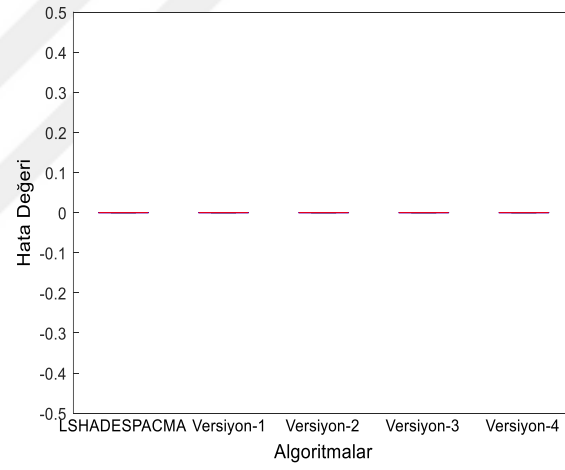
F10 çok-modlu problemi için, bütün algoritmalar 30/50/100 boyutlarının tamamında farklı yakınsama performansları sergilemiştir. Problem boyutu arttıkça algoritmaların yakınsama hata değerleri de artmıştır. Versiyon-1 ve Versiyon-3’ün rakiplerine göre daha iyi yakınsadığı görülmektedir.

F12 hibrit tip problem için, 30/50/100 boyutlarının tamamında, Versiyon-3 en düşük hata değerine ve en kararlı yakınsama performansına sahip algoritmadır. Versiyon-1 ve Versiyon-3, düşük boyutlu arama uzayında benzer performans sergilemişlerdir. Hibrit tip problemler, sömürü ve keşif arasında dengenin sağlanmasında algoritmaların performansını test etmek için kullanılır. Buna göre, problem boyutu arttıkça Versiyon-3’ün rakiplerine göre daha dengeli bir arama gerçekleştirebildiği görülmektedir.

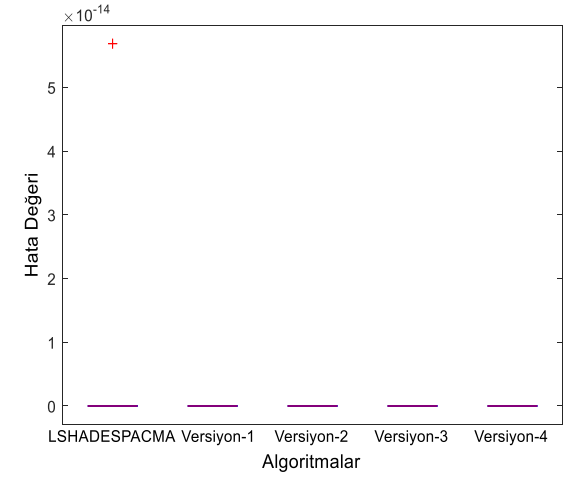
F23 birleşik tip problem için, tüm boyutlarda algoritmalar farklı performans göstermişlerdir. 30/50/100 boyutlarının tamamında, algoritmaların yakınsama performansları birbirine benzerdir. 30 boyutta Versiyon-4, 50 ve 100 boyutta ise Versiyon-3 rakiplerinden daha iyi yakınsama performansı göstermiştir.



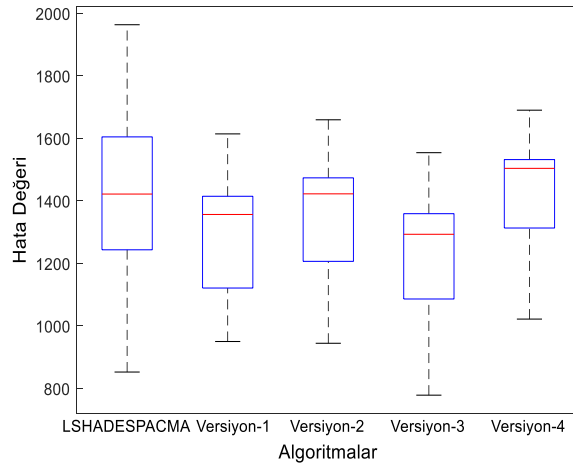
(a) F3 (Tek-modlu) D = 30



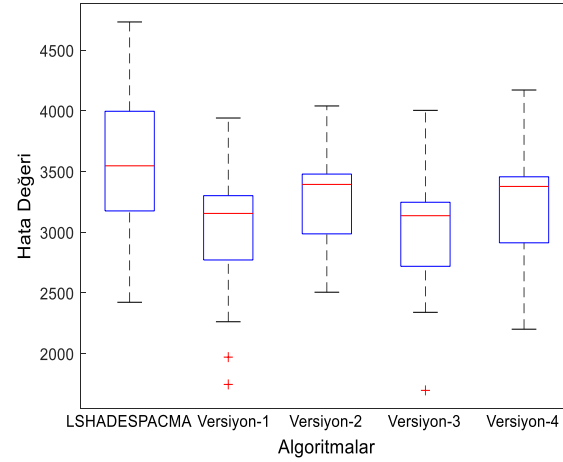
(b) F3 (Tek-modlu) D = 50



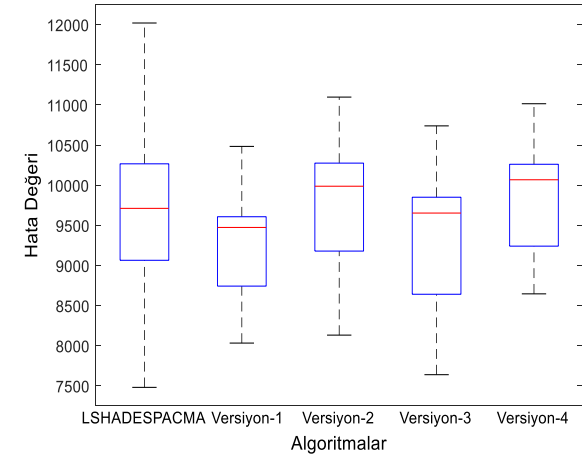
(c) F3 (Tek-modlu) D = 100



(d) F10 (Çok-modlu) D = 30

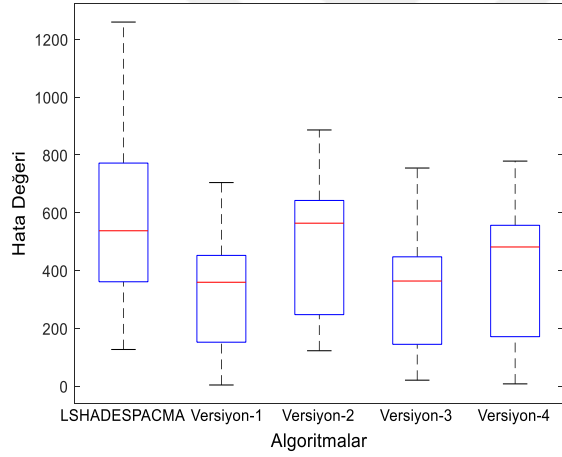


(e) F10 (Çok-modlu) D = 50

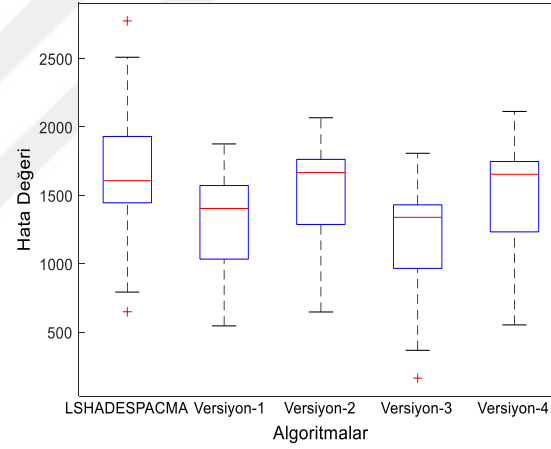


(f) F10 (Çok-modlu) D = 100

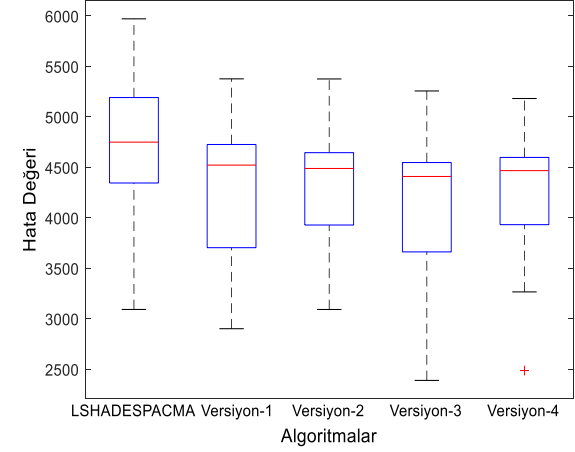
Şekil 4.1. CEC2017 kıyaslama takımından seçilen problemlerin box-plot grafikleri.



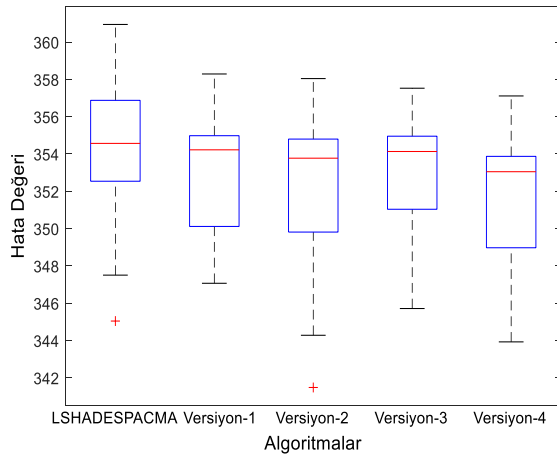
(g) F12 (Hibrit) D = 30



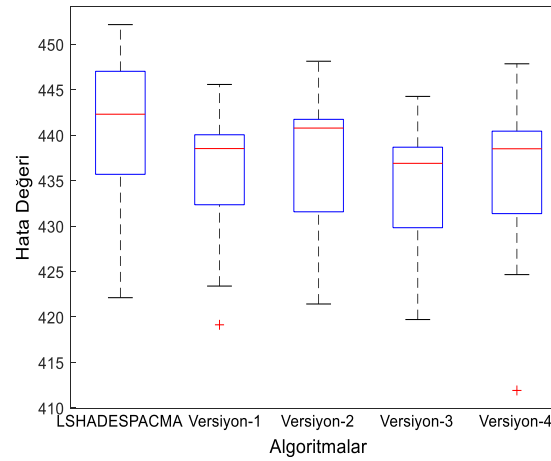
(h) F12 (Hibrit) D = 50



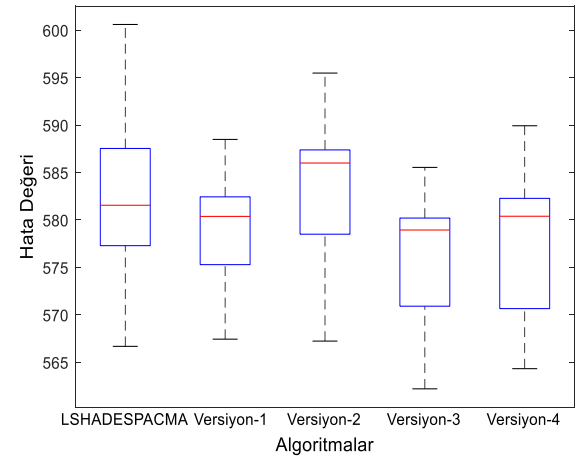
(i) F12 (Hibrit) D = 100



(j) F23 (Birleşik) D = 30



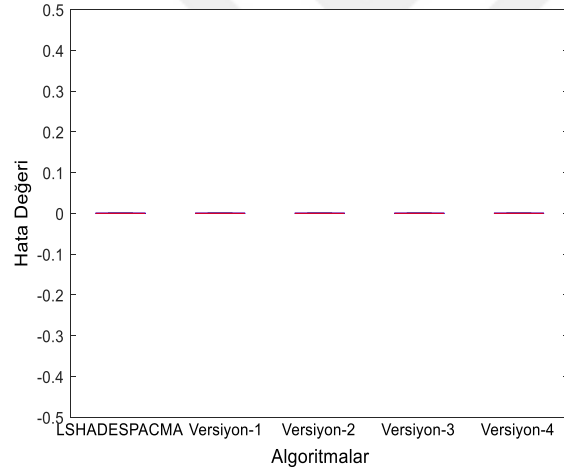
(k) F23 (Birleşik) D = 50



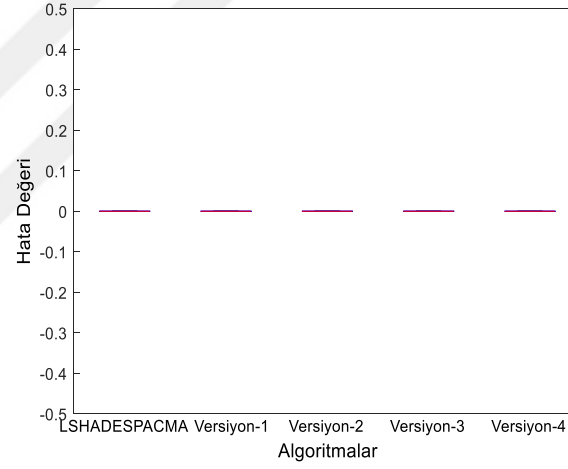
(l) F23 (Birleşik) D = 100

Şekil 4.1. (devam) CEC2017 kıyaslama takımından seçilen problemlerin box-plot grafikleri.

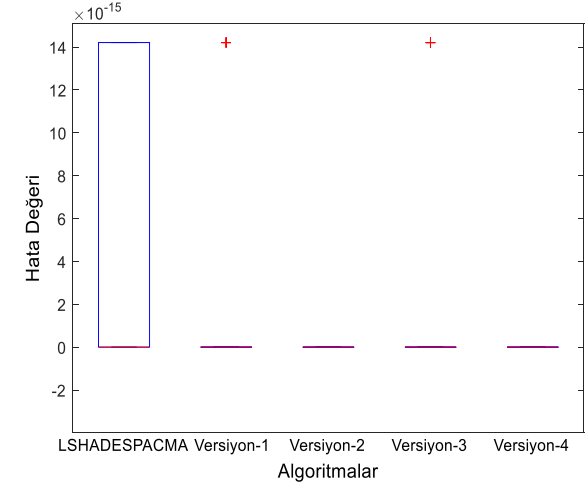
CEC2020 kıyaslama takımından farklı problem tipleri (tek-modlu, çok-modlu, hibrit ve birleşik) için algoritmaların üzerindeki arama performansını göstermek amacıyla her bir problem tipinden bir tane seçilmiştir. Şekil 4.2’de CEC2020 kıyaslama takımından seçilen F1 (tek-modlu), F2 (çok-modlu), F5 (hibrit) ve F9 (birleşik) tipi problemler için FDB-LSHADESPACMA versiyonlarından ve LSHADESPACMA algoritmasından elde edilen hata değerlerine göre box-plot grafikleri verilmiştir. F1 tek-modlu problem için, 30/50/100 boyutlarının tamamında LSHADESPACMA ve FDB versiyonlarının tamamı global optimum çözüme istikrarlı bir şekilde yakınsamıştır. F2 çok-modlu problem için, 30/50/100 boyutlarının tamamında algoritmalar farklı yakınsama performansları göstermişlerdir. Problem boyutu arttıkça algoritmaların yakınsama hata değerleri de artmıştır. Tüm boyutlarda ise, Versiyon-1 ve Versiyon-3’ün rakiplerine göre daha iyi yakınsadığı görülmektedir. F5 hibrit tip problem için, 30 ve 50 boyutta Versiyon-1 ve Versiyon-3’ün rakiplerine göre daha iyi performans göstermiştir. 100 boyutta ise en düşük hata değerine ve en kararlı yakınsama performansına sahip algoritma Versiyon-3’ tür. F9 birleşik tip problem için, 30/50/100 boyutlarının tamamında, algoritmaların yakınsama performansları birbirine benzerdir. 30 ve 50 boyutta Versiyon-4, 100 boyutta ise Versiyon-3 rakiplerinden daha iyi yakınsama performansı göstermiştir.



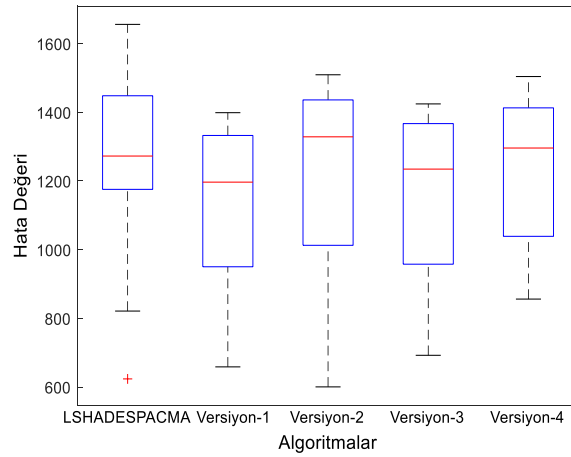
(a) F1 (Tek-modlu) D = 30



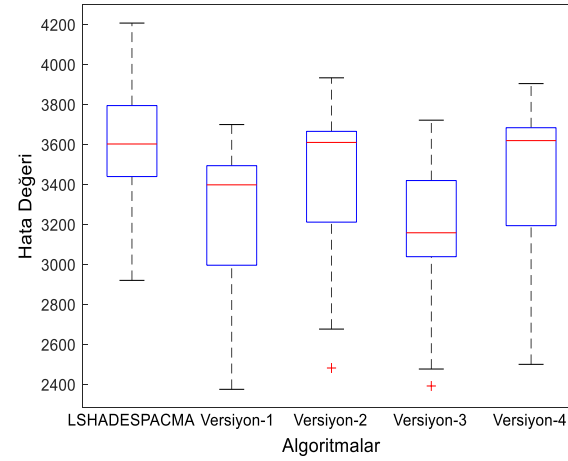
(b) F1 (Tek-modlu) D = 50



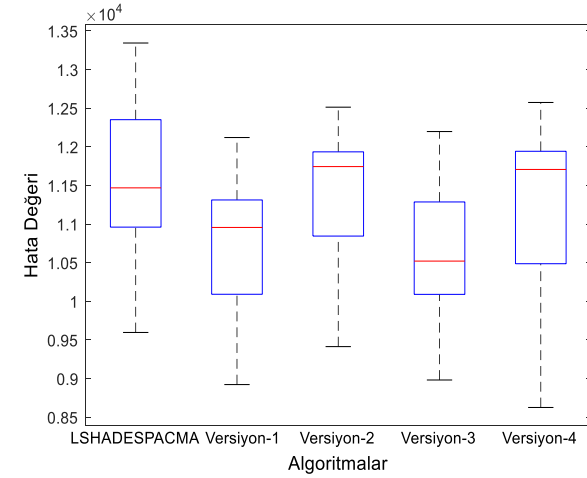
(c) F1 (Tek-modlu) D = 100



(d) F2 (Çok-modlu) D = 30

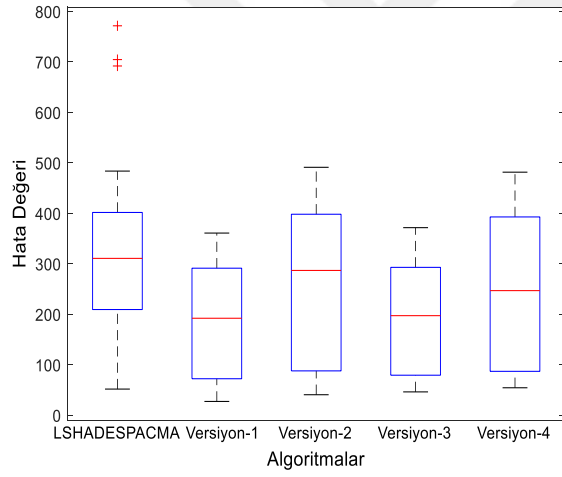


(e) F2 (Çok-modlu) D = 50

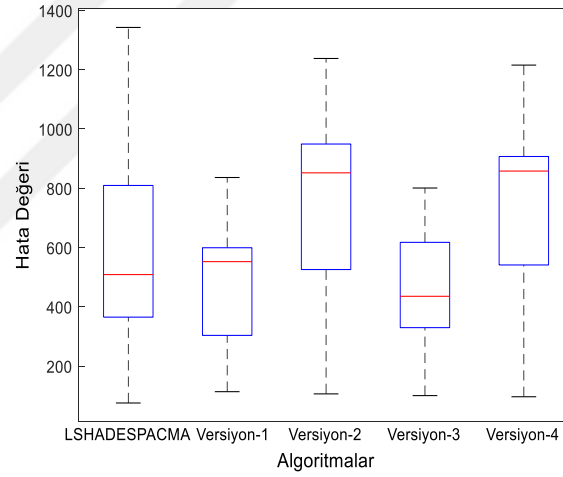


(f) F2 (Çok-modlu) D = 100

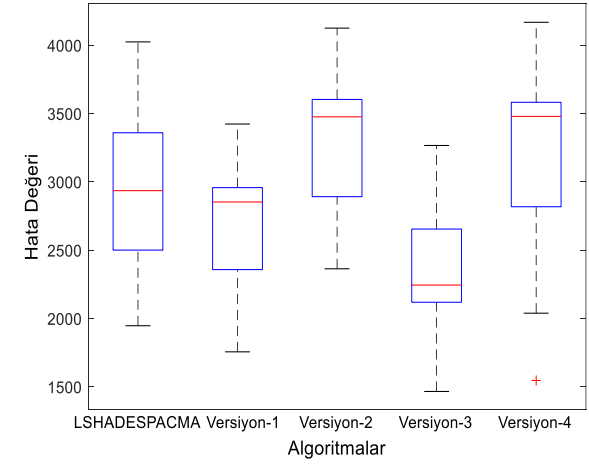
Şekil 4.2. CEC2020 kıyaslama takımından seçilen problemlerin box-plot grafikleri.



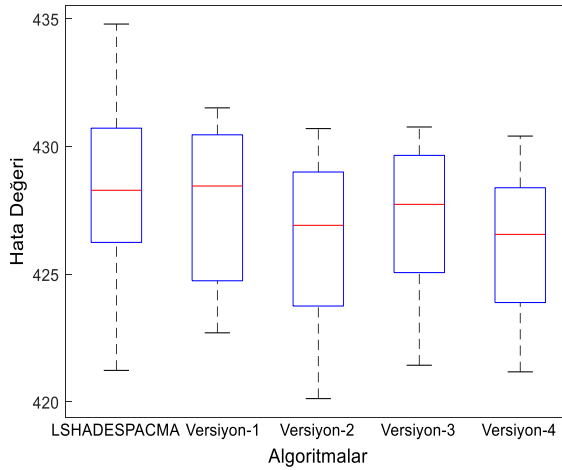
(g) F5 (Hibrit) D = 30



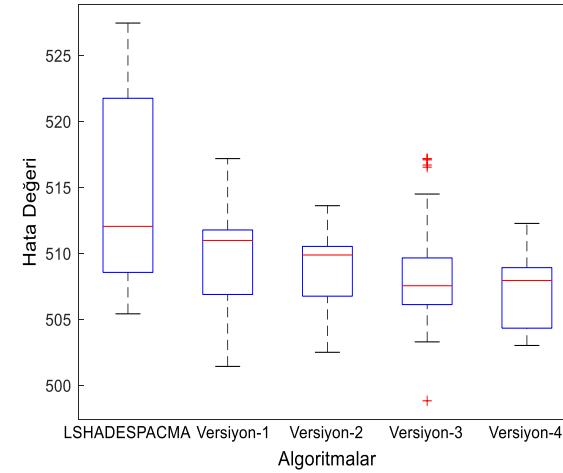
(h) F5 (Hibrit) D = 50



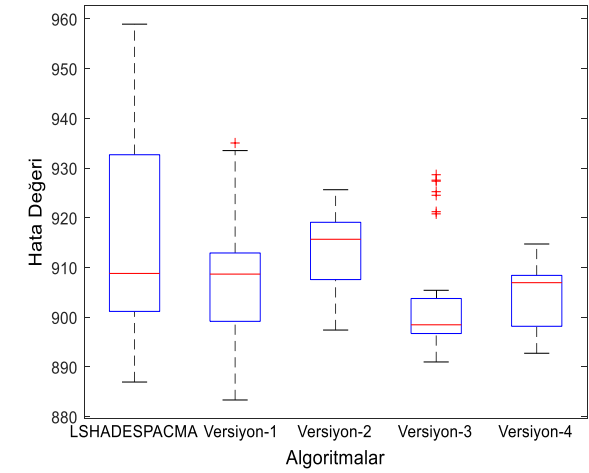
(i) F5 (Hibrit) D = 100



(j) F9 (Birleşik) D = 30



(k) F9 (Birleşik) D = 50



(l) F9 (Birleşik) D = 100

Şekil 4.2. (devam) CEC2020 kıyaslama takımından seçilen problemlerin box-plot grafikleri.

4.2.2. Yakınsama Analizi

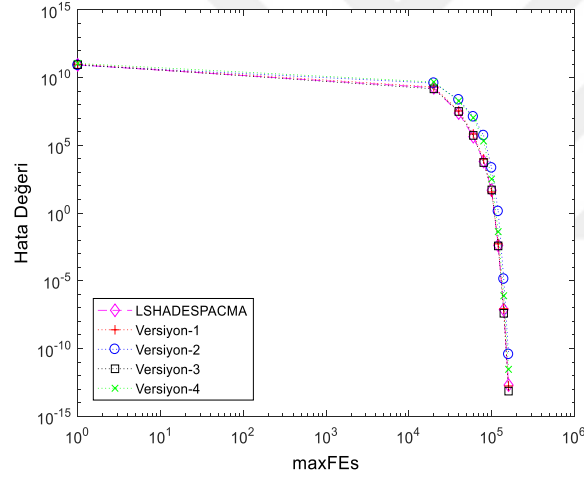
LSHADESPACMA ve FDB versiyonlarının yakınsama performanslarını değerlendirmek için CEC2017 kıyaslama takımından dört farklı problem tipi seçilmiştir. Tek-modlu (F1), çok-modlu (F8), hibrit (F17) ve birleşik (F25) tipi test fonksiyonları için algoritmaların yakınsama grafikleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Şekil 4.3 (a, b, c)'de, tek-modlu (F1) problemi için algoritmaların yakınsama eğrileri verilmiştir. Yakınsama grafikleri incelendiğinde, algoritmaların tamamı tüm boyutlarda minimum değere yakınsamada benzer ve iyi performans göstermişlerdir ve hata değeri yaklaşık olarak 10^{-15} seviyesindedir. Bu durum, LSHADESPACMA ve FDB tabanlı versiyonların, sömürü performanslarının iyi olduğunu göstermektedir.

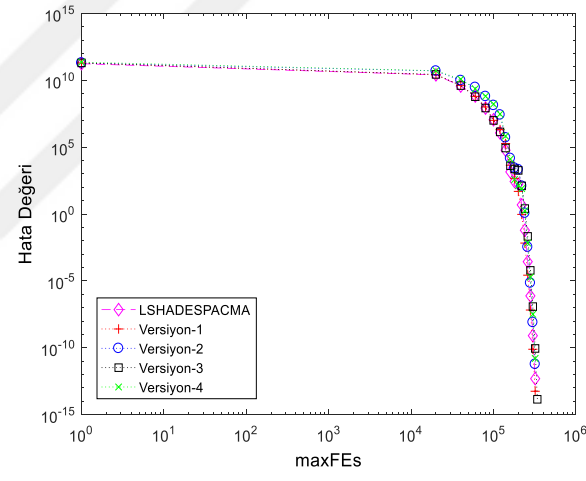
Şekil 4.3 (d, e, f)'de, çok-modlu (F8) problemi için algoritmaların yakınsama eğrileri gösterilmiştir. Boyut=30 için, Versiyon-1, Versiyon-3 ve Versiyon-4 minimum hata değerine 10^{-10} değerinin altında yaklaşmışlardır. Boyut=50 için Versiyon-3, minimum hata değerine 10^{-10} değerinin altında yakınsayan tek algoritmadır. Diğer algoritmaların minimum hata değerine yakınsamada yetersiz oldukları görülmektedir. Boyut=100 için ise, Versiyon-3 rakiplerine kıyasla daha düşük hata değerine yakınsadığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, Versiyon-3 algoritmasının rakiplerine göre tüm boyutlarda minimum hata değerine yakınsamada iyi performans sergilediğini ve keşif yeteneğinin daha iyi olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.3 (g, h, i)'de, hibrit (F17) problemi için algoritmaların yakınsama eğrileri gösterilmiştir. Versiyon-1 ve Versiyon-3 sırasıyla 30 ve 50 boyutta 10^1 ve 10^2 'den daha küçük hata değerine yakınsayan algoritmalarlardır. 100 boyutta ise Versiyon-3 rakiplerine göre daha düşük hata değerine yakınsadığı görülmektedir. Sonuç olarak, tüm boyutlarda Versiyon-1 ve Versiyon-3 algoritmalarının orijinal LSHADESPACMA algoritmasının dengeli arama performansını iyileştirdiğini göstermektedir.

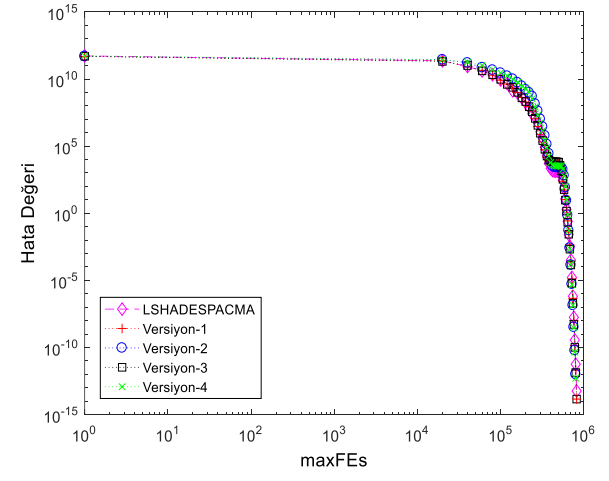
Şekil 4.3 (j, k, l)'de, birleşik (F25) problemi için algoritmaların yakınsama eğrileri verilmiştir. Düşük boyutlu (Boyut=30) problemde, algoritmalar benzer yakınsama performansı göstermişlerdir. Algoritmalar orta (Boyut=50) ve yüksek (Boyut=100) boyutlu problemlerin çözümü sonucunda elde edilen minimum hata değerleri benzerdir. Ancak, Versiyon-1 ve Versiyon-3 bu minimum hata değerlerine daha erken yakınsamışlardır. Bu durum, Versiyon-1 ve Versiyon-3 algoritmalarının sömürü ve keşif görevlerini dengeli bir şekilde gerçekleştirmede başarılı olduklarını göstermektedir.



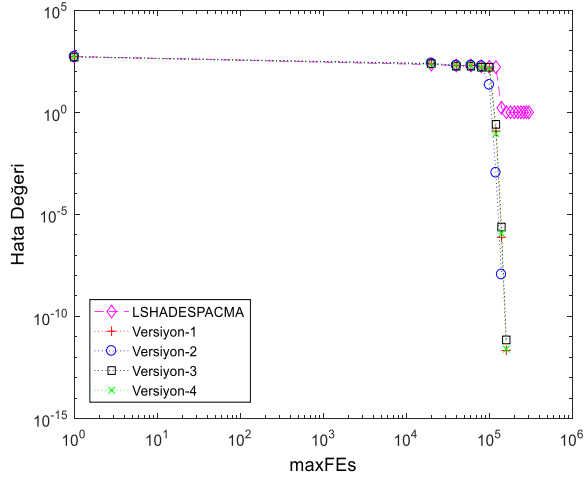
(a) F1 (Tek-modlu) D = 30



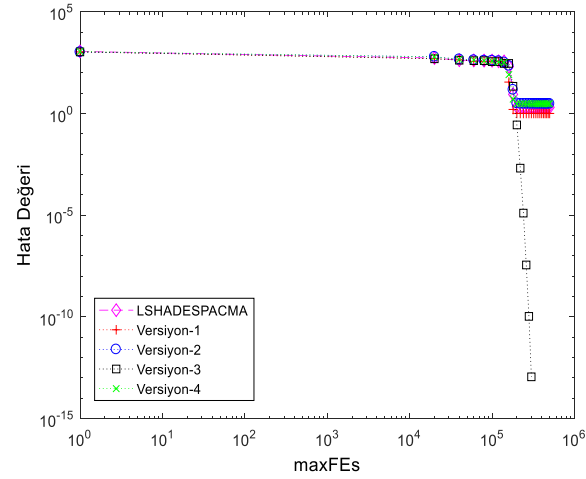
(b) F1 (Tek-modlu) D = 50



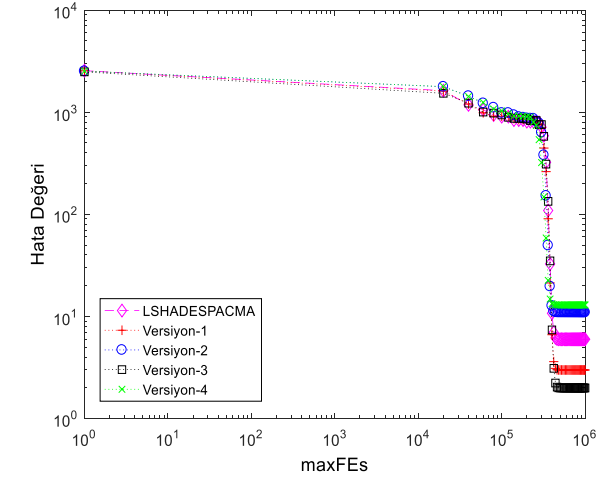
(c) F1 (Tek-modlu) D = 100



(d) F8 (Çok-modlu) D = 30

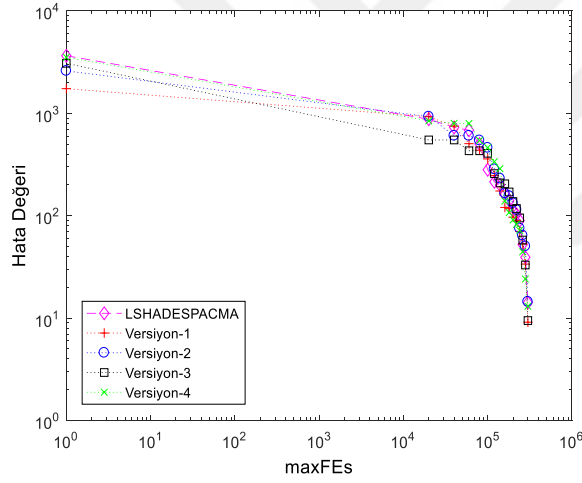


(e) F8 (Çok-modlu) D = 50

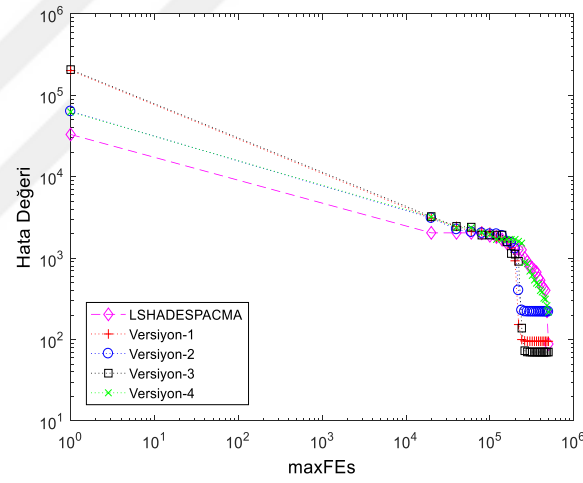


(f) F8 (Çok-modlu) D = 100

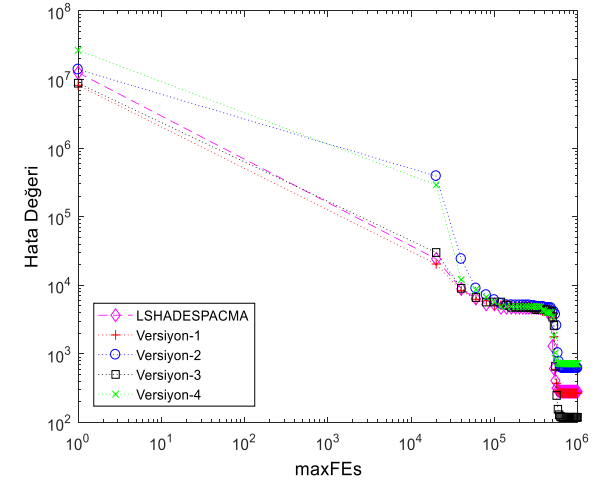
Şekil 4.3. CEC2017 kıyaslama takımından seçilen problem tipleri için yakınsama eğrileri.



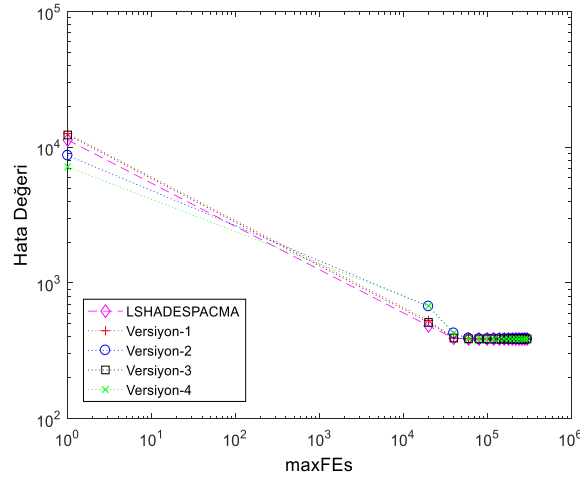
(g) F17 (Hibrit) D = 30



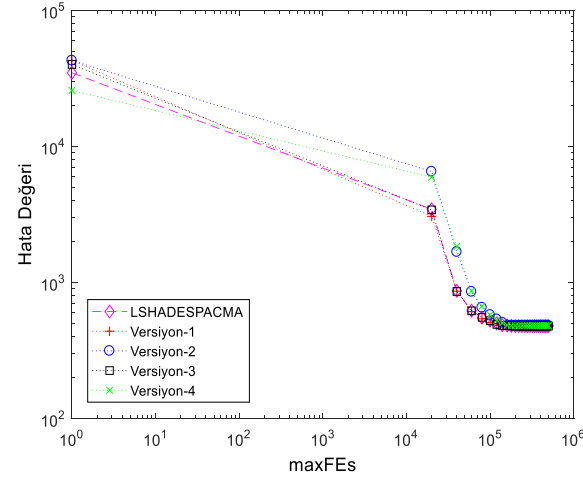
(h) F17 (Hibrit) D = 50



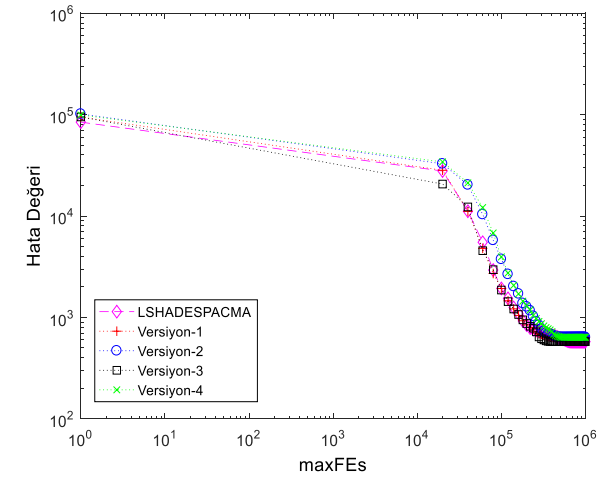
(i) F17 (Hibrit) D = 100



(j) F25 (Birleşik) D = 30



(k) F25 (Birleşik) D = 50



(l) F25 (Birleşik) D = 100

Şekil 4.3. (devam) CEC2017 kıyaslama takımından seçilen problem tipleri için yakınsama eğrileri.

Bu alt bölümde yapılan çalışmaları özetlemek gerekirse, FDB seçim yönteminin LSHADESPACMA algoritmasının sömürü ve keşif performansları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, FDB seçim yönteminin LSHADESPACMA algoritmasının keşif performansını iyileştirdiği görülmektedir. Versiyon-3, FDB versiyonları arasında hem istatistiksel analiz hem de yakınsama analiz sonuçlarına göre en başarılı olanıdır ve takip eden bölümlerde FDB-LSHADESPACMA olarak isimlendirilmiştir.



4.3. FDB-LSHADESPACMA ve MSA ALGORİTMALARININ CEC2017 VE CEC2020 KİYASLAMA PROBLEMLERİNDE TEST EDİLMESİ

Bu alt bölümde, FDB-LSHADESPACMA versiyonlarından en başarılı olarak seçilen Versiyon-3 ve 14 MSA algoritmasının arama performansları incelenmiştir. FDB-LSHADESPACMA dahil olmak üzere 15 MSA algoritmasının CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri kullanılarak performansları, istatistiksel analiz yöntemleri ve yakınsama analizi ile detaylı olarak incelenmiştir. Takip eden alt bölümlerde, sırasıyla MSA algoritmalarının istatistiksel analizi ve yakınsama analizi sunulmuştur.

4.3.1. İstatistiksel Analiz

İstatistiksel analiz için FDB-LSHADESPACMA ve 14 MSA algoritması kullanılarak, CEC kıyaslama takımlarında bulunan 39 test problemi, her bir problem için 51 bağımsız deneme ve 3 farklı boyut ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen 89.505 (39x3x51x15) veri kullanılmıştır. CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama takımları ve 3 farklı arama uzayı (30/50/100) ile altı farklı deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlara göre 15 MSA algoritmasının Friedman sıralamaları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Friedman puanları, her bir deneyde algoritmalar tarafından elde edilen hata değerleri kullanılarak hesaplanmış olup, en iyi puan değerleri koyu renk ile işaretlenmiştir.

Çizelge 4.6. FDB-LSHADESPACMA ve rakip MSA algoritmaları için Friedman testi ile elde edilen sıralama sonuçları.

Algoritma	Boyut = 30		Boyut = 50		Boyut = 100		Ortalama Sıra
	CEC2017	CEC2020	CEC2017	CEC2020	CEC2017	CEC2020	
FDB-LSHADESPACMA	2,1846	2,6333	1,8516	2,3618	1,8597	2,5990	2,2483
LSHADESPACMA	2,7989	3,0725	2,4915	3,1559	2,3918	3,3931	2,8840
LSHADE	2,7610	3,3088	3,0984	3,5137	3,3458	3,7529	3,2968
GSA	7,9479	7,9980	6,9297	6,4686	6,9628	5,5078	6,9692
AGDE	5,6613	6,6186	6,4047	7,7500	7,0297	8,9529	7,0695
AEFA	8,5051	7,9137	7,7218	7,1539	6,6521	6,3137	7,3767
MPA	7,1508	6,7059	8,3029	7,2294	8,8229	8,3529	7,7608
COA	8,2853	7,9804	8,2431	7,5294	7,5321	7,5529	7,8539
EO	8,9310	8,5039	9,2792	8,5725	8,3448	8,1314	8,6272
SDO	8,8222	8,1098	9,4557	8,6922	9,0656	8,7824	8,8213
AEO	8,5051	9,3216	10,8134	9,2294	10,0980	8,8706	9,4730
SSA	11,2522	10,9882	10,9919	10,1471	9,9121	9,2863	10,4296
BMO	12,0920	11,3235	8,2431	11,9471	12,2096	11,7353	11,2584
GA	10,8891	11,3765	11,6437	12,1882	11,4375	12,8118	11,7245
MFO	14,2137	14,1451	14,5294	14,0608	14,3354	13,9569	14,2069

Çizelge 4.6’da verilen algoritmaların Friedman sıralamaları değerlendirildiğinde, FDB-LSHADESPACMA algoritması hem CEC 2017 hem de CEC2020 kıyaslama takımında gerçekleştirilen deneylerde en iyi puanı elde ederek rakiplerine üstünlük sağlamıştır. Algoritmaların ortalama sıralama sonuçları ise Çizelge 4.6’nın son sütununda verilmiştir. Ortalama sıralama değeri, altı deneyden elde edilen algoritma sıraları kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm MSA algoritmaları arasında FDB-LSHADESPACMA, LSHADESPACMA, LSHADE, GSA ve AGDE algoritmaları sırasıyla en iyi sıralama puanına sahip ilk beş algoritma olmuştur.

FDB-LSHADESPACMA ile 14 MSA algoritması arasında ikili karşılaştırma yapmak için Wilcoxon işaret testi kullanılmıştır. Çizelge 4.7’de, FDB-LSHADESPACMA ve en başarılı olan dört rakip MSA algoritması arasındaki Wilcoxon ikili işaret testi sonuçları verilmiştir. Her bir hücrede verilen puanlar (+/=/-) sırasıyla FDB-LSHADESPACMA algoritmasının ilgili MSA algoritmasından üstün olduğu, eşit performans sergilediği ve mağlup olduğu test problemlerinin sayısını göstermektedir. Bir örnekle açıklamak gerekirse, birinci hücrede FDB-LSHADESPACMA ve LSHADESPACMA arasında yapılan karşılaştırmada elde edilen (23/6/0) skoruna göre, FDB-LSHADESPACMA yirmi dokuz problemin yirmi üçünde LSHADESPACMA’ dan iyi ve altı problemde benzer sonuç göstermiştir.

Çizelge 4.7. FDB-LSHADESPACMA ve rakip MSA algoritmaları arasında Wilcoxon ikili karşılaştırma sonuçları.

vs. FDB- LSHADESPACMA +/=/-	Boyut=30		Boyut=50		Boyut=100	
	CEC2017	CEC2020	CEC2017	CEC2020	CEC2017	CEC2020
LSHADESPACMA	23/6/0	8/2/0	26/3/0	8/2/0	25/4/0	10/0/0
LSHADE	15/11/3	5/4/1	26/1/1	9/1/0	27/1/1	7/3/0
GSA	27/0/2	9/0/91	26/0/3	8/0/2	21/0/8	7/0/3
AGDE	26/2/1	10/0/0	27/2/0	10/0/0	28/1/0	10/0/0

Çizelge 4.7’de verilen sonuçlara göre, CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemlerinde tüm boyutlar için yapılan karşılaştırmalarda, FDB-LSHADESPACMA rakip algoritmalara üstünlük göstermiştir. CEC2020 kıyaslama problemlerinin 30/50/100 boyutta gerçekleşen deneylerinde, FDB-LSHADESPACMA on problemin tamamında AGDE algoritmasını geçerek ezici üstünlük sağlamıştır. Ayrıca, LSHASPCMA algoritması da CEC2020 kıyaslama problemlerinin 100 boyutta gerçekleşen deneylerinde on problemin tamamında FDB-LSHADESPACMA algoritmasına yenilmiştir.

FDB-LSHADESPACMA ve rekabetçi MSA algoritmalarının keşif ve sömürü performansını incelemek amacıyla CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama takımındaki farklı problem tiplerindeki Friedman puanları hesaplanmıştır. Buna göre, tek-modlu, çok-modlu, hibrit ve birleşik problem tipleri için üç farklı boyut kullanılarak toplam yirmi dört deneysel çalışma gerçekleştirilmiş olup, Friedman sıralama sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir. Her bir deney için en iyi Friedman skoruna sahip veri koyu renk ile işaretlenmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı problem tipleri için FDB-LSHADESPACMA ve rakip MSA algoritmaları arasında Friedman sıralama sonuçları.

	Problem Tipi	Arama Uzayı	FDB-LSHADESPACMA	LSHADESPACMA	LSHADE	GSA	AGDE
CEC 2017	Tek-modlu	Boyut = 30	2,2190	2,2190	2,2843	4,8824	3,3954
		Boyut = 50	1,6046	1,6438	2,7516	4,8954	4,1046
		Boyut = 100	1,4150	1,6242	3,1895	4,2941	4,4771
	Çok-modlu	Boyut = 30	1,6454	2,0948	2,9314	3,9771	4,3513
		Boyut = 50	1,6291	2,1307	3,0507	3,6438	4,5458
		Boyut = 100	1,8660	2,2516	3,1863	3,3824	4,3137
	Hibrit	Boyut = 30	1,7618	2,5049	2,2353	4,9667	3,5314
		Boyut = 50	1,5441	2,1735	2,6353	4,7216	3,9255
		Boyut = 100	1,5686	2,1392	3,2804	3,7412	4,2706
	Birleşik	Boyut = 30	2,1245	2,5520	2,2961	3,8882	4,1392
		Boyut = 50	1,9608	2,5588	2,6304	3,5196	4,3304
		Boyut = 100	1,8490	2,3549	2,7588	3,5569	4,4804
CEC 2020	Tek-modlu	Boyut = 30	2,0784	2,0784	2,1078	5,0000	3,7353
		Boyut = 50	1,5000	1,5000	3,0000	4,9216	4,0784
		Boyut = 100	1,3627	1,6373	3,0000	4,5882	4,4118
	Çok-modlu	Boyut = 30	1,6340	2,1438	2,6601	3,8497	4,7124
		Boyut = 50	1,7124	2,4510	2,6601	3,1830	4,9935
		Boyut = 100	1,9412	2,5948	2,4641	3,0000	5,0000
	Hibrit	Boyut = 30	1,8366	2,4641	2,4052	4,9477	3,3464
		Boyut = 50	1,6144	2,3072	2,3399	4,9150	3,8235
		Boyut = 100	1,4837	2,1830	2,5033	4,6078	4,2222
	Birleşik	Boyut = 30	2,2680	2,5425	2,6340	3,4967	4,0588
		Boyut = 50	1,9477	2,6863	3,0752	2,9085	4,3824
		Boyut = 100	2,0523	2,7974	3,3791	2,3268	4,4444

Çizelge 4.8’de verilen sonuçlara göre, tek-modlu problemlerde 30 boyutta CEC2017 kıyaslama problemlerinde ve 30/50 boyutta CEC2020 kıyaslama problemlerinde gerçekleştirilen deneylerde, FDB-LSHADESPACMA ve LSHADESPACMA

algoritmaları benzer sonuç elde etmiştir. 100 boyutta gerçekleştirilen deneylerde ise, FDB-LSHADESPACMA birinci sırada yer almıştır. Bu durum, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının sömürü yeteneğinin rakip algoritmalarından daha iyi olduğunu göstermektedir. Çok-modlu problemler için gerçekleştirilen deney sonuçları, FDB-LSHADESPACMA rakip algoritmalarla tüm deneylerde üstünlük sağladığını ve rakip algoritmalarla göre üstün bir keşif performansı sergilediğini göstermektedir. Hibrit ve birleşik tip problemler algoritmaların keşif ve sömürü arasındaki dengeyi göstermek için kullanılır. Bu problemler için elde edilen sonuçlar, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının rakiplerine göre daha dengeli bir arama performansı gerçekleştirmiştir.

Çizelge 4.9’da CEC2020 kıyaslama takımındaki test problemlerinden elde edilen hata değerlerinin tüm boyutlar için ortalama ve standart sapma istatistiklerini sunar. Çizelge 4.9’daki her bir hücrede sırasıyla ortalama ve standart sapma değerleri verilmiştir. Her bir test fonksiyonu için ilgili boyutta elde edilen en iyi değer koyu renk ile işaretlenmiştir. Çizelge 4.9 incelendiğinde, tek-modlu problem (F1) için FDB-LSHADESPACMA ve LSHADESPACMA algoritmalarının 30 ve 50 boyutlar için benzer ortalama hata değeri elde ettiği görülmektedir. Çok-modlu problemler (F2, F3, F4) için gerçekleştirilen dokuz deneyden yedisinde FDB-LSHADESPACMA en iyi minimum hata değerini elde etmiştir. Hibrit tip problemler (F5, F6, F7) için gerçekleştirilen dokuz deneyden yedisinde FDB-LSHADESPACMA en iyi minimum hata değerini elde ederek rakiplerini geçmiştir. Birleşik tip problemlerden F8 için 30 boyutta elde edilen sonuçlarda, FDB-LSHADESPACMA, LSHADESPACMA, LSHADE ve GSA algoritmaları optimum çözüme yakınsamada benzer ortalama hata sonuçları elde etmiştir. F8 problemi için 50 ve 100 boyutta, ve F9 problemi için tüm boyutlarda GSA algoritması rakiplerine üstünlük sağlamıştır. F10 problemi için ise FDB-LSHADESPACMA algoritması tüm boyutlarda rakiplerine göre minimum ortalama hata değerini elde etmiştir. Özetlemek gerekirse, FDB-LSHADESPACMA algoritması rakiplerine göre, otuz deney çalışmasından on dokuzunda en iyi, üçünde benzer ve sekizinde daha kötü ortalama hata değeri elde etmiştir.

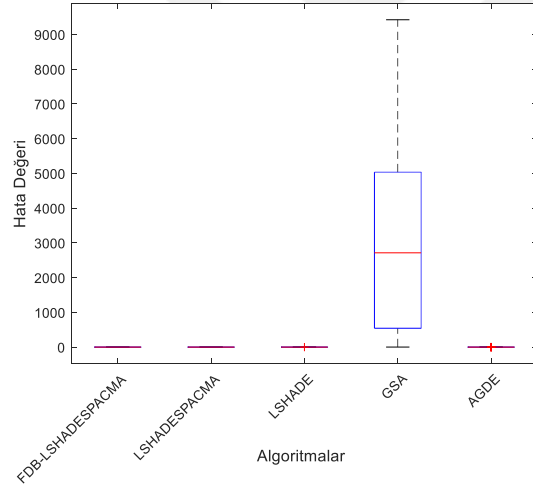
Çizelge 4.9. CEC 2020 test problemleri için elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri.

Fonksiyon	Arama Uzayı	FDB-LSHADESPACMA	LSHADESPACMA	LSHADE	GSA	AGDE
F1	Boyut = 30	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	2,79E-16 (1,99E-15)	1,69E+03 (2,15E+03)	1,27E-13 (3,17E-13)
	Boyut = 50	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	1,76E-14 (6,09E-15)	4,48E+03 (3,82E+03)	4,14E+02 (1,02E+03)
	Boyut = 100	1,95E-15 (4,94E-15)	5,85E-15 (7,06E-15)	1,31E-12 (2,27E-12)	6,57E+03 (5,19E+03)	6,30E+03 (8,19E+03)
F2	Boyut = 30	1,15E+03 (2,25E+02)	1,27E+03 (2,14E+02)	1,29E+03 (1,75E+02)	1,35E+03 (3,06E+02)	4,69E+03 (1,58E+03)
	Boyut = 50	3,19E+03 (3,42E+02)	3,60E+03 (2,87E+02)	3,48E+03 (2,78E+02)	2,81E+03 (5,30E+02)	1,10E+04 (4,77E+02)
	Boyut = 100	1,07E+04 (8,41E+02)	1,15E+04 (9,60E+02)	1,06E+04 (4,91E+02)	6,00E+03 (7,19E+02)	2,67E+04 (9,69E+02)
F3	Boyut = 30	3,32E+01 (8,20E-01)	3,39E+01 (1,03E+00)	3,75E+01 (1,10E+00)	4,69E+01 (4,12E+00)	8,61E+01 (1,67E+01)
	Boyut = 50	5,61E+01 (6,68E-01)	5,65E+01 (7,16E-01)	6,29E+01 (2,02E+00)	8,61E+01 (6,01E+00)	2,36E+02 (5,16E+01)
	Boyut = 100	1,10E+02 (1,05E+00)	1,12E+02 (1,58E+00)	1,41E+02 (3,92E+00)	2,04E+02 (1,55E+01)	9,94E+02 (1,42E+02)
F4	Boyut = 30	1,09E+00 (1,11E-01)	1,17E+00 (1,32E-01)	1,19E+00 (1,03E-01)	4,53E+00 (7,57E-01)	3,99E+00 (1,32E+00)
	Boyut = 50	2,41E+00 (1,79E-01)	2,68E+00 (4,11E-01)	2,50E+00 (1,69E-01)	7,26E+00 (1,06E+00)	1,43E+01 (4,52E+00)
	Boyut = 100	7,32E+00 (3,10E-01)	7,62E+00 (3,36E-01)	7,27E+00 (2,98E-01)	1,47E+01 (1,78E+00)	9,34E+01 (3,53E+01)
F5	Boyut = 30	1,85E+02 (1,12E+02)	3,07E+02 (1,63E+02)	2,09E+02 (1,16E+02)	1,33E+05 (1,11E+05)	4,86E+03 (2,18E+04)
	Boyut = 50	4,69E+02 (1,97E+02)	5,80E+02 (3,14E+02)	1,45E+03 (3,67E+02)	1,04E+05 (1,50E+05)	1,12E+04 (7,14E+03)
	Boyut = 100	2,37E+03 (4,84E+02)	2,95E+03 (5,36E+02)	4,45E+03 (8,13E+02)	4,23E+05 (1,57E+05)	1,26E+05 (4,98E+04)
F6	Boyut = 30	3,39E+01 (1,89E+01)	4,54E+01 (2,09E+01)	6,08E+01 (1,07E+01)	6,33E+02 (2,84E+02)	9,82E+01 (8,93E+01)
	Boyut = 50	1,22E+02 (1,25E+02)	3,35E+02 (2,88E+02)	1,56E+02 (4,47E+01)	6,77E+02 (1,98E+02)	3,91E+02 (2,37E+02)
	Boyut = 100	9,89E+02 (3,56E+02)	1,38E+03 (4,37E+02)	9,54E+02 (1,76E+02)	1,85E+03 (4,93E+02)	2,43E+03 (4,70E+02)
F7	Boyut = 30	7,76E+01 (6,61E+01)	1,08E+02 (8,22E+01)	6,82E+01 (6,85E+01)	1,44E+05 (1,01E+05)	4,92E+02 (6,56E+02)
	Boyut = 50	3,59E+02 (1,37E+02)	5,80E+02 (2,00E+02)	4,87E+02 (1,12E+02)	1,37E+05 (7,43E+04)	8,53E+03 (8,04E+03)
	Boyut = 100	9,54E+02 (3,87E+02)	1,36E+03 (4,17E+02)	2,20E+03 (5,53E+02)	2,37E+05 (2,39E+05)	6,48E+04 (2,82E+04)

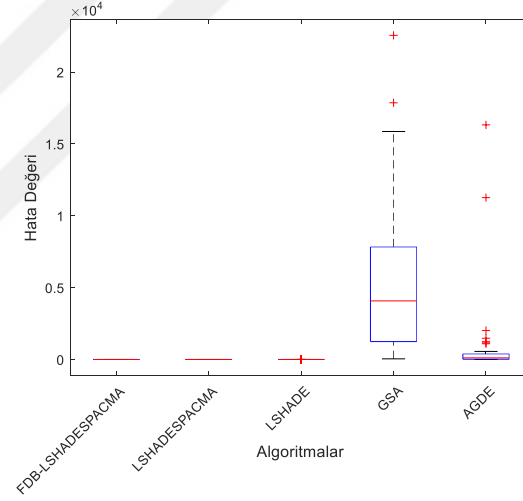
Çizelge 4.9. (devam) CEC 2020 test problemleri için elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri.

Fonksiyon	Arama Uzayı	FDB-LSHADESPACMA	LSHADESPACMA	LSHADE	GSA	AGDE
F8	Boyut = 30	1,00E+02 (0,00E+00)	1,00E+02 (0,00E+00)	1,00E+02 (0,00E+00)	1,00E+02 (4,02E-08)	1,01E+02 (1,78E+00)
	Boyut = 50	5,64E+02 (1,17E+03)	1,30E+03 (1,81E+03)	2,08E+03 (1,80E+03)	1,00E+02 (8,51E-08)	7,52E+03 (4,42E+03)
	Boyut = 100	9,18E+03 (8,08E+02)	9,93E+03 (1,06E+03)	1,11E+04 (5,57E+02)	1,00E+02 (8,03E-08)	2,61E+04 (4,77E+03)
F9	Boyut = 30	4,27E+02 (2,65E+00)	4,29E+02 (3,07E+00)	4,26E+02 (1,69E+00)	3,89E+02 (3,57E+01)	4,72E+02 (1,29E+01)
	Boyut = 50	5,08E+02 (3,89E+00)	5,15E+02 (7,20E+00)	5,07E+02 (3,24E+00)	4,61E+02 (5,86E+01)	6,39E+02 (3,05E+01)
	Boyut = 100	9,03E+02 (9,90E+00)	9,17E+02 (2,01E+01)	9,08E+02 (6,94E+00)	4,25E+02 (1,78E+02)	1,53E+03 (1,20E+02)
F10	Boyut = 30	3,87E+02 (5,18E-03)	3,87E+02 (8,09E-03)	3,87E+02 (1,93E-02)	3,93E+02 (1,04E+01)	3,89E+02 (5,91E+00)
	Boyut = 50	4,80E+02 (8,66E-01)	4,81E+02 (3,15E+00)	4,82E+02 (4,02E+00)	5,63E+02 (4,03E+01)	5,31E+02 (4,43E+01)
	Boyut = 100	6,68E+02 (3,30E+01)	6,96E+02 (4,46E+01)	7,45E+02 (2,94E+01)	9,22E+02 (6,44E+01)	7,70E+02 (7,08E+01)

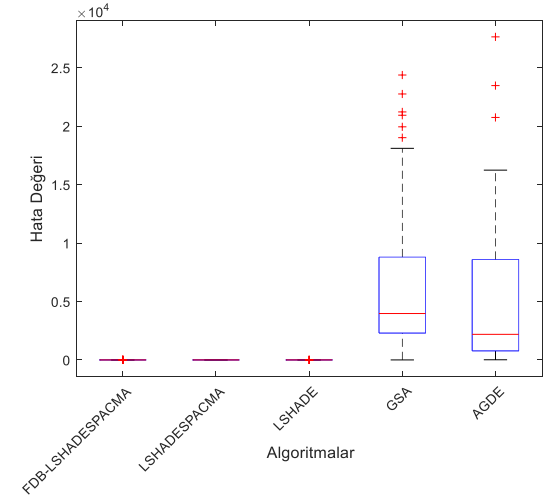
Algoritmaların keşif ve sömürü yeteneklerinin analiz edilebilmesi için box-plot grafiklerinin çizdirilmesi önemlidir. CEC 2017 kıyaslama takımlarından seçilen tek-modlu (F1), çok-modlu (F5), hibrit (F16) ve birleşik (F27) tip test problemleri için box-plot grafikleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. F1 tek-modlu problem tipi için box-plot grafiklerine göre, 30 boyutta FDB-LSHADESPACMA, LSHADESPACMA, LSHADE ve AGDE algoritmaları global optimum çözüme istikrarlı bir şekilde yakınsamıştır. Ancak, boyut arttıkça AGDE algoritmasının yakınsama performansı kötüleşmiştir. F5 çok-modlu problem tipinde, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının arama performansının rakiplerine göre daha iyi olduğu görülmektedir. F16 hibrit problem tipinde, FDB-LSHADESPACMA keşif ve sömürü dengesinin sağlanmasında rakiplerine göre daha başarılı olmuştur. F27 birleşik problem tipinde ise, FDB-LSHADESPACMA tüm boyutlarda istikrarlı yakınsama performansı göstermiştir ve keşif ve sömürü dengesinin sağlanmasında başarılı olmuştur.



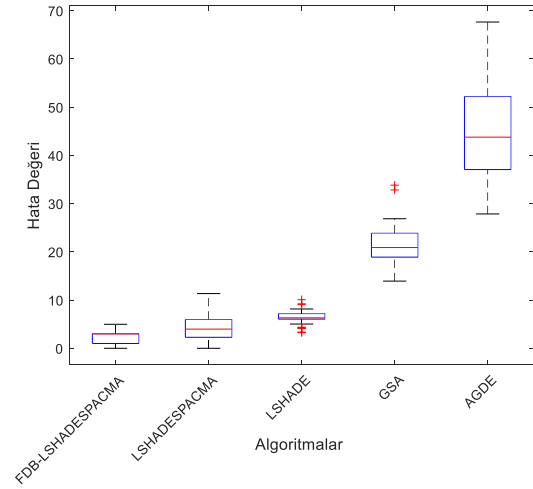
(a) F1 (Tek-modlu) D = 30



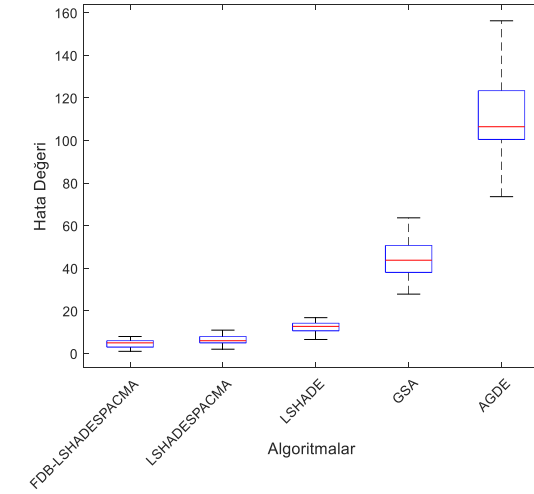
(b) F1 (Tek-modlu) D = 50



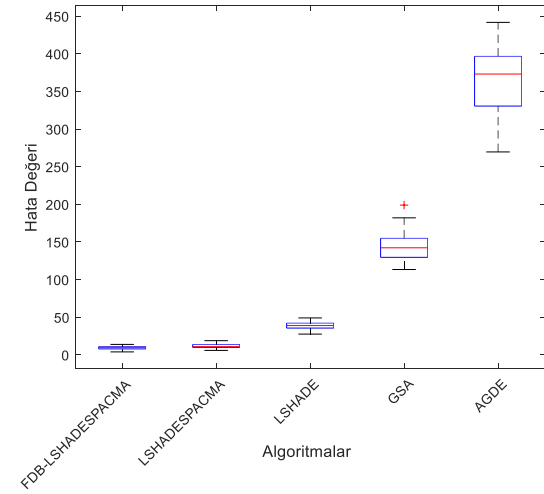
(c) F1 (Tek-modlu) D = 100



(d) F5 (Çok-modlu) D = 30

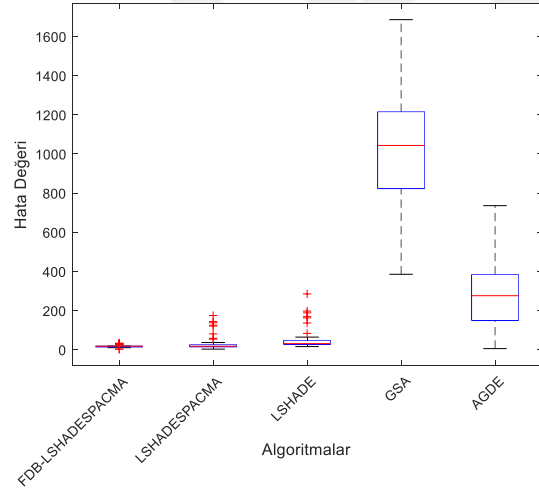


(e) F5 (Çok-modlu) D = 50

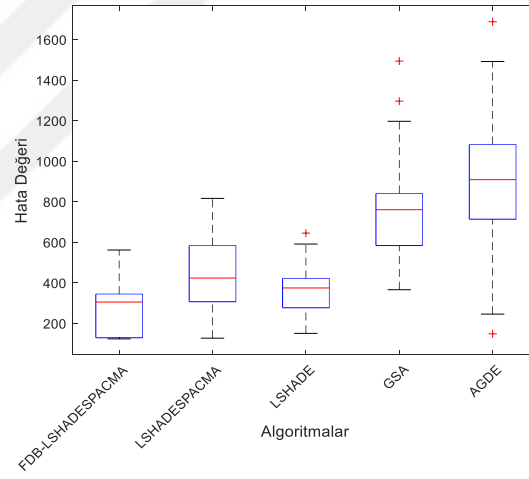


(f) F5 (Çok-modlu) D = 100

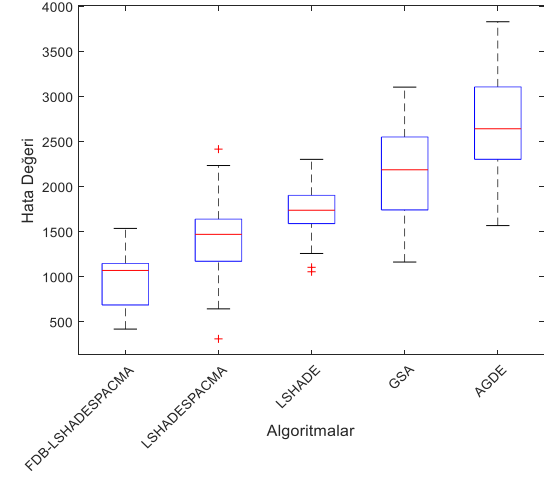
Şekil 4.4. CEC2017 kıyaslama takımından seçilen problem tipleri için box-plot grafikleri.



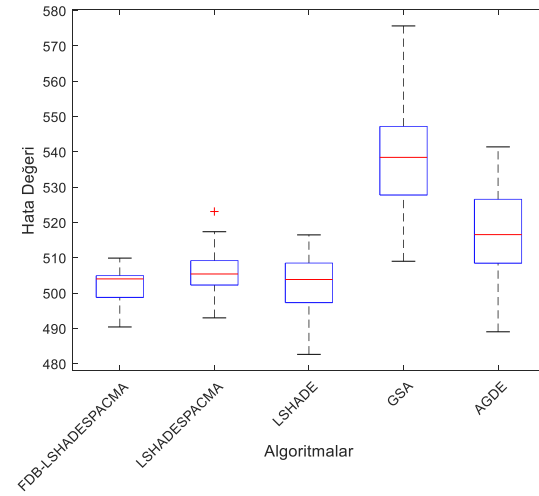
(g) F16 (Hibrit) D = 30



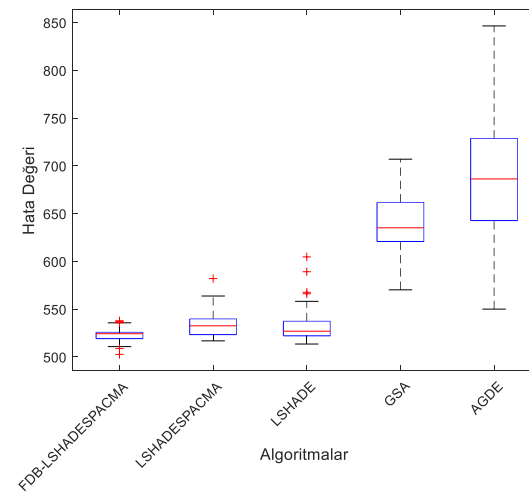
(h) F16 (Hibrit) D = 50



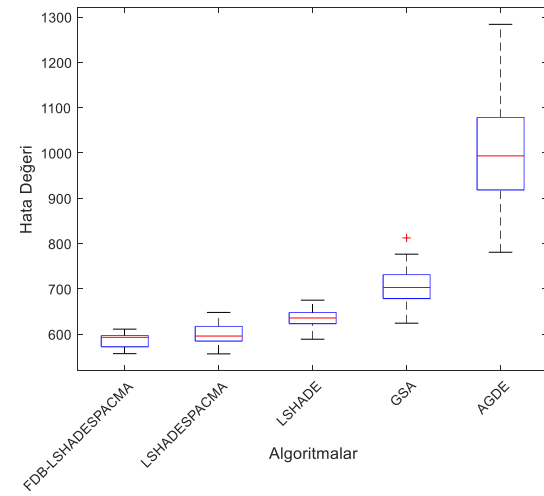
(i) F16 (Hibrit) D = 100



(j) F27 (Birleşik) D = 30



(k) F27 (Birleşik) D = 50



(l) F27 (Birleşik) D = 100

Şekil 4.4. (devam) CEC2017 kıyaslama takımından seçilen problem tipleri için box-plot grafikleri.

4.3.2. Yakınsama Analizi

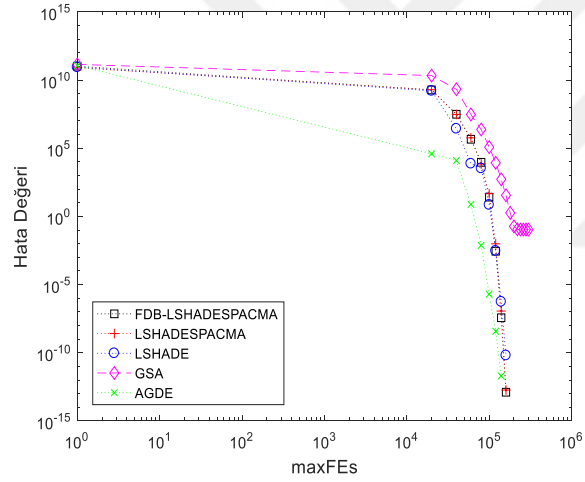
Bu alt bölümde, FDB-LSHADESPACMA, LSHADESPACMA, LSHADE, GSA ve AGDE algoritmalarının yakınsama performansları incelenmiştir. CEC 2020 kıyaslama takımlarından seçilen tek-modlu (F1), çok-modlu (F4), hibrit (F5) ve birleşik (F10) tip test problemleri için 30/50/100 boyutta çizdirilen yakınsama grafikleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Şekil 4.5 (a, b, c)'de F1 problem tipi için algoritmaların yakınsama eğrileri gösterilmiştir. 30 boyutta FDB-LSHADESPACMA, LSHADESPACMA, LSHADE ve AGDE algoritmalarından elde edilen hata değeri 10^{-15} 'e kadar düşmüştür. 50 ve 100 boyutta elde edilen hata değerlerine göre ise, FDB-LSHADESPACMA, LSHADESPACMA ve LSHADE algoritmaları benzer yakınsama performansı sergilemişlerdir ve hata değeri 10^{-15} 'e kadar düşmüştür.

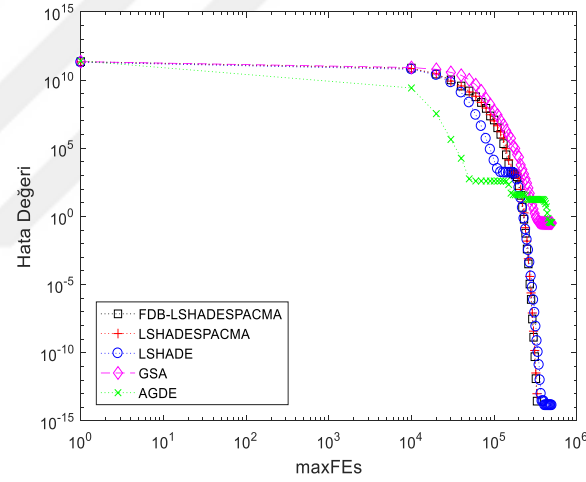
Şekil 4.5 (d, e, f)'de F4 problem tipi için algoritmaların yakınsama eğrileri gösterilmiştir. 30 boyutta algoritmalarından elde edilen hata değeri 10^0 değerinin altında olan sadece FDB-LSHADESPACMA algoritmasıdır. 50 boyutta algoritmalarından elde edilen hata değeri, FDB-LSHADESPACMA, LSHADESPACMA ve LSHADE algoritmaları için 10^1 değerinin altına düşmüştür. 100 boyutta gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre ise, FDB-LSHADESPACMA, LSHADESPACMA ve LSHADE algoritmaları benzer yakınsama performansı sergilemişlerdir.

Şekil 4.5 (g, h, i)'de F5 problem tipi için algoritmaların yakınsama eğrileri verilmiştir. Buna göre, 30 boyutta FDB-LSHADESPACMA algoritmasından elde edilen hata değeri 10^2 'nin altına düşmüştür. 50 boyutta, FDB-LSHADESPACMA algoritmasından elde edilen hata değeri 10^2 değeri seviyesindedir. 100 boyutta ise en iyi yakınsama performansını FDB-LSHADESPACMA göstermiştir. Bu sonuçlar, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının başarılı bir şekilde keşif ve sömürü dengesini sağladığını göstermektedir.

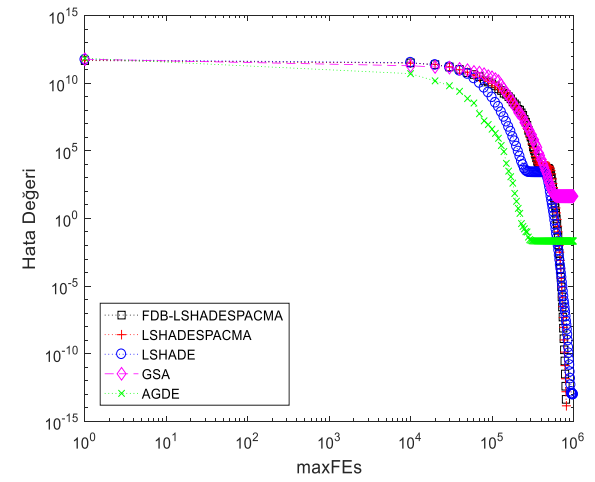
Şekil 4.5 (j, k, l)'de F10 problem tipi algoritmaların yakınsama eğrileri verilmiştir. 30 ve 50 boyutta tüm algoritmalar benzer hata değerine yakınsamışlardır. Ancak, 100 boyutlu problemde, FDB-LSHADESPACMA rakiplerine göre daha iyi bir yakınsama performansı göstermiştir.



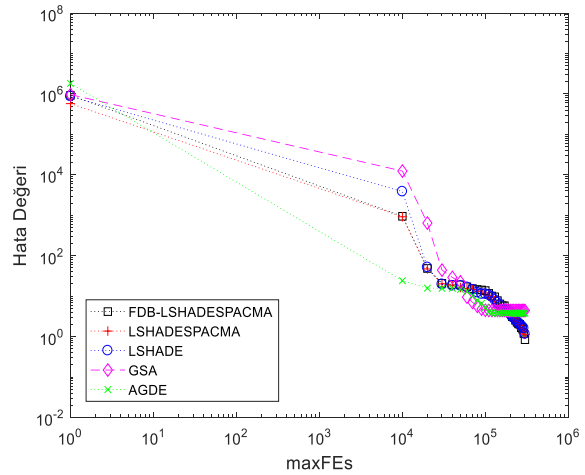
(a) F1 (Tek-modlu) D = 30



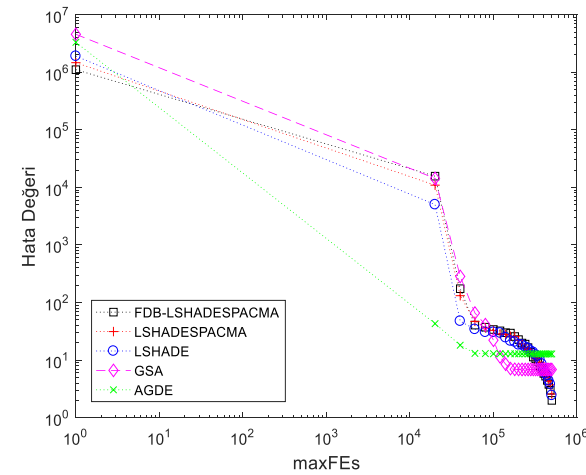
(b) F1 (Tek-modlu) D = 50



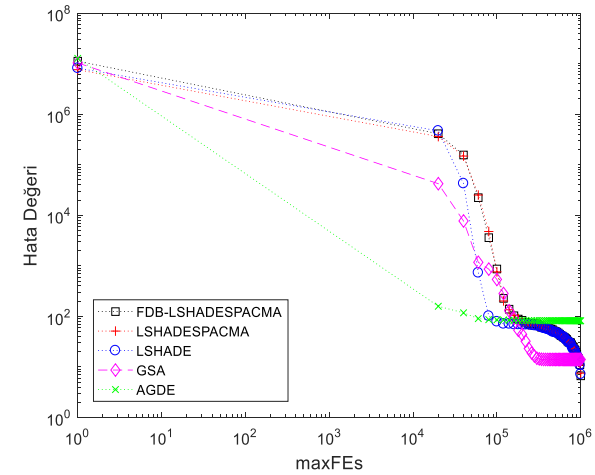
(c) F1 (Tek-modlu) D = 100



(d) F4 (Çok-modlu) D = 30

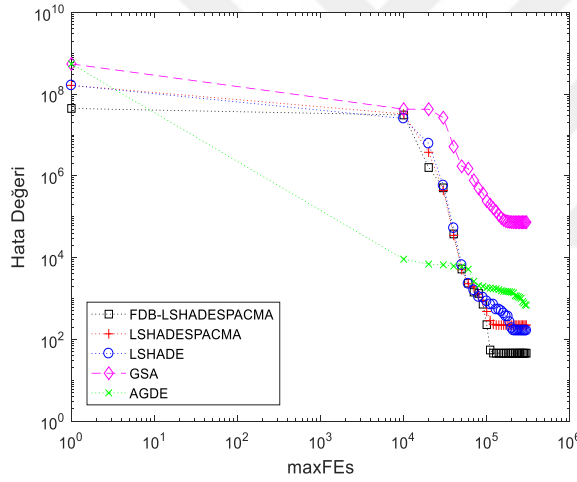


(e) F4 (Çok-modlu) D = 50

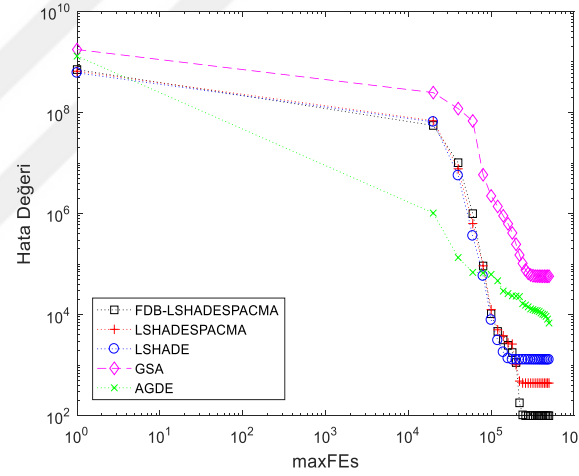


(f) F4 (Çok-modlu) D = 100

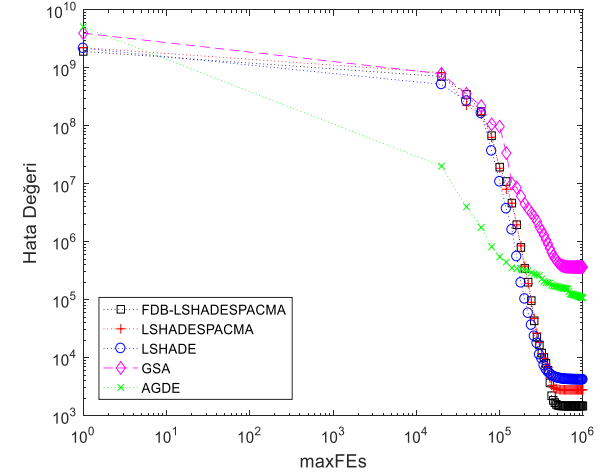
Şekil 4.5. CEC2020 kıyaslama takımından seçilen problem tipleri için yakınsama eğrileri.



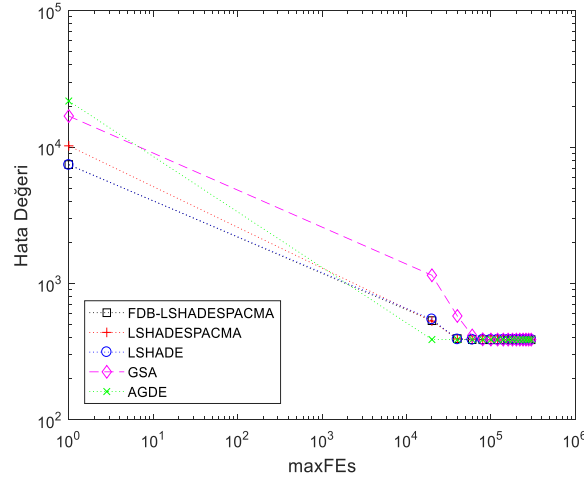
(g) F5 (Hibrit) D = 30



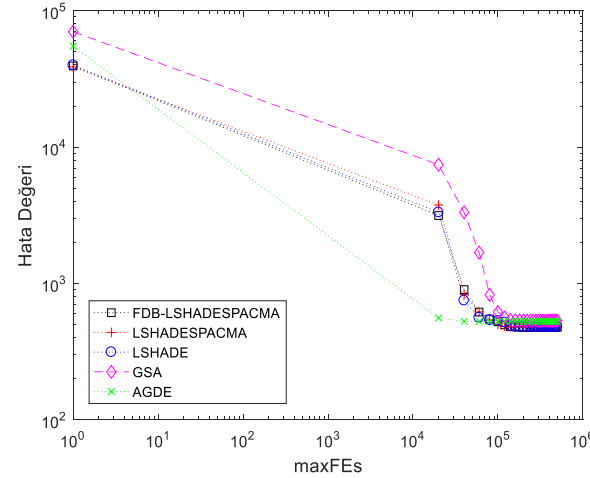
(h) F5 (Hibrit) = 50



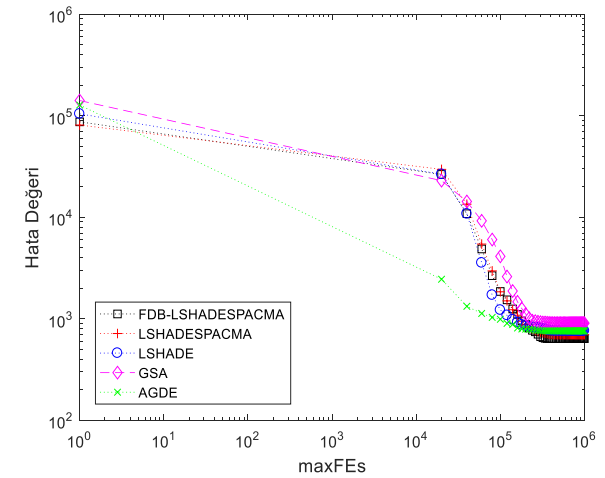
(i) F5 (Hibrit) D = 100



(j) F10 (Birleşik) D = 30



(k) F10 (Birleşik) D = 50



(l) F10 (Birleşik) D = 100

Şekil 4.5. (devam) CEC2020 kıyaslama takımından seçilen problem tipleri için yakınsama eğrileri.

4.4. FDB-LSHADESPACMA ve MSA ALGORİTMALARININ ENERJİ HUB OPTİMİZASYON PROBLEMLERİ İÇİN SİMÜLASYON SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMALARI

Bu alt bölümde, “Bölüm 2.4. Amaç Fonksiyonları” bölümünde yer alan amaç fonksiyonlarının simülasyon sonuçları sunulmuştur. Simülasyon çalışmalarında kullanılmak için “Bölüm 2.1. Enerji Hubın Matematiksel Modeli” bölümünde yer alan 69 enerji hub yapısı kullanılarak, IEEE 14-, 30-, 57- ve 118-baralı test sistemlerinde bulunan generatör sayılarına göre dört farklı test sistemi oluşturulmuştur. Oluşturulan test sistemleri Çizelge 4.10’da verilmiştir. Çizelge 4.10’da, oluşturulan test sistemlerinde hangi hub yapılarının kullanıldığı bilgisi verilmiştir. Burada verilen hub modellerinin numaraları, “Bölüm 2.1. Enerji Hubın Matematiksel Modeli” bölümünde verilen hub modellerine aittir. Ayrıca, test sistemlerinden elde edilmesi istenen elektrik (e), ısı (h), soğutma (c) ve basınçlı hava (a) ile ilgili çıkış değerleri ve her bir test sisteminin boyut değerleri de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Enerji hub test sistemleri.

Test Sistemleri	Enerji Hub Yapıları	Boyut	Talep Değerleri (p,u,)			
			e	h	c	a
Test Sistemi-1	1, 9, 44, 45, 65	20	3,5	3,5	0,5	0,9
Test Sistemi-2	1, 23, 29, 42, 49, 50	24	5,0	4,5	0,6	1,0
Test Sistemi-3	1, 12, 19, 26, 32, 55, 59	26	6,0	5,0	1,0	1,5
Test Sistemi-4	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 46, 47, 48, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 69	223	35,0	20,0	3,0	5,0

Çizelge 4.10’a göre, Test Sistemi-1, Test Sistemi-2, Test Sistemi-3 ve Test Sistemi-4’te, sırasıyla IEEE 14-, 30-, 57- ve 118-baralı test sistemlerinde bulunan generatör 5, 6, 7 ve 54 generatör sayısı ile orantılı olarak hub yapıları bulunmaktadır. Bütün test sistemlerinde 1 numaralı hub yapısı ortak olarak bulunmaktadır. 1 numaralı hub yapısında sadece transformatör bulunmakta olup, IEEE test sistemlerinde salınım barası için kullanılması düşünülen hub yapısıdır.

Simülasyon çalışmaları için Çizelge 4.10’da verilen test yapıları ve “Bölüm 2.4. Amaç Fonksiyonları” bölümünde verilen üç amaç fonksiyonu kullanılarak on iki senaryo oluşturulmuştur ve bu senaryolara ait bilgiler Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Simülasyon çalışmalarında kullanılan test senaryoları.

Durum Adı	Amaç Fonksiyonu	Test Sistemi
Durum-1	Enerji hub maliyetinin minimizasyonu	Test Sistemi-1
Durum-2	Enerji hub kayıplarının minimizasyonu	
Durum-3	Enerji hub maliyetinin ve kayıplarının minimizasyonu	
Durum-4	Enerji hub maliyetinin minimizasyonu	Test Sistemi-2
Durum-5	Enerji hub kayıplarının minimizasyonu	
Durum-6	Enerji hub maliyetinin ve kayıplarının minimizasyonu	
Durum-7	Enerji hub maliyetinin minimizasyonu	Test Sistemi-3
Durum-8	Enerji hub kayıplarının minimizasyonu	
Durum-9	Enerji hub maliyetinin ve kayıplarının minimizasyonu	
Durum-10	Enerji hub maliyetinin minimizasyonu	Test Sistemi-4
Durum-11	Enerji hub kayıplarının minimizasyonu	
Durum-12	Enerji hub maliyetinin ve kayıplarının minimizasyonu	

Çizelge 4.11’de dört farklı test sistemi ve üç amaç fonksiyonu için toplamda on iki senaryo durumu özetlenmiştir. Simülasyon çalışmalarında, durdurma kriteri maksimum uygunluk fonksiyonu değerlendirme sayısı (maxFEs) olarak belirlenmiş olup, algoritmalar arasında fırsat eşitliği sağlamak amacıyla 10000*Boyut olarak ayarlanmıştır. Algoritmalar her bir simülasyon durumu için 30 kez çalıştırılmıştır. Çizelgede verilen on iki durum, FDB-LSHADESPACMA, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, COA, SSA, LSHADESPACMA, MFO, LSHADE, GSA ve GA algoritmaları kullanılarak çözülmüştür. Algoritmaların parametre ayarları orijinal makalelerinde verilen şekilde kullanılmış olup, Çizelge 4.1’de verilmiştir. Enerji hub yapılarının verimlilik katsayıları EK-3’te ve maliyet katsayıları EK-4’de verilmiştir.

4.4.1. Durum-1 için Simülasyon Sonuçları

Durum-1 için amaç fonksiyonu toplam enerji hub maliyetinin minimize edilmesi olup, Test Sistemi-1 için uygulanmıştır. Algoritmalarından elde edilen optimal çözümler Çizelge 4.12’de verilmiştir. Çizelge 4.12’de verilen sonuçlara göre, FDB-LSHADESPACMA algoritmasından elde edilen maliyet değeri 3292,2784 mu ile rakipleri arasında minimum değerdedir. MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, COA, SSA, LSHADESPACMA, MFO, LSHADE, GSA ve GA algoritmalarından elde edilen sonuçlar sırasıyla 3460,9732 mu, 3437,4563 mu, 3321,6194 mu, 3459,0479 mu, 3493,1946 mu, 3449,0242 mu, 3330,6835 mu, 3340,7766 mu, 3557,2218 mu, 3337,8356 mu, 3393,1189 mu, 3336,5610 mu, 3524,4668 mu, ve 3471,8640 mu’dur.

Çizelge 4.12. Durum-1 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,7499	0,1004	0,1003	0,5311	0,1024	0,1000	0,7135	0,6322	0,6150	0,6849	0,7500	0,4059	0,1000	0,1631	0,5589
9	Rüzgar	0,3447	0,3091	0,2935	0,3150	0,4888	0,5735	0,5350	0,5772	0,5685	0,2983	0,2268	0,2166	0,7032	0,4864	0,5966
	Doğalgaz	0,9403	1,1522	1,1592	1,0211	0,9654	1,4000	0,3139	1,3609	0,1099	1,3999	1,4000	0,2731	1,4000	0,6506	0,9490
44	Elektrik	0,1000	1,0520	1,0521	0,1052	0,1262	0,1000	0,1000	0,1344	0,1004	0,1002	0,1000	0,9699	0,1076	1,0422	0,1184
	Güneş	0,3656	0,1677	0,2460	0,4995	0,3782	0,4993	0,1348	0,3158	0,3854	0,1614	0,4190	0,2647	0,1061	0,4100	0,2928
	Doğalgaz	1,8944	2,0079	1,9095	2,1531	0,4465	2,1601	1,8745	1,6721	2,1396	2,4579	1,0336	1,9532	0,8917	1,8288	1,5819
45	Rüzgar	0,2373	0,3355	0,2439	0,5255	0,4960	0,1000	0,7253	0,5918	0,6325	0,3248	0,3251	0,2936	0,5307	0,4150	0,7116
	Güneş	0,4998	0,4986	0,4990	0,4181	0,4888	0,5000	0,3326	0,2929	0,3757	0,4999	0,4646	0,4599	0,4586	0,3884	0,3967
	Doğalgaz	1,8443	1,4314	1,4550	1,4679	1,7443	1,6974	2,4390	1,6325	1,4740	0,9494	1,4932	1,8038	1,9076	0,4604	1,9703
	Isı	0,3142	0,2054	0,2045	0,3376	0,4627	0,3443	0,3088	0,4038	0,3707	0,3141	0,3555	0,2245	0,3509	0,4026	0,3727
65	Elektrik	1,1517	1,1521	1,1517	1,1522	1,2581	1,0872	0,9928	1,0936	1,1026	1,1745	1,1527	1,1236	1,0473	1,0783	1,1475
	Rüzgar	0,3409	0,2634	0,2741	0,2772	0,4569	0,4075	0,3139	0,2464	0,3208	0,4714	0,6000	0,3447	0,4460	0,3033	0,1681
	Güneş	0,1000	0,1007	0,1028	0,3569	0,1008	0,1000	0,1019	0,2600	0,1125	0,1003	0,1000	0,2437	0,1000	0,1766	0,2348
	Doğalgaz	1,1747	1,2993	1,4001	1,2689	2,5381	1,1328	1,1775	1,3615	1,7172	1,1739	1,6352	1,5743	2,1022	2,3134	1,1376
Toplam Maliyet (mu)		3292,2784	3337,8356	3336,5610	3460,9732	3437,4563	3321,6194	3459,0479	3493,1946	3449,0242	3330,6835	3340,7766	3557,2218	3393,1189	3524,4668	3471,8640
Toplam Kayıp (pu)		2,0577	2,0735	2,0878	2,0905	2,0411	2,2020	1,8942	2,2081	1,8881	2,1104	2,0202	1,9675	2,2106	1,9310	1,9987
Amaç Fonksiyonu (mu)		3292,2784	3337,8356	3336,5610	3460,9732	3437,4563	3321,6194	3459,0479	3493,1946	3449,0242	3330,6835	3340,7766	3557,2218	3393,1189	3524,4668	3471,8640
Hesaplama Zamanı (s)		749,8601	714,6389	715,4439	712,8726	714,2411	738,7788	686,1956	715,7859	717,4363	716,4870	704,2114	707,7746	714,6442	722,4587	721,6705

Çizelge 4.13'te, Durum-1 için algoritmalarından 30 bağımsız deneme sonucunda elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri verilmiştir. FDB-LSHADESPACMA algoritması hem minimum hem de ortalama uygunluk değeri değerlerine göre en düşük sonucu elde etmiştir. Ortalama uygunluk değerine göre LSHADE ikinci sırada yer alırken, LSHADESPACMA üçüncü sırada yer almıştır.

Çizelge 4.13. Durum-1 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	3292,2784	3349,9877	3343,1827	10,4520
LSHADESPACMA	3337,8356	3364,3740	3353,1385	6,2062
LSHADE	3336,5610	3351,1087	3344,9743	4,7963
MPA	3460,9732	3638,2981	3557,2103	57,8627
EO	3437,4563	3824,5845	3701,8193	93,0511
BMO	3321,6194	3836,4805	3670,4886	131,7820
AEFA	3459,0479	3734,4820	3630,3738	72,9958
AEO	3493,1946	3802,2210	3702,6425	68,0465
SDO	3449,0242	3629,4081	3560,3532	47,7174
AGDE	3330,6835	3552,9225	3475,8827	48,6772
COA	3340,7766	3626,2768	3511,8566	68,4478
SSA	3557,2218	3798,0398	3700,8297	63,5064
MFO	3393,1189	3795,0115	3662,4088	102,6838
GSA	3524,4668	3700,3325	3639,3423	40,3926
GA	3471,8640	3808,9347	3690,9336	86,3934

4.4.2. Durum-2 için Simülasyon Sonuçları

Durum-2'de toplam enerji hub kayıplarının minimize edilmesi amaçlanmış olup, Test Sistemi-1 için uygulanmıştır. Algoritmalarından elde edilen optimal çözümler Çizelge 4.14'de verilmiştir. Çizelge 4.14'de verilen sonuçlara göre, MPA (1,9205 pu), EO (1,7547 pu), BMO (1,6895 pu), AEFA (1,7077 pu), AEO (1,8753 pu), SDO (1,8602 pu), AGDE (1,8236 pu), COA (1,7155 pu), SSA (1,8214 pu), MFO (1,6864 pu), LSHADE (1,8756 pu), GSA (1,8648 pu), ve GA (1,8227 pu) algoritmaları ile karşılaştırıldığında minimum kayıp değeri FDB-LSHADESPACMA (1,6753 pu) algoritmasından elde edilmiştir.

Çizelge 4.14. Durum-2 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,5085	0,2935	0,4632	0,5487	0,4579	0,2607	0,3708	0,5454	0,5880	0,2235	0,7500	0,6118	0,1000	0,5027	0,6299
9	Rüzgar	0,1549	0,4866	0,6924	0,5054	0,4780	0,6341	0,5170	0,4757	0,6376	0,5312	0,7500	0,4113	0,1814	0,4183	0,5215
	Doğalgaz	0,1000	0,1004	0,1000	0,6754	0,2064	0,1000	0,1699	0,5693	0,4875	0,1000	0,1000	0,2958	0,1000	0,5513	0,2385
44	Elektrik	0,1963	0,7026	1,1954	1,1066	1,7713	1,0095	1,8000	0,7397	0,9750	1,2173	0,8639	0,1653	1,8000	1,2172	0,4637
	Güneş	0,1000	0,5000	0,1953	0,1439	0,1887	0,4037	0,1283	0,3990	0,3891	0,3192	0,5000	0,3100	0,1087	0,1735	0,2364
	Doğalgaz	1,4612	1,9413	1,5598	1,8368	2,0048	0,9662	1,7745	1,1530	2,5079	1,7958	1,8519	1,6576	2,0807	1,4700	1,9347
45	Rüzgar	0,7482	0,7500	0,3816	0,5747	0,1015	0,3564	0,7321	0,6449	0,5414	0,6214	0,1000	0,5935	0,7500	0,6607	0,5215
	Güneş	0,4997	0,4959	0,3771	0,2528	0,4962	0,1000	0,1074	0,3572	0,4527	0,4368	0,1000	0,4708	0,5000	0,3572	0,3093
	Doğalgaz	1,7946	1,5537	1,8731	1,0531	2,7984	2,3438	2,8000	1,7976	0,8817	1,3298	0,1000	1,3864	2,8000	1,7792	0,7400
	Isı	0,2086	0,2000	0,4241	0,3335	0,2179	0,2000	0,2081	0,2282	0,2451	0,3164	0,4998	0,3552	0,2000	0,3149	0,2621
65	Elektrik	1,5000	0,4940	0,5661	0,9013	0,2674	1,4937	0,9370	0,5443	0,3940	0,5835	1,5000	1,0655	0,7657	0,7630	1,2675
	Rüzgar	0,6000	0,5998	0,4467	0,3401	0,5348	0,4662	0,1000	0,4587	0,2072	0,3507	0,1000	0,5993	0,1000	0,1896	0,3570
	Güneş	0,1000	0,1011	0,2896	0,4884	0,3533	0,1353	0,5000	0,2424	0,2177	0,1635	0,1300	0,2010	0,5000	0,4197	0,1840
	Doğalgaz	1,7036	1,4697	1,6234	1,7954	0,1351	1,6551	0,3551	2,0053	1,5002	1,9611	2,8000	1,8280	0,1000	1,5100	2,4313
Toplam Maliyet (mu)		3653,9692	3788,2107	3836,7176	3782,2167	4028,0590	3764,4904	4208,0109	3816,3515	3666,2409	3757,1126	3947,6263	3508,2747	4099,2912	3860,5432	3729,8381
Toplam Kayıp (pu)		1,6753	1,6833	1,8756	1,9205	1,7547	1,6895	1,7077	1,8753	1,8602	1,8236	1,7155	1,8214	1,6864	1,8648	1,8227
Amaç Fonksiyonu (pu)		1,6753	1,6833	1,8756	1,9205	1,7547	1,6895	1,7077	1,8753	1,8602	1,8236	1,7155	1,8214	1,6864	1,8648	1,8227
Hesaplama Zamanı (s)		850,1089	717,2416	714,2326	714,2073	712,1867	736,6320	689,2371	713,5471	727,3796	715,6015	703,0728	713,3184	715,3770	721,9447	720,0665

Çizelge 4.15'te, Durum-2 için 30 bağımsız deneme sonucunda algoritmalarından elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri verilmiştir. FDB-LSHADESPACMA algoritması, (1,6753 pu) sonucu ile rakip algoritmalara göre minimum ortalama uygunluk değeri değerini elde etmiştir. Ayrıca, ortalama uygunluk değerine göre en iyi sonuç (1,7160 pu) ile FDB-LSHADESPACMA' dan elde edilirken, LSHADESPACMA (1,7802 pu) ile ikinci, COA ise (1,8200 pu) ile üçüncü en iyi sonucu elde etmiştir.

Çizelge 4.15. Durum-2 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	1,6753	1,7353	1,7160	0,0182
LSHADESPACMA	1,6833	1,8528	1,7802	0,0457
LSHADE	1,8756	2,0752	2,0258	0,0564
MPA	1,9205	2,0841	1,9931	0,0485
EO	1,7547	2,0456	1,9254	0,0892
BMO	1,6895	2,0899	1,9075	0,1244
AEFA	1,7077	2,1575	1,9613	0,1269
AEO	1,8753	2,0756	1,9929	0,0576
SDO	1,8602	2,0788	2,0031	0,0537
AGDE	1,8236	2,0363	1,9623	0,0563
COA	1,7155	1,9456	1,8200	0,0671
SSA	1,8214	2,0970	1,9914	0,0856
MFO	1,6864	2,0809	1,9497	0,1107
GSA	1,8648	2,0973	2,0276	0,0566
GA	1,8227	2,0595	1,9558	0,0758

4.4.3. Durum-3 için Simülasyon Sonuçları

Durum-3'te, toplam enerji hub maliyetinin ve kayıplarının eşzamanlı olarak minimize edilmesi amaçlanmıştır. Durum-3 için algoritmalarından elde edilen optimal çözümler Çizelge 4.16'da verilmiştir. FDB-LSHADESPACMA, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, COA, SSA, LSHADESPACMA, MFO, LSHADE, GSA ve GA algoritmalarından elde edilen uygunluk fonksiyonu değerleri sırasıyla 4051,9258 mu, 4131,5583 mu, 4287,0027 mu, 4260,9442 mu, 4261,7057 mu, 4409,4706 mu, 4333,5104 mu, 4179,4133 mu, 4199,9721 mu, 4329,5467 mu, 4053,8336 mu, 4300,5369 mu, 4342,0140 mu ve 4294,5494 mu'dur. FDB-LSHADESPACMA, LSHADE algoritmasından sonra en iyi çözümü veren ikinci algoritmadır.

Çizelge 4.16. Durum-3 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,1007	0,1010	0,1003	0,7489	0,5887	0,1579	0,7490	0,2361	0,2683	0,5513	0,7500	0,5957	0,7439	0,6307	0,6359
9	Rüzgar	0,3172	0,3949	0,3748	0,3725	0,2571	0,7204	0,5382	0,4472	0,2902	0,5532	0,1252	0,4787	0,7500	0,5173	0,6615
	Doğalgaz	0,1143	0,1324	0,1348	0,9036	0,7663	1,1355	1,0919	0,6620	1,0752	0,7756	1,3892	0,9445	0,1003	0,9907	0,8358
44	Elektrik	1,0522	1,0519	1,0518	0,1003	0,1000	0,1000	0,1000	1,0714	1,0524	0,1004	0,1000	0,2024	0,1000	0,2149	0,1000
	Güneş	0,3607	0,2482	0,2558	0,1877	0,1000	0,3302	0,3926	0,2130	0,1000	0,3233	0,1151	0,3949	0,2460	0,3039	0,1683
	Doğalgaz	1,8364	1,7918	1,7700	1,9788	1,3564	1,4851	1,8519	1,3335	1,9283	2,2454	2,5400	1,4468	1,8519	0,9881	1,3704
45	Rüzgar	0,4252	0,4721	0,4447	0,2873	0,3582	0,3892	0,7500	0,2846	0,5495	0,4771	0,6471	0,3496	0,7500	0,2764	0,4082
	Güneş	0,4985	0,4996	0,4989	0,4870	0,5000	0,5000	0,5000	0,3112	0,2870	0,4541	0,5000	0,4192	0,5000	0,4435	0,4501
	Doğalgaz	1,8191	1,7719	1,6359	1,9093	1,9830	1,6643	2,3447	2,1796	1,3027	1,0249	0,9372	1,5737	2,8000	2,4839	0,7384
	Isı	0,2006	0,2139	0,2036	0,4994	0,2179	0,2965	0,4787	0,2737	0,3573	0,2887	0,2943	0,3390	0,5000	0,2942	0,2821
65	Elektrik	1,1516	1,1518	1,1526	1,1883	1,4984	0,8968	0,2000	1,0416	1,1415	1,1416	1,1170	1,2710	0,2000	1,1525	1,3564
	Rüzgar	0,3382	0,3571	0,4361	0,3390	0,4709	0,3954	0,4049	0,5025	0,3683	0,3716	0,3752	0,1683	0,3930	0,2222	0,3588
	Güneş	0,1007	0,1004	0,1001	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,3323	0,1849	0,1001	0,1000	0,1364	0,1000	0,2083	0,1023
	Doğalgaz	1,3996	1,4294	1,5341	0,9900	1,6433	1,9554	0,5777	1,4901	1,4657	1,6136	1,1164	1,8037	0,9232	1,5003	2,4834
Toplam Maliyet (mu)		3365,6575	3366,3003	3365,2472	3311,8385	3482,5724	3400,1662	3416,0515	3575,9942	3475,5867	3383,8134	3357,8208	3494,6853	3487,4643	3486,2121	3502,5361
Toplam Kayıp (pu)		1,7128	1,7156	1,6922	2,0791	1,9403	2,1265	2,0794	1,9578	2,0735	1,9750	2,1067	2,0067	1,9584	2,0620	1,8994
Amaç Fonksiyonu (mu)		4051,9258	4053,8336	4043,1922	4131,5583	4287,0027	4260,9442	4261,7057	4409,4706	4333,5104	4179,4133	4199,9721	4329,5467	4300,5369	4342,0140	4294,5494
Hesaplama Zamanı (s)		838,5528	714,5691	714,5781	713,0630	709,1567	800,1185	711,1470	713,2629	718,0265	715,5122	662,2277	711,7492	714,4985	722,4462	719,9958

Çizelge 4.17’de, Durum-3 için 30 bağımsız deneme sonucunda algoritmalarından elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri verilmiştir. Ortalama uygunluk fonksiyon değerlerine göre, LSHADE 4065,7630 mu ile birinci sırada yer alırken, FDB-LSHADESPACMA 4067,8158 mu ile ikinci ve LSHADESPACMA 4102,0431 mu ile üçüncü sırada yer almıştır.

Çizelge 4.17. Durum-3 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	4051,9258	4085,2960	4067,8158	10,0344
LSHADESPACMA	4053,8336	4137,9928	4102,0431	26,2068
LSHADE	4043,1922	4080,4831	4065,7630	11,4741
MPA	4131,5583	4445,3325	4314,5738	73,9265
EO	4287,0027	4770,4316	4549,1264	139,9057
BMO	4260,9442	4769,6413	4574,3982	136,4905
AEFA	4261,7057	4712,5151	4539,3184	118,6543
AEO	4409,4706	4678,9324	4594,0089	67,7354
SDO	4333,5104	4552,4543	4456,8933	59,5690
AGDE	4179,4133	4397,8022	4335,9971	55,6941
COA	4199,9721	4420,9660	4327,0582	56,5337
SSA	4329,5467	4708,5993	4601,5520	93,5152
MFO	4300,5369	4732,1164	4574,1880	109,6436
GSA	4342,0140	4582,4297	4512,5436	61,4336
GA	4294,5494	4779,8108	4607,8892	109,4042

4.4.4. Durum-4 için Simülasyon Sonuçları

Durum-4’te, Test Sistemi-2 için toplam enerji hub maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Algoritmalarından elde edilen optimal çözümler Çizelge 4.18’de verilmiştir. Bu durum için Çizelge 4.18’de verilen sonuçlar değerlendirildiğinde, LSHADE, 5016.7876 mu uygunluk değeri ile rakip algoritmalara göre en iyi sonucu vermiştir. FDB-LSHADESPACMA, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, COA, SSA, LSHADESPACMA, MFO, GSA ve GA algoritmalarından elde edilen sonuçlar sırasıyla, 5052,0203mu, 5311,7039 mu, 5539,9438 mu, 5298,9759 mu, 5183,8137 mu, 5535,9251 mu, 5355,0742 mu, 5246,6165 mu, 5193,8526 mu, 5444,5390 mu, 5054,1576 mu, 5407,3923 mu, 5500,1353 mu ve 5452,2800 mu’dur.

Çizelge 4.18. Durum-4 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,1001	0,1006	0,1004	0,1866	0,6273	0,7485	0,1785	0,1272	0,3255	0,3249	0,7500	0,6580	0,5144	0,5501	0,1752
23	Elektrik	1,8952	1,8954	1,8952	1,7855	1,4530	2,4449	2,5579	2,1546	1,9028	1,8954	1,1738	1,4146	2,9422	0,9428	1,9571
	Doğalgaz	1,1475	1,5016	1,8285	1,2210	0,5473	1,8566	1,6432	2,1395	1,7873	1,6616	2,3675	0,6196	1,4014	1,5144	0,5779
29	Elektrik	1,2492	1,2490	1,2486	1,2481	1,0966	0,4000	0,4000	0,6269	1,2490	1,2491	2,0971	1,2492	0,4457	1,2566	1,3053
	Rüzgar	0,1741	0,4216	0,3063	0,2982	0,1000	0,2304	0,4370	0,5446	0,1309	0,3518	0,1002	0,2811	0,1000	0,2389	0,3763
	Doğalgaz	2,4432	2,5061	2,3187	2,4800	2,4419	2,3327	2,0000	2,0990	2,7692	2,6867	2,2001	2,3700	2,7978	2,8473	2,7217
42	Güneş	0,1435	0,2204	0,1246	0,2747	0,3077	0,4221	0,2094	0,3283	0,2559	0,3096	0,2580	0,3776	0,1000	0,2178	0,2174
	Doğalgaz	0,9985	0,6132	0,6816	0,6930	0,6112	0,7673	1,0000	0,9538	0,4565	0,5453	0,9949	0,8516	0,2022	0,5566	0,6439
	Isı	0,5682	0,5066	0,6985	1,2624	1,2523	1,0754	0,5567	1,1449	0,2461	0,7164	0,4273	0,9970	0,7936	0,6878	1,4999
49	Rüzgar	0,3742	0,1894	0,3355	0,3437	0,2593	0,3906	0,1000	0,2199	0,2393	0,2403	0,4591	0,4295	0,3548	0,3019	0,2708
	Güneş	0,4996	0,4626	0,4971	0,3139	0,5000	0,2651	0,5000	0,2826	0,2386	0,3067	0,3809	0,2570	0,3663	0,3851	0,1497
	Doğalgaz	0,3640	0,1206	0,3130	0,6229	0,1000	0,6298	0,6877	0,2915	0,5539	0,5027	0,1071	0,6366	0,4908	0,6871	0,4745
	Isı	0,6986	0,6995	0,6995	0,1004	0,5554	0,7000	0,7000	0,1034	0,4127	0,4977	0,6788	0,4042	0,3785	0,4990	0,4583
50	Elektrik	0,8413	0,8412	0,8415	0,8298	0,7176	0,2347	0,2000	1,0443	0,9530	0,8459	0,2003	0,7532	0,2000	0,8058	0,9976
	Rüzgar	0,1796	0,2815	0,1424	0,3852	0,5133	0,3663	0,6000	0,5732	0,2858	0,1738	0,1269	0,4652	0,4335	0,5211	0,3839
	Güneş	0,1013	0,1011	0,1010	0,1860	0,1775	0,1000	0,1161	0,2874	0,1007	0,1008	0,1000	0,2204	0,1000	0,2582	0,1752
	Doğalgaz	1,1775	1,2442	0,7942	1,0604	1,7935	0,2000	1,3012	0,3783	1,3817	0,7326	0,5393	1,3744	1,4747	1,0895	1,0849
Toplam Maliyet (mu)		5052,0203	5054,1576	5016,7876	5311,7039	5539,9438	5298,9759	5183,8137	5535,9251	5355,0742	5246,6165	5193,8526	5444,5390	5407,3923	5500,1353	5452,2800
Toplam Kayıp (pu)		2,2539	2,2162	2,2227	2,3197	2,2763	2,2294	2,4715	2,1946	2,3266	2,2474	2,1420	2,2958	2,2622	2,3869	2,3442
Amaç Fonksiyonu (mu)		5052,0203	5054,1576	5016,7876	5311,7039	5539,9438	5298,9759	5183,8137	5535,9251	5355,0742	5246,6165	5193,8526	5444,5390	5407,3923	5500,1353	5452,2800
Hesaplama Zamanı (s)		1005,3345	863,0119	860,5912	865,8597	860,5227	959,5605	781,2445	861,6826	867,2940	864,0688	857,5072	855,9485	863,5122	872,2588	868,6733

Durum-4 için algoritmalarından 30 bağımsız deneme sonucunda elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri Çizelge 4.19’da verilmiştir. Çizelge 4.19’da verilen sonuçlardan ortalama uygunluk değerine göre, FDB-LSHADESPACMA 5170,4820 mu ile en iyi değeri elde etmiştir. Minimum uygunluk değerine göre en iyi sonucu elde eden LSHADE ise, ortalama uygunluk değerine göre 5178,7296 mu ile ikinci sırada yer almıştır. LSHADESPACMA algoritması ise 5189,5146 mu ile üçüncü olmuştur.

Çizelge 4.19. Durum-4 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	5052,0203	5201,9358	5170,4820	39,3372
LSHADESPACMA	5054,1576	5233,3845	5189,5146	47,9793
LSHADE	5016,7876	5206,7568	5178,7296	36,4988
MPA	5311,7039	5514,2118	5433,3113	55,3209
EO	5539,9438	5768,0912	5657,0124	66,0164
BMO	5298,9759	5745,4671	5623,4502	103,1616
AEFA	5183,8137	5869,5622	5722,7960	151,1429
AEO	5535,9251	5747,1344	5647,9302	55,1602
SDO	5355,0742	5576,5525	5507,5419	45,3961
AGDE	5246,6165	5504,8776	5405,1501	65,8468
COA	5193,8526	5493,9772	5386,5036	92,5100
SSA	5444,5390	5729,3421	5632,8714	81,0998
MFO	5407,3923	5837,6869	5700,9506	125,5859
GSA	5500,1353	5754,1704	5673,4126	76,4730
GA	5452,2800	5739,4609	5610,2508	78,6744

4.4.5. Durum-5 için Simülasyon Sonuçları

Toplam enerji hub kayıplarının Test Sistemi-2 için minimize edildiği durumda, algoritmalarından elde edilen optimal çözüm değerleri Çizelge 4.20’de verilmiştir. Çizelge 4.20’de verilen sonuçlar incelendiğinde, FDB-LSHADESPACMA (2,1126 pu), MPA (2,2216 pu), EO (2,1462 pu), BMO (2,1186 pu), AEFA (2,1666 pu), AEO (2,2105 pu), SDO (2,1557 pu), AGDE (2,2306 pu), SSA (2,2127 pu), LSHADESPACMA (2,1176 pu), MFO (2,1726 pu), LSHADE (2,2755 pu), GSA (2,2203 pu), ve GA (2,1509 pu) algoritmaları ile karşılaştırıldığında COA, (2,1004 pu) değeri ile minimum uygunluk fonksiyonu değerini elde etmiştir.

Çizelge 4.20. Durum-5 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,6265	0,7498	0,5610	0,6057	0,7357	0,2232	0,7057	0,2642	0,3369	0,5825	0,5607	0,2665	0,3857	0,4303	0,7011
23	Elektrik	1,6557	1,7508	1,3569	0,8745	2,0203	2,2869	3,0000	1,2622	2,3468	0,9558	0,6534	1,7024	0,9833	0,9592	2,0739
	Doğalgaz	1,3572	1,6279	1,3004	1,4655	2,5643	1,9249	1,6643	2,0126	2,0885	1,1780	2,9426	1,9402	2,4697	1,3484	1,9527
29	Elektrik	1,5183	1,8957	1,2825	2,2841	0,4001	1,4988	0,4000	1,5654	0,9048	1,0556	1,8233	1,4797	1,5845	1,7522	0,6811
	Rüzgar	0,4835	0,1275	0,3633	0,2641	0,5446	0,4094	0,5038	0,2101	0,5302	0,4028	0,5287	0,2924	0,1000	0,3048	0,5232
	Doğalgaz	2,6666	2,7728	2,8280	2,8796	2,5723	2,9966	2,7575	2,9677	2,9544	2,9348	2,0525	2,8927	2,9072	2,8888	2,8203
42	Güneş	0,2699	0,2439	0,3690	0,2767	0,2084	0,2349	0,5000	0,1894	0,3159	0,1961	0,5000	0,3817	0,4382	0,4081	0,1007
	Doğalgaz	0,6560	0,5694	0,4320	0,8485	0,7224	0,6305	1,0000	0,6469	0,1347	0,2859	1,0000	0,1629	0,1000	0,3081	0,2203
	Isı	1,3430	1,0248	1,2216	0,4961	0,1704	0,6735	0,2572	0,5847	0,8193	1,3055	0,3832	1,0278	0,2827	1,2312	0,8641
49	Rüzgar	0,3819	0,1431	0,3107	0,2407	0,3809	0,1463	0,6000	0,4411	0,5298	0,3257	0,2932	0,3867	0,5973	0,2747	0,1824
	Güneş	0,3192	0,4557	0,3445	0,2567	0,1709	0,1811	0,1000	0,2000	0,2075	0,4040	0,5000	0,2354	0,3161	0,4064	0,1601
	Doğalgaz	0,1000	0,3769	0,3122	0,1842	0,4686	0,1157	0,3946	0,1763	0,1370	0,6359	0,1500	0,2119	0,3358	0,4050	0,5759
	Isı	0,5581	0,4751	0,5512	0,5561	0,4070	0,3637	0,7000	0,5651	0,1388	0,5632	0,3128	0,4116	0,7000	0,3562	0,3668
50	Elektrik	0,2000	0,2070	0,8180	0,6044	1,3923	0,8079	0,2449	1,1494	0,4247	1,1489	0,2000	0,5113	0,6372	0,6864	1,2049
	Rüzgar	0,3534	0,1415	0,1000	0,3173	0,1167	0,1533	0,1000	0,4865	0,3100	0,5338	0,6000	0,4024	0,5917	0,4795	0,3317
	Güneş	0,4012	0,1198	0,3266	0,1000	0,1000	0,1832	0,5000	0,4192	0,3782	0,2510	0,2243	0,1813	0,1000	0,2343	0,4461
	Doğalgaz	0,4040	0,2000	0,8797	0,9109	0,2005	0,3909	0,2385	0,3888	0,8686	0,4183	0,2000	0,7717	0,5271	0,6747	0,3316
Toplam Maliyet (mu)		5603,9056	5434,8458	5557,9059	5598,0916	5429,2887	5581,7000	5587,1244	5839,8855	5833,1773	5744,1175	5616,7848	5639,1568	5694,5862	5718,9171	5787,9744
Toplam Kayıp (pu)		2,1126	2,1176	2,2755	2,2216	2,1462	2,1186	2,1666	2,2105	2,1557	2,2306	2,1004	2,2127	2,1726	2,2203	2,1509
Amaç Fonksiyonu (pu)		2,1126	2,1176	2,2755	2,2216	2,1462	2,1186	2,1666	2,2105	2,1557	2,2306	2,1004	2,2127	2,1726	2,2203	2,1509
Hesaplama Zamanı (s)		1030,2825	862,9752	861,3721	861,6756	860,7542	966,0338	831,6080	861,4441	867,6467	864,4562	854,9938	856,3153	827,2031	872,2820	869,3671

Algoritmalarından Durum-5 için 30 bağımsız deneme sonucunda elde edilen uygunluk fonksiyonu değerlerinin minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.21’de verilmiştir. Çizelge 4.21’den verilen sonuçlar değerlendirildiğinde, minimum uygunluk fonksiyonu değeri COA algoritmasından elde edilirken, ortalama uygunluk fonksiyonu açısından minimum değer (2,1461 pu) ile FDB-LSHADESPACMA algoritmasından elde edilmiştir.

Çizelge 4.21. Durum-5 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	2,1126	2,1706	2,1461	0,0198
LSHADESPACMA	2,1176	2,2352	2,1922	0,0325
LSHADE	2,2755	2,3810	2,3562	0,0212
MPA	2,2216	2,3359	2,2809	0,0293
EO	2,1462	2,3404	2,2689	0,0505
BMO	2,1186	2,3433	2,2581	0,0587
AEFA	2,1666	2,4169	2,3100	0,0720
AEO	2,2105	2,3582	2,3172	0,0370
SDO	2,1557	2,3589	2,3120	0,0399
AGDE	2,2306	2,3380	2,2942	0,0320
COA	2,1004	2,3012	2,2158	0,0510
SSA	2,2127	2,3573	2,3007	0,0410
MFO	2,1726	2,3845	2,3027	0,0587
GSA	2,2203	2,3556	2,3099	0,0377
GA	2,1509	2,3738	2,3024	0,0589

4.4.6. Durum-6 için Simülasyon Sonuçları

Durum 6’da, Test Sistemi-2 için eş zamanlı olarak toplam enerji hub maliyetinin ve kayıplarının minimize edilmesi amaçlanmıştır. Algoritmalarından elde edilen optimal çözümler Çizelge 4.22’de verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, LSHADE algoritması 5957.0430 mu ile en iyi uygunluk fonksiyon değerini elde etmiştir. LSHADE kullanılarak elde edilen toplam maliyet ve toplam kayıp değerleri sırasıyla 4992,3954 mu ve 2,1448 pu’ dur, FDB-LSHADESPACMA, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, COA, SSA, LSHADESPACMA, MFO, GSA ve GA’ dan elde edilen amaç fonksiyon değerleri 5986,8118 mu, 6251,4127 mu, 6496,2561 mu, 6567,3667 mu, 6670,5903 mu, 6667,2205 mu, 6368,0613 mu, 6442,7389 mu, 6225,1063 mu, 6675,0141 mu, 6043,5137 mu, 6432,6645 mu, 6627,7989 mu ve 6388,9118 mu’dur.

Çizelge 4.22. Durum-6 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,1003	0,1015	0,1024	0,1012	0,5545	0,1277	0,7500	0,2951	0,1891	0,2601	0,7388	0,3896	0,7500	0,2576	0,4587
23	Elektrik	1,8951	1,9017	1,8960	1,9420	1,8326	2,0012	1,1680	1,6431	1,9240	2,7935	2,9993	0,9988	3,0000	0,8898	1,1090
	Doğalgaz	1,9956	1,6241	1,5965	1,5218	1,7804	1,1382	0,9444	1,0788	1,4128	1,3140	0,1039	1,7249	0,1000	1,4471	2,2466
29	Elektrik	1,2490	1,2491	1,2492	1,2490	1,4627	1,1713	1,2409	1,9770	1,2006	0,4369	1,2498	1,1774	0,4000	2,0854	1,2364
	Rüzgar	0,3446	0,4379	0,4160	0,4673	0,1000	0,3435	0,4943	0,2419	0,4063	0,2938	0,1000	0,4639	0,2721	0,4516	0,4178
	Doğalgaz	2,4113	2,5605	2,3361	2,8548	2,6595	2,9460	2,9628	2,7354	2,7472	2,6843	2,0000	2,4433	2,3297	2,6915	2,5079
42	Güneş	0,1731	0,1009	0,1896	0,2304	0,3845	0,1000	0,1000	0,2588	0,1728	0,1280	0,2179	0,2612	0,1000	0,1842	0,4186
	Doğalgaz	0,5905	0,5126	0,6642	0,4671	0,5500	0,1197	0,1000	0,5380	0,3338	0,9703	1,0000	0,8288	0,9493	0,3922	0,7359
	Isı	0,5397	1,0463	0,5274	0,5958	0,4881	0,9010	1,3305	0,8030	0,7551	0,7801	1,5000	0,8674	1,0277	1,1205	0,2199
49	Rüzgar	0,3375	0,1520	0,2101	0,2320	0,3201	0,1610	0,6000	0,3731	0,2915	0,1606	0,1000	0,5341	0,1768	0,1805	0,2357
	Güneş	0,4997	0,4991	0,4980	0,3835	0,1589	0,3002	0,5000	0,1947	0,2939	0,2409	0,1991	0,4366	0,1000	0,2458	0,4517
	Doğalgaz	0,3302	0,1069	0,1003	0,4058	0,3981	0,9812	0,1000	0,6613	0,9653	0,6243	0,1000	0,8915	1,0000	0,5659	0,1000
	Isı	0,6982	0,6992	0,6969	0,4853	0,6979	0,6513	0,7000	0,5094	0,4944	0,3446	0,6912	0,4267	0,6852	0,3967	0,6997
50	Elektrik	0,8408	0,8410	0,8411	0,8409	0,9209	0,8019	0,6221	0,5308	0,8415	0,7981	0,2000	0,6350	0,6416	0,8251	0,8726
	Rüzgar	0,2492	0,3007	0,3016	0,1657	0,1814	0,5995	0,1000	0,2667	0,2630	0,3176	0,1000	0,3535	0,6000	0,5213	0,3846
	Güneş	0,1005	0,1021	0,1001	0,1223	0,1000	0,1000	0,3512	0,1796	0,1415	0,1007	0,1000	0,2207	0,1000	0,2855	0,2012
	Doğalgaz	0,4778	0,5777	1,1212	0,9908	0,6112	0,8207	1,0556	1,0710	0,7879	1,0663	1,8000	0,5923	1,1047	0,9156	0,7473
Toplam Maliyet (mu)		5022,1075	5078,0652	4992,3954	5210,7791	5438,2267	5413,9942	5580,4188	5534,0315	5285,6083	5315,4216	5195,7022	5503,9098	5353,6509	5483,3372	5334,4370
Toplam Kayıp (pu)		2,1322	2,1103	2,1448	2,2168	2,1596	2,3647	2,1685	2,2729	2,2732	2,3541	2,1992	2,3618	2,2372	2,3167	2,1942
Amaç Fonksiyonu (mu)		5986,8118	6043,5137	5957,0430	6251,4127	6496,2561	6567,3667	6670,5903	6667,2205	6368,0613	6442,7389	6225,1063	6675,0141	6432,6645	6627,7989	6388,9118
Hesaplama Zamanı (s)		1027,8547	861,4716	857,6316	859,0112	846,0315	961,1618	824,4521	855,5149	865,2731	857,3429	849,8476	854,2750	859,1078	867,3177	865,7207

Çizelge 4.23’de, FDB-LSHADESPACMA ve rakip MSA algoritmalarından Durum-6 için 30 bağımsız deneme sonucunda elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk fonksiyonu değerleri verilmiştir. Çizelge 4.23’te verilen sonuçlara göre, FDB-LSHADESPACMA minimum uygunluk değeri 5986,8118 pu ile LSHADE algoritmasından sonra ikinci gelmiştir. Ancak, ortalama uygunluk fonksiyonu değeri açısından ise rakipleri arasında birinci sırada yer almıştır.

Çizelge 4.23. Durum-6 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	5986,8118	6238,1080	6143,1897	80,0998
LSHADESPACMA	6043,5137	6297,1495	6219,6707	76,3639
LSHADE	5957,0430	6241,8260	6161,0372	88,1555
MPA	6251,4127	6633,8069	6495,0949	97,2008
EO	6496,2561	6982,2850	6808,0281	131,1270
BMO	6567,3667	6977,0853	6794,2615	112,6929
AEFA	6670,5903	7183,4084	6954,7838	164,4493
AEO	6667,2205	6969,1779	6850,9816	86,4498
SDO	6368,0613	6755,6539	6635,5170	90,9234
AGDE	6442,7389	6609,9414	6524,6047	44,8133
COA	6225,1063	6643,7455	6478,9453	123,7401
SSA	6675,0141	6980,8369	6829,9770	92,0865
MFO	6432,6645	7035,6325	6824,8678	158,3025
GSA	6627,7989	7008,3046	6856,2430	115,5748
GA	6388,9118	6969,5683	6778,1411	136,4348

4.4.7. Durum-7 için Simülasyon Sonuçları

Toplam enerji hub maliyetinin Test Sistemi-3 için minimize edildiği bu durumda, algoritmalarından elde edilen optimal çözüm değerleri Çizelge 4.24’de verilmiştir. Çizelge 4.24’de verilen sonuçlara göre, LSHADE 5193,6270 mu ile minimum toplam maliyet değerini elde etmiştir. FDB-LSHADESPACMA, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, COA, SSA, LSHADESPACMA, MFO, GSA ve GA’ dan elde edilen sonuçlar sırasıyla 5217,2151mu, 5428,6760 mu, 5438,3641 mu, 5492,5474 mu, 5624,2177 mu, 5592,9273 mu, 5517,0042 mu, 5300,4345 mu, 5318,3889 mu, 5711,0993 mu, 5218,9763 mu, 5512,5763 mu, 5771,0521 mu ve 5442,6938 mu’dur.

Çizelge 4.24. Durum-7 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,7494	0,7497	0,7492	0,6270	0,1284	0,7431	0,6770	0,4152	0,5563	0,7285	0,7440	0,7100	0,1000	0,6745	0,6851
12	Güneş	0,4390	0,4995	0,4657	0,3094	0,3855	0,2271	0,1000	0,3275	0,3132	0,4559	0,4688	0,2478	0,2361	0,2853	0,1620
	Doğalgaz	0,9806	1,0209	1,0214	1,1534	1,6381	1,7340	1,7037	1,1044	1,3532	1,0075	0,5373	1,6617	1,6305	1,5857	1,3340
19	Elektrik	1,1266	1,1266	1,1264	1,7491	1,7157	1,7500	1,6814	1,6919	1,1611	1,1259	1,7475	1,3492	1,3930	1,4034	1,7456
	Güneş	0,3062	0,3712	0,2931	0,2826	0,4998	0,2414	0,4513	0,1678	0,4680	0,2766	0,4915	0,2774	0,3208	0,2407	0,3844
	Doğalgaz	0,8634	0,8919	0,9991	0,9485	0,9993	0,5445	0,9229	0,7380	0,8416	0,9276	1,0000	0,8360	1,0000	0,8333	0,7302
26	Rüzgar	0,5204	0,3572	0,4002	0,6174	0,6155	0,3916	0,7500	0,4334	0,4325	0,6593	0,2241	0,6114	0,7500	0,4089	0,6078
	Doğalgaz	0,9044	0,9048	0,7734	0,5309	0,3970	0,9157	0,3113	1,0781	0,7943	0,9258	1,1000	1,0137	0,4121	0,5762	1,0514
32	Rüzgar	0,4824	0,4501	0,3804	0,2690	0,2315	0,2380	0,3448	0,6006	0,5537	0,4972	0,2746	0,6654	0,3676	0,6538	0,4138
	Güneş	0,3246	0,3391	0,3243	0,2909	0,1000	0,4984	0,1000	0,3600	0,4866	0,4383	0,2114	0,4545	0,5000	0,4224	0,2575
	Doğalgaz	1,7981	1,7958	1,7995	1,7823	1,7200	1,7727	1,8000	1,6695	1,7878	1,7099	1,7864	1,6935	1,8000	1,7661	1,7293
	Isı	0,8992	0,8996	0,8994	0,8638	0,8867	0,8002	0,9000	0,8760	0,7184	0,8991	0,8595	0,5831	0,7615	0,7390	0,8145
55	Elektrik	1,6699	1,6709	1,6707	1,6708	1,6335	1,7092	1,6359	1,6905	1,6598	1,6759	0,8850	1,6902	1,5993	1,6911	1,6715
	Rüzgar	0,4671	0,3915	0,3848	0,2948	0,2237	0,5554	0,1000	0,4564	0,5227	0,3984	0,5970	0,4845	0,3653	0,2586	0,2986
	Güneş	0,2801	0,2852	0,2729	0,3155	0,3180	0,1000	0,2375	0,3885	0,4112	0,2147	0,4950	0,1594	0,3234	0,4393	0,3236
	Doğalgaz	0,1012	0,1002	0,1043	0,1023	0,1000	0,1000	0,5171	0,4112	0,1028	0,1000	0,1000	0,3472	0,1000	0,4598	0,1001
59	Elektrik	0,7493	0,7498	0,7499	0,6814	0,7500	0,7281	0,7500	0,5821	0,7480	0,6230	0,7500	0,2456	0,7500	0,7173	0,4207
	Rüzgar	0,3186	0,3990	0,4703	0,4330	0,5987	0,3500	0,3798	0,5160	0,2334	0,3608	0,6000	0,5608	0,5854	0,3681	0,4845
	Doğalgaz	0,2015	0,2007	0,2053	0,2006	0,2000	0,2000	0,2000	0,2175	0,7029	0,2031	0,2000	0,6778	0,2000	0,9705	0,2003
	Isı	0,1019	0,1008	0,1009	0,4832	0,1000	0,1000	0,1842	0,2340	0,3783	0,1015	0,1000	0,3238	0,1000	0,5373	0,1000
Toplam Maliyet (mu)		5217,2151	5218,9763	5193,6270	5428,6760	5438,3641	5492,5474	5624,2177	5592,9273	5517,0042	5300,4345	5318,3889	5711,0993	5512,5763	5771,0521	5442,6938
Toplam Kayıp (pu)		2,9401	2,9901	2,9787	2,9144	2,9474	2,9168	2,9683	2,8793	2,8894	2,9611	2,9179	2,8569	2,9564	2,9021	2,8886
Amaç Fonksiyonu (mu)		5217,2151	5218,9763	5193,6270	5428,6760	5438,3641	5492,5474	5624,2177	5592,9273	5517,0042	5300,4345	5318,3889	5711,0993	5512,5763	5771,0521	5442,6938
Hesaplama Zamanı (s)		1516,5506	1253,5815	1252,6320	1253,0433	1216,5926	1380,6327	1243,4899	1249,2953	1258,2549	1252,4454	1239,2385	1241,1410	1213,8157	1265,0865	1260,4158

Durum-7 için bütün algoritmalarından 30 bağımsız deneme sonucunda elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk fonksiyonu değerleri Çizelge 4.25'te verilmiştir. LSHADE algoritması, hem minimum hem de ortalama uygunluk fonksiyonu değerine göre rakipleri arasında birinci sırada yer alırken, FDB-LSHADESPACMA algoritması ise LSHADE algoritmasını takip ederek her iki değer için de ikinci sırada yer almıştır.

Çizelge 4.25. Durum-7 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	5217,2151	5258,1804	5243,6879	13,1156
LSHADESPACMA	5218,9763	5317,4979	5279,0070	26,9089
LSHADE	5193,6270	5263,4826	5239,3687	20,3962
MPA	5428,6760	5718,9870	5577,0682	83,5459
EO	5438,3641	5801,6788	5684,0244	86,2866
BMO	5492,5474	5793,8458	5682,3708	80,3586
AEFA	5624,2177	6032,0076	5828,5342	131,2655
AEO	5592,9273	6009,6451	5852,8241	109,1912
SDO	5517,0042	5772,0274	5651,9328	75,0601
AGDE	5300,4345	5546,7985	5474,6452	52,9214
COA	5318,3889	5538,3283	5469,9934	58,7650
SSA	5711,0993	6129,6905	5950,0045	112,8875
MFO	5512,5763	5844,2618	5723,4647	78,2010
GSA	5771,0521	6016,8396	5919,5058	78,3917
GA	5442,6938	5693,5382	5602,5328	63,0704

4.4.8. Durum-8 için Simülasyon Sonuçları

Durum 8'de, Test Sistemi-3 için enerji hub kayıplarının minimize edilmesi amaçlanmıştır. Algoritmalarından elde edilen optimal çözümler Çizelge 4.26'da verilmiştir. Çizelge 4.26'da verilen sonuçlara göre, COA'dan elde edilen toplam kayıp 2,6882 pu ile rakiplerine göre en iyi değerdir. FDB-LSHADESPACMA, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, SSA, LSHADESPACMA, MFO, LSHADE, GSA ve GA tarafından elde edilen toplam kayıp değerleri sırasıyla 2,7051 pu, 2,8031 pu, 2,7832 pu, 2,7399 pu, 2,8098 pu, 2,8086 pu, 2,8106 pu, 2,7998 pu, 2,7988 pu, 2,7170 pu, 2,7762 pu, 2,8375 pu, 2,8315 pu ve 2,7896 pu'dur.

Çizelge 4.26. Durum-8 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,7420	0,7500	0,5945	0,5566	0,6605	0,7100	0,7500	0,5925	0,5721	0,7172	0,6947	0,6343	0,4171	0,5808	0,4447
12	Güneş	0,2183	0,2370	0,3012	0,1912	0,4439	0,1000	0,5000	0,3777	0,4201	0,3800	0,4325	0,4114	0,2823	0,2612	0,3892
	Doğalgaz	1,7998	1,8000	1,7840	1,6324	1,7607	1,7265	1,7037	1,7562	1,5967	1,7513	1,8000	1,5585	1,7047	1,6199	1,6540
19	Elektrik	1,1744	0,8393	1,6738	1,6800	1,7500	1,7396	1,7500	1,6128	1,7163	1,5949	1,7500	1,6841	1,5352	1,5833	1,5796
	Güneş	0,1164	0,4963	0,3631	0,3769	0,3162	0,2919	0,5000	0,2176	0,4426	0,2115	0,5000	0,2656	0,5000	0,3125	0,2165
	Doğalgaz	0,8430	0,8942	0,8890	0,9274	0,7191	0,9432	0,9779	0,9752	0,8120	0,8549	1,0000	0,9312	1,0000	0,8471	0,8315
26	Rüzgar	0,5210	0,4872	0,2751	0,5255	0,6448	0,7500	0,6385	0,6258	0,4712	0,6858	0,7500	0,6245	0,7037	0,6560	0,6853
	Doğalgaz	1,1000	0,7785	0,7109	0,8715	0,9813	1,0583	1,1000	0,8160	0,9325	0,7049	1,1000	1,0821	1,0412	0,9630	0,9965
32	Rüzgar	0,7497	0,7500	0,5886	0,1665	0,7400	0,4106	0,7500	0,2720	0,6158	0,3522	0,7500	0,6366	0,7500	0,5244	0,3573
	Güneş	0,4925	0,3580	0,1000	0,4117	0,3302	0,1000	0,1941	0,4526	0,2829	0,3155	0,1000	0,4241	0,4811	0,2089	0,3606
	Doğalgaz	1,2875	1,1439	1,4616	1,2423	1,3329	1,4638	1,8000	1,2452	1,2968	1,5952	0,9831	1,7052	1,1382	1,5631	1,3636
	Isı	0,6616	0,8995	0,7561	0,8575	0,8834	0,4853	0,2137	0,7995	0,8823	0,6544	0,7225	0,3877	0,7601	0,6962	0,7326
55	Elektrik	2,0545	1,7397	1,6677	1,8253	1,2162	2,0428	0,2221	1,8017	1,8888	1,3548	2,1000	2,0013	1,6386	1,8845	1,6095
	Rüzgar	0,1008	0,5942	0,5930	0,3987	0,2776	0,1000	0,5902	0,2814	0,5480	0,3472	0,1000	0,1799	0,4757	0,5016	0,5998
	Güneş	0,4937	0,3626	0,3633	0,3810	0,1846	0,4776	0,5000	0,3965	0,2165	0,5000	0,4999	0,1621	0,1000	0,3212	0,3859
	Doğalgaz	1,7349	0,1317	0,5497	1,1127	0,3138	1,7505	1,2364	1,4699	0,7626	0,8162	1,8000	0,9110	1,8000	0,8475	1,3792
59	Elektrik	0,4577	0,6534	0,5748	0,7264	0,5759	0,7117	0,5281	0,6889	0,4702	0,6348	0,1000	0,1350	0,7500	0,4237	0,7497
	Rüzgar	0,6000	0,4955	0,5343	0,5051	0,5305	0,2364	0,6000	0,3770	0,1546	0,5408	0,1000	0,4510	0,1000	0,2777	0,4055
	Doğalgaz	0,2708	1,8932	0,3232	1,1284	0,6797	1,2182	1,5587	0,9949	0,6816	0,9947	1,9000	1,1935	0,2000	1,1594	1,1818
	Isı	0,6980	0,7000	0,2846	0,3287	0,6039	0,7000	0,4128	0,3911	0,1582	0,4489	0,1000	0,4440	0,7000	0,3224	0,5529
Toplam Maliyet (mu)		6311,5784	6007,5757	5754,8065	6061,3640	5915,4928	6436,7831	6355,3362	6184,2861	5978,1550	6092,3574	6577,9819	6138,1554	6244,6694	6083,8686	6170,2094
Toplam Kayıp (pu)		2,7051	2,7170	2,8375	2,8031	2,7832	2,7399	2,8098	2,8086	2,8106	2,7998	2,6882	2,7988	2,7762	2,8315	2,7896
Amaç Fonksiyonu (pu)		2,7051	2,7170	2,8375	2,8031	2,7832	2,7399	2,8098	2,8086	2,8106	2,7998	2,6882	2,7988	2,7762	2,8315	2,7896
Hesaplama Zamanı (s)		1454,0439	1235,0641	1232,5345	1227,8398	1202,8678	1383,1782	1161,8846	1231,9966	1239,2173	1235,2850	1183,1556	1223,8701	1197,6807	1243,7884	1242,0730

MSA algoritmalarından Durum-8 için 30 bağımsız deneme sonucunda elde edilen sonuçların minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk fonksiyonu değerleri Çizelge 4.27’de verilmiştir. Minimum uygunluk fonksiyonu değeri açısından değerlendirildiğinde, FDB-LSHADESPACMA algoritması LSHADE algoritmasından sonra ikinci sırada yer alırken, ortalama uygunluk fonksiyonu değerine göre rakiplerini geçerek birinci sırada yer almıştır.

Çizelge 4.27. Durum-8 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	2,7051	2,7524	2,7372	0,0135
LSHADESPACMA	2,7170	2,7848	2,7541	0,0199
LSHADE	2,8375	2,8916	2,8822	0,0113
MPA	2,8031	2,9004	2,8750	0,0262
EO	2,7832	2,9202	2,8658	0,0397
BMO	2,7399	2,9018	2,8491	0,0394
AEFA	2,8098	2,9821	2,9196	0,0513
AEO	2,8086	2,8765	2,8525	0,0193
SDO	2,8106	2,8864	2,8559	0,0192
AGDE	2,7998	2,8871	2,8603	0,0199
COA	2,6882	2,8525	2,8109	0,0326
SSA	2,7988	2,9032	2,8602	0,0322
MFO	2,7762	2,9122	2,8671	0,0354
GSA	2,8315	2,8919	2,8696	0,0152
GA	2,7896	2,8897	2,8534	0,0270

4.4.9. Durum-9 için Simülasyon Sonuçları

Durum-9 için amaç fonksiyonu toplam enerji hub maliyetinin ve toplam kaybın minimize edilmesi olup, Test Sistemi-3 için uygulanmıştır. Algoritmalarından elde edilen optimal çözümler Çizelge 4.28’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, minimum uygunluk fonksiyonu değeri 6311,6236 mu ile LSHADE algoritmasından elde edilmiştir. FDB-LSHADESPACMA, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, COA, SSA, LSHADESPACMA, MFO, GSA ve GA’dan elde edilen uygunluk fonksiyonu değerleri sırasıyla 6344,4240 mu, 6449,2530 mu, 6703,4503 mu, 6709,6632 mu, 6739,8958 mu, 6776,2547 mu, 6666,9504 mu, 6440,6779 mu, 6438,1771 mu, 6864,0429 mu, 6342,6288 mu, 6686,4393 mu, 6981,0747 mu ve 6613,3887 mu’dur.

Çizelge 4.28. Durum-9 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,7498	0,7497	0,7482	0,7498	0,7500	0,6936	0,6587	0,7422	0,5255	0,7282	0,6387	0,6370	0,1000	0,4931	0,7437
12	Güneş	0,2660	0,2851	0,4049	0,3169	0,4090	0,3946	0,4224	0,3147	0,3133	0,1667	0,4553	0,4594	0,1163	0,4709	0,2309
	Doğalgaz	0,9362	1,0695	0,9146	1,0059	1,4020	1,0650	1,4860	1,3017	1,7173	1,5595	0,6321	1,1946	1,8000	1,6092	1,4504
19	Elektrik	1,1268	1,1268	1,1269	1,1268	0,8607	1,6961	1,1314	1,2259	1,1799	1,1265	1,1255	1,5860	1,7500	1,2981	1,7455
	Güneş	0,2539	0,3524	0,2859	0,4591	0,4998	0,5000	0,5000	0,4580	0,2236	0,3118	0,5000	0,2707	0,1000	0,4143	0,2671
	Doğalgaz	0,9973	0,9728	0,9949	0,9407	0,8693	0,7832	0,9907	0,9381	0,9568	0,7674	1,0000	0,9528	0,9614	0,7516	0,7734
26	Rüzgar	0,3498	0,4207	0,4589	0,7380	0,6444	0,2449	0,7500	0,6293	0,5493	0,5150	0,4593	0,3883	0,5125	0,4360	0,5610
	Doğalgaz	0,7175	0,7945	0,7893	1,0578	0,8464	1,0680	0,2955	0,9087	0,4651	0,8367	1,1000	0,6844	0,4361	0,9643	1,0826
32	Rüzgar	0,5332	0,4008	0,4205	0,6387	0,4309	0,7497	0,1000	0,4830	0,6295	0,4961	0,7500	0,7133	0,4491	0,5687	0,4228
	Güneş	0,2971	0,3023	0,2379	0,3290	0,2928	0,2149	0,5000	0,2326	0,3257	0,3755	0,1122	0,4850	0,5000	0,3164	0,2769
	Doğalgaz	1,7988	1,7995	1,7993	1,7107	1,5747	1,7331	1,8000	1,5955	1,6688	1,6025	1,7836	1,7427	1,7133	1,5689	1,5283
	Isı	0,8990	0,8985	0,8994	0,7213	0,9000	0,8876	0,9000	0,8359	0,7828	0,8796	0,9000	0,8163	0,8193	0,7706	0,8705
55	Elektrik	1,6708	1,6711	1,6739	1,6708	1,7162	1,7116	1,6461	1,6061	1,6689	1,6675	1,6717	1,7304	1,6267	1,6758	1,6406
	Rüzgar	0,4532	0,3850	0,4157	0,2311	0,4136	0,1000	0,1000	0,1711	0,4042	0,4738	0,5995	0,1042	0,6000	0,4344	0,4262
	Güneş	0,3823	0,3149	0,3594	0,3752	0,2404	0,4172	0,1000	0,3534	0,4297	0,3516	0,3613	0,3557	0,1927	0,3467	0,4604
	Doğalgaz	0,1003	0,1003	0,1003	0,1011	0,1000	0,1000	0,1191	0,1005	0,1006	0,1005	0,1051	0,1793	0,1000	0,2486	0,1000
59	Elektrik	0,7496	0,7498	0,7499	0,7064	0,6365	0,3092	0,7500	0,7123	0,7486	0,7485	0,1000	0,6717	0,6756	0,6524	0,3503
	Rüzgar	0,5727	0,5218	0,4628	0,1979	0,5414	0,4712	0,6000	0,5002	0,4022	0,4997	0,6000	0,1339	0,6000	0,4725	0,3881
	Doğalgaz	0,2142	0,2024	0,2016	0,2259	0,2000	0,2000	0,8012	1,3276	0,4540	0,2010	0,2000	0,3098	0,2000	1,4419	0,2007
	Isı	0,1009	0,1006	0,1058	0,1299	0,1356	0,1000	0,3504	0,3475	0,3053	0,1016	0,1000	0,3356	0,1000	0,2731	0,1002
Toplam Maliyet (mu)		5206,9680	5193,8635	5184,0909	5325,4488	5527,4859	5508,4914	5540,7893	5585,4354	5488,1552	5316,0489	5276,3018	5637,0510	5488,3377	5769,5399	5447,0142
Toplam Kayıp (pu)		2,9491	2,9859	2,9362	2,8488	2,8721	2,9438	2,9216	2,8782	2,8996	2,8560	2,9728	2,9385	2,9470	2,8348	2,8908
Amaç Fonksiyonu (mu)		6344,4240	6342,6288	6311,6236	6449,2530	6703,4503	6709,6632	6739,8958	6776,2547	6666,9504	6440,6779	6438,1771	6864,0429	6686,4393	6981,0747	6613,3887
Hesaplama Zamanı (s)		1458,0688	1230,6318	1226,3553	1225,1511	1226,8015	1386,7325	1191,6127	1227,4287	1239,1371	1228,4222	1152,7823	1224,6549	1154,9225	1237,5734	1237,4991

Çizelge 4.29’da, Durum-9 için algoritmalarından elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk fonksiyonu değerleri verilmiştir. FDB-LSHADESPACMA algoritması, minimum uygunluk fonksiyonu değerine göre ikinci sırada yer alırken, ortalama uygunluk fonksiyonu değeri (6371,6888 mu) ile ilk sırada yer almıştır.

Çizelge 4.29. Durum-9 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	6344,4240	6386,6633	6371,6888	10,8263
LSHADESPACMA	6342,6288	6473,0990	6423,9099	35,4741
LSHADE	6311,6236	6409,0848	6374,3787	27,0115
MPA	6449,2530	6902,4778	6703,6068	117,8505
EO	6703,4503	7135,9991	6930,1948	106,7461
BMO	6709,6632	6984,0492	6879,6849	66,2037
AEFA	6739,8958	7244,7754	7023,8726	146,5968
AEO	6776,2547	7194,6166	7065,3463	101,9270
SDO	6666,9504	7029,1073	6895,9430	96,5246
AGDE	6440,6779	6689,5981	6627,2158	54,1935
COA	6438,1771	6720,9184	6609,0315	78,9432
SSA	6864,0429	7350,1616	7122,0940	151,5300
MFO	6686,4393	7066,3099	6933,6551	117,2292
GSA	6981,0747	7285,0416	7161,1311	88,8489
GA	6613,3887	6910,8793	6817,6925	74,4507

4.4.10. Durum-10 için Simülasyon Sonuçları

Bu durum için amaç fonksiyonu toplam enerji hub maliyetinin minimize edilmesi olup, Test Sistemi 4 için uygulanmıştır. Çizelge 4.30’da algoritmalarından elde edilen optimal çözüm değerleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre, FDB-LSHADESPACMA, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, COA, SSA, LSHADE-SPACMA, MFO, LSHADE, GSA ve GA algoritmalarından elde edilen sonuçlar sırasıyla 43555,1178 mu, 41637,9363 mu, 41655,5495 mu, 41634,7092 mu, 41316,7907 mu, 42039,9864 mu, 42188,0549 mu, 42208,6307 mu, 40983,9133 mu, 42170,9662 mu, 43520,1982 mu, 41587,5121 mu, 43687,5907 mu, 42967,0488 mu ve 41947,1661 mu’dur. Bu durumda, COA 40983,9133 mu ile en iyi toplam maliyet değerini elde etmiştir. Aynı zamanda COA, bütün algoritmalar arasında 41691,9336 mu ile en iyi ortalama değere sahiptir.

Çizelge 4.30. Durum-10 için algoritmalarından elde edilen optimal sonuçları değerleri.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,4044	0,2969	0,3669	0,2881	0,2421	0,1000	0,1000	0,1928	0,1952	0,3577	0,7500	0,6753	0,6959	0,3035	0,5244
2	Elektrik	0,6579	0,7088	0,8791	0,4555	0,4000	2,1118	0,4000	0,6592	0,8063	1,2829	0,4000	0,4104	0,4000	0,5930	1,1468
	Doğalgaz	0,8462	0,8267	0,9197	0,9918	0,5000	1,5713	0,5000	1,0726	1,0148	1,2932	0,5000	0,8066	0,5000	1,1685	0,7235
3	Elektrik	0,6235	0,6402	0,6563	0,8662	1,8357	1,0551	0,4000	1,5868	0,6658	0,4514	0,4000	0,4151	0,5546	0,6704	0,4633
	Doğalgaz	0,3618	0,5594	0,5696	0,1456	0,1264	0,2834	0,1000	0,3315	0,6410	0,3449	0,1000	0,2467	0,9122	0,7403	0,8120
4	Elektrik	0,3897	0,4020	0,4586	0,6422	0,5558	0,5321	0,2000	0,4118	0,2431	0,6058	1,2500	0,3803	0,2000	0,4938	0,5838
	Doğalgaz	0,3587	0,3498	0,4177	0,2074	0,3056	0,2000	0,2000	0,5394	0,2554	0,3241	1,0000	0,9032	0,2000	0,4583	0,4542
5	Elektrik	0,2742	0,2625	0,4535	0,4838	0,1619	0,1000	0,1000	0,2849	0,1946	0,1785	0,1000	0,4528	0,7500	0,3130	0,1018
	Isı	0,2856	0,3395	0,3218	0,1475	0,1000	0,1000	0,1000	0,1935	0,1691	0,4045	0,1000	0,3525	0,1098	0,2455	0,5198
6	Elektrik	0,4533	0,4807	0,5898	0,5858	0,2000	0,4328	0,2000	0,2972	0,6456	0,4874	0,2000	0,3415	0,2000	0,2785	0,5492
7	Elektrik	0,3985	0,4062	0,4360	0,1184	0,1000	1,2638	0,1000	0,9337	0,4023	0,7721	0,1000	0,2697	0,1000	0,2220	0,6018
	Doğalgaz	0,4254	0,4562	0,5562	0,4142	0,4849	0,7139	0,2000	0,2390	0,4595	0,6964	0,2000	0,3698	0,2000	0,5365	0,9396
8	Elektrik	0,5694	0,5141	0,5582	0,9107	0,3195	0,5919	0,3000	1,4220	0,3650	0,5050	0,3000	0,3402	0,3000	0,5339	0,5982
	Doğalgaz	0,4178	0,4479	0,5158	0,9797	0,1000	0,1538	0,1000	0,1020	0,2432	0,3227	0,1000	0,2418	0,1000	0,4477	0,4758
	Isı	0,3947	0,3482	0,2912	0,1161	0,1107	0,1000	0,7000	0,2869	0,1417	0,3329	0,1000	0,3481	0,1000	0,1835	0,3292
10	Rüzgar	0,2413	0,2612	0,3182	0,2640	0,1003	0,1975	0,1000	0,2162	0,2249	0,4303	0,1000	0,5350	0,1047	0,2419	0,2777
	Doğalgaz	0,7933	0,5764	0,7365	0,2190	0,2000	1,7217	0,2000	1,3606	0,3441	0,7011	1,9000	0,2604	0,2683	0,3982	0,3766
11	Güneş	0,3215	0,2917	0,2583	0,3182	0,1000	0,1000	0,1000	0,1329	0,2235	0,2101	0,5000	0,2397	0,2328	0,4278	0,2383
	Doğalgaz	1,2749	1,2507	1,3858	1,8198	1,8876	2,7854	0,1000	2,8719	0,9175	1,7083	2,6894	0,1708	1,7851	1,6252	1,2960
	Isı	0,2972	0,4352	0,3539	0,1015	0,2963	0,1141	0,1000	0,1833	0,3196	0,5581	0,9000	0,1530	0,1073	0,3630	0,1984
13	Elektrik	0,3855	0,3471	0,2883	0,1014	0,7500	0,3057	0,7500	0,1279	0,2200	0,1746	0,1000	0,1393	0,7500	0,3255	0,1089
	Doğalgaz	0,4425	0,3578	0,3727	1,6481	1,4230	0,1000	0,1000	0,1036	0,3867	0,7397	2,4373	0,2583	0,1000	0,3726	0,1295
14	Rüzgar	0,2782	0,3733	0,2538	0,5688	0,4828	0,1000	0,1000	0,1521	0,3061	0,3241	0,4001	0,3471	0,1000	0,1937	0,1370
	Isı	0,2628	0,2864	0,2089	0,1161	0,3137	0,1035	0,1000	0,1194	0,1820	0,2497	0,1000	0,2860	0,4000	0,3166	0,2598
15	Güneş	0,3246	0,3275	0,2103	0,1001	0,2955	0,2111	0,5000	0,1654	0,1504	0,2426	0,1000	0,1225	0,4970	0,4122	0,3015
	Doğalgaz	0,3424	0,3106	0,3132	0,9805	0,8331	0,1000	0,5321	0,1053	0,5058	0,3758	0,1000	0,1317	0,1000	0,3917	0,2937
	Isı	0,4544	0,4353	0,3516	0,3087	1,2393	0,2029	0,2000	0,2311	0,5611	0,4461	0,2000	0,2039	0,2000	0,6994	0,2268
16	Elektrik	0,3793	0,4158	0,4269	1,9020	3,0000	2,3790	0,1000	0,9144	1,3565	0,3129	3,0000	0,5972	0,5404	0,4300	0,1738
	Rüzgar	0,4456	0,2606	0,2901	0,1004	0,1000	0,1000	0,7500	0,2056	0,1598	0,1940	0,1000	0,5728	0,1004	0,3941	0,1970
	Güneş	0,2415	0,2664	0,2906	0,2867	0,2555	0,1393	0,1000	0,4248	0,1204	0,1417	0,5000	0,3706	0,4777	0,1848	0,1684
17	Elektrik	0,3849	0,4359	0,4511	0,2188	0,3832	1,0894	1,1000	0,4849	0,7828	0,5402	0,2000	0,7175	0,2000	0,3534	0,4352
	Rüzgar	0,3978	0,4209	0,3953	0,3492	0,1387	0,1000	0,1000	0,1283	0,4157	0,3688	0,7500	0,1445	0,1000	0,2479	0,2460
	Doğalgaz	0,4454	0,3918	0,3622	0,5947	0,2347	0,1036	0,1000	0,4640	0,5657	0,5271	0,1000	1,0254	0,1049	0,6161	0,2309

Çizelge 4.30. (devam) Durum-10 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
18	Elektrik	0,4793	0,4278	0,4845	0,2483	0,2265	0,2000	0,2000	0,4770	0,2835	0,6717	0,5336	0,2116	0,2000	0,3024	0,5623
	Güneş	0,2483	0,2658	0,2755	0,1531	0,5000	0,1000	0,5000	0,1167	0,2009	0,2835	0,1000	0,3822	0,5000	0,3707	0,2476
	Doğalgaz	0,4534	0,5782	0,5702	0,2029	0,6497	0,2000	1,0000	0,4998	0,8601	0,4727	1,0000	0,7394	0,4919	0,6875	0,6646
20	Elektrik	0,6711	0,7751	0,7337	2,0255	0,4000	0,6778	0,4000	0,4547	0,6217	0,5177	0,4000	1,9489	0,4108	1,0723	0,4391
	Güneş	0,3154	0,2708	0,2179	0,1118	0,1000	0,2077	0,1000	0,1331	0,3645	0,1763	0,5000	0,4042	0,3736	0,3522	0,3012
	Isı	0,2974	0,3191	0,3324	0,2489	0,4532	0,2000	0,2000	0,3435	0,3971	0,2823	0,5000	0,3184	0,4979	0,3335	0,2181
21	Elektrik	0,5773	0,6627	0,6733	0,4161	2,5000	0,4000	2,1521	0,4247	0,6681	0,5018	0,4000	0,4643	0,4000	0,6925	1,2473
	Rüzgar	0,4034	0,3720	0,3142	0,2977	0,1000	0,2624	0,7500	0,6741	0,1790	0,4142	0,1000	0,1087	0,7500	0,5029	0,2227
22	Rüzgar	0,3123	0,3851	0,3427	0,2839	0,3222	0,1000	0,1000	0,3163	0,2068	0,1691	0,1000	0,2180	0,3803	0,4335	0,2107
	Doğalgaz	0,4748	0,4769	0,5127	0,3391	0,3182	0,2000	0,2000	0,8128	0,6447	0,3149	0,2000	0,2787	2,6968	0,5454	0,3024
	Isı	0,3022	0,3159	0,3019	0,3643	0,2000	0,2000	0,2000	0,2603	0,2117	0,3119	0,2000	0,4118	0,4453	0,3807	0,3269
24	Güneş	0,2567	0,3437	0,2610	0,3816	0,1199	0,1153	0,5000	0,2150	0,1567	0,2460	0,1000	0,1367	0,1088	0,3519	0,2612
	Doğalgaz	0,3466	0,4454	0,3757	1,0605	0,1000	0,5471	2,0000	0,4335	0,8943	0,5616	0,2036	0,6029	2,0000	0,2111	0,1801
	Isı	0,4559	0,4362	0,4027	0,4919	0,2286	0,2034	0,2000	0,2012	0,3671	0,2617	1,7000	0,3478	0,2000	0,3147	0,6886
25	Elektrik	0,3355	0,2411	0,3099	0,1218	0,1089	0,7183	0,5310	0,1751	0,3094	0,2743	0,1000	0,4703	0,7500	0,3931	0,3533
	Doğalgaz	0,5232	0,4747	0,4600	0,7541	0,3915	0,7975	0,2000	0,4854	0,4387	0,6140	0,9999	0,2809	1,0000	0,3999	0,7350
	Isı	0,4465	0,3616	0,3614	0,1014	0,1169	0,4173	0,1000	0,4672	0,2498	0,2325	0,1000	0,1367	0,1000	0,5057	0,2466
27	Elektrik	0,3940	0,2572	0,2939	0,3595	0,2171	0,6758	0,7500	0,5723	0,2277	0,6963	0,1000	0,5176	0,1000	0,4140	0,1807
	Doğalgaz	0,6176	0,8055	0,5121	0,4557	0,5203	0,1000	1,1000	0,1839	1,0400	0,6798	1,1000	0,8505	1,1000	0,9538	0,3011
	Isı	0,4023	0,3972	0,5387	0,2150	0,2011	0,2509	0,2000	0,2038	0,2113	0,3043	0,2000	0,4303	0,2000	0,3954	0,2278
28	Elektrik	0,5610	0,4366	0,4560	0,2785	1,2375	0,2907	1,2500	0,3016	0,9711	0,3032	1,2500	0,2973	0,2000	0,3066	0,2011
	Güneş	0,2553	0,2239	0,2653	0,2607	0,3786	0,1000	0,5000	0,2333	0,3686	0,2531	0,5000	0,3137	0,3807	0,2244	0,2891
	Doğalgaz	0,3842	0,3077	0,3892	0,3701	0,1885	0,3568	0,1000	0,2130	0,1859	0,3565	0,6366	0,2702	0,1000	0,1723	0,4906
30	Elektrik	0,4529	0,6233	0,4632	0,4654	0,4779	0,3469	0,8659	0,2061	0,5923	0,8116	0,2000	0,2639	0,2000	0,2432	0,8097
	Güneş	0,3187	0,2685	0,2775	0,1000	0,1427	0,2430	0,5000	0,1655	0,1475	0,3377	0,1000	0,2914	0,1487	0,2279	0,1243
	Doğalgaz	0,4965	0,4365	0,3869	0,2687	0,3423	0,2000	1,8000	0,2479	0,5003	1,0036	0,2000	0,3157	0,9803	0,4172	0,4140
31	Elektrik	0,6418	0,7424	0,6789	1,2856	1,1755	0,4000	0,4000	1,3762	0,4427	0,6106	2,5000	0,4494	0,4000	0,5741	1,1954
	Rüzgar	0,2975	0,4434	0,2913	0,3988	0,2084	0,4443	0,7500	0,1975	0,1710	0,5207	0,7500	0,1506	0,7500	0,2959	0,1659
	Doğalgaz	0,4531	0,6077	0,5359	0,4692	0,2068	0,1000	0,1000	0,8934	0,5738	0,1655	0,1000	0,4087	0,6795	0,4901	0,1864
33	Elektrik	0,3710	0,4115	0,5108	0,2755	0,4710	1,0472	0,2000	0,2251	0,2387	0,4271	0,2000	0,2452	0,6560	0,3055	0,2034
	Güneş	0,2449	0,2541	0,2882	0,1494	0,1094	0,4749	0,1000	0,1715	0,2010	0,2524	0,5000	0,1168	0,1000	0,3634	0,1269
	Doğalgaz	0,7357	1,0209	1,0247	1,8712	1,9000	0,2242	1,9000	0,8035	1,4887	1,7454	0,2005	1,2081	0,3273	0,6773	0,7717
	Isı	0,3479	0,2818	0,3645	0,2870	0,2001	0,2000	0,2000	0,2641	0,3873	0,4299	0,5000	0,2229	0,2000	0,4458	0,4187

Çizelge 4.30. (devam) Durum-10 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
34	Elektrik	0,3861	0,4805	0,3564	0,1748	0,1000	0,2949	0,1000	0,2114	0,1431	0,9134	0,1000	0,5059	0,1000	0,4719	0,1701
	Rüzgar	0,2885	0,2544	0,3105	0,2117	0,1049	0,1000	0,1000	0,2043	0,3754	0,2902	0,6000	0,5362	0,1000	0,2364	0,1464
	Güneş	0,3493	0,2190	0,2997	0,1428	0,1721	0,1132	0,5000	0,2045	0,2914	0,1963	0,1000	0,1365	0,2629	0,1537	0,1997
	Doğalgaz	0,4159	0,4703	0,4177	0,4730	0,2000	0,2000	1,0000	0,5165	0,3340	0,4167	0,2000	0,4901	0,3340	0,2708	0,3461
35	Elektrik	0,3531	0,4387	0,4918	0,9777	0,1228	1,3196	0,1000	0,4063	1,4921	0,1493	0,3681	0,1906	0,1000	0,9965	0,1019
	Rüzgar	0,4307	0,2937	0,4084	0,1287	0,1148	0,3066	0,1000	0,3289	0,1726	0,4709	0,1000	0,3116	0,1000	0,3551	0,3103
	Güneş	0,2976	0,3422	0,2692	0,1624	0,1000	0,1000	0,5000	0,3908	0,2785	0,2314	0,1000	0,3392	0,1230	0,2129	0,1141
	Doğalgaz	1,4791	1,0404	1,3056	0,3105	1,2009	1,6101	2,7000	1,3383	0,7493	1,0346	0,6436	1,7524	0,2039	1,0193	0,6404
36	Elektrik	0,5335	0,5584	0,6378	0,4027	0,5868	0,3000	1,7500	0,4110	0,8385	0,7240	0,3000	0,8127	1,7500	0,6208	1,0209
	Rüzgar	0,3077	0,2853	0,2981	0,3344	0,2259	0,1724	0,1000	0,1049	0,4897	0,4005	0,1000	0,5374	0,5859	0,2795	0,1787
	Güneş	0,2935	0,3531	0,2237	0,2326	0,1129	0,1427	0,1000	0,2150	0,1591	0,3722	0,5000	0,3246	0,1000	0,1993	0,1601
	Doğalgaz	0,4570	0,4186	0,4637	0,3008	0,2062	0,7456	0,2000	0,7025	0,3292	0,4906	0,6113	0,2113	0,5329	0,3229	0,2137
37	Elektrik	0,3808	0,3559	0,4175	0,2813	1,7324	0,7729	0,1000	0,8547	0,3125	0,1254	0,1000	0,7101	0,1018	0,2861	0,8412
	Rüzgar	0,4076	0,4254	0,3241	0,1925	0,1000	0,1567	0,1000	0,2981	0,4344	0,2149	0,1000	0,2714	0,7500	0,6139	0,5522
	Güneş	0,3426	0,3037	0,2747	0,1866	0,4986	0,1000	0,1000	0,1398	0,3596	0,1578	0,5000	0,2254	0,1000	0,4140	0,1124
	Isı	0,3899	0,5162	0,4541	0,2120	0,2319	0,7592	0,2000	0,3916	0,5809	0,2362	0,2000	0,3589	0,2338	0,4244	0,8690
38	Elektrik	0,4670	0,4598	0,4940	0,3287	1,4469	0,2000	0,2000	0,4187	0,8067	0,4229	0,2000	0,2116	0,2000	0,4982	0,7330
	Rüzgar	0,2903	0,2198	0,3535	0,2192	0,1960	0,1000	0,1000	0,3579	0,3357	0,2671	0,7500	0,2056	0,1000	0,4194	0,5861
	Güneş	0,2994	0,2600	0,2620	0,2787	0,4034	0,4078	0,5000	0,1704	0,1700	0,2947	0,1017	0,3191	0,4190	0,2073	0,3081
39	Elektrik	0,3865	0,4127	0,4416	0,1197	0,1253	0,3653	0,8896	0,4020	0,1817	0,5782	0,1000	0,1342	0,1000	0,3575	1,3825
	Rüzgar	0,3867	0,3623	0,3002	0,1092	0,3162	0,2105	0,7500	0,1260	0,1569	0,4183	0,1000	0,7443	0,1000	0,1821	0,2864
	Doğalgaz	0,3356	0,3354	0,2945	0,3320	0,7878	0,4581	2,8000	1,4881	0,2378	0,1832	0,1000	0,3921	0,1130	0,4394	0,2356
40	Elektrik	0,3792	0,3698	0,3243	0,1524	0,1004	1,8196	0,1000	0,9451	0,2151	0,3445	0,1000	0,6067	0,1000	0,3755	0,1353
	Güneş	0,2801	0,2665	0,2699	0,1002	0,1442	0,1000	0,1000	0,2062	0,1995	0,3863	0,1000	0,4387	0,4709	0,3517	0,1135
	Isı	0,2548	0,2791	0,2096	0,1206	0,1108	0,2085	0,4000	0,1144	0,1294	0,1949	0,1000	0,1636	0,4000	0,1627	0,1370
41	Rüzgar	0,2412	0,3158	0,2407	0,1941	0,1000	0,1000	0,6000	0,2532	0,1669	0,4221	0,6000	0,3395	0,1000	0,4577	0,2427
	Doğalgaz	0,3654	0,3853	0,3735	0,1052	0,2615	0,3054	0,1000	0,1752	0,3585	0,2741	1,0000	0,9588	0,1000	0,5591	0,2375
	Isı	0,2960	0,2574	0,2575	0,1798	0,2419	0,1000	0,1000	0,3054	0,1122	0,1474	0,5000	0,4205	0,1000	0,2365	0,3710
43	Elektrik	0,5286	0,5352	0,6187	0,3404	0,3000	0,3000	0,3000	0,9193	0,5842	0,3655	0,3000	0,6294	0,6268	0,3979	1,1686
	Rüzgar	0,4303	0,3741	0,3460	0,2881	0,2469	0,1294	0,4541	0,1938	0,2348	0,2845	0,7500	0,6090	0,1000	0,2548	0,4824
	Doğalgaz	0,5796	0,6458	0,5316	0,4029	0,5401	0,3697	0,3000	0,3008	0,7546	0,4430	0,3061	0,3947	1,9078	0,7859	0,3368

Çizelge 4.30. (devam) Durum-10 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
46	Elektrik	0,5728	0,3706	0,4065	0,2178	0,2512	0,2000	0,2000	0,3095	0,3222	0,2911	0,2000	1,0744	0,2000	0,5262	0,3337
	Rüzgar	0,3473	0,3492	0,3100	0,1217	0,1870	0,2441	0,1000	0,3297	0,1785	0,4317	0,1000	0,3487	0,1000	0,3445	0,1008
	Doğalgaz	0,7462	0,5417	0,5357	0,1322	0,3656	0,1759	0,1000	0,2570	0,4368	1,1796	1,4000	0,1293	1,2764	0,3809	0,4713
	Isı	0,4553	0,4295	0,3834	0,5222	0,3060	0,2000	0,2000	0,2432	0,2273	0,3935	0,2000	0,3260	0,4259	0,3506	0,2056
47	Elektrik	0,2511	0,3158	0,3302	0,1504	0,4364	0,4931	0,1000	0,1889	0,6027	0,2546	0,1002	0,6171	0,1000	0,3564	0,4664
	Güneş	0,3172	0,2795	0,2865	0,1165	0,1021	0,1000	0,1000	0,2560	0,1433	0,2508	0,5000	0,1301	0,1000	0,3372	0,2380
	Doğalgaz	0,4243	0,4304	0,3965	0,1343	0,1000	0,4992	0,1000	0,6293	1,1679	0,5994	0,1000	0,7135	0,1000	0,5012	0,4650
	Isı	0,3713	0,4139	0,4287	0,2974	0,2000	0,2000	0,2000	0,2079	0,3922	0,3702	0,2000	0,3034	1,2705	0,2346	0,2591
48	Elektrik	0,3796	0,3843	0,3991	0,3625	0,2340	0,2000	0,2000	0,4693	0,3876	0,3539	0,2000	0,2604	1,1000	0,3322	0,2202
	Rüzgar	0,3350	0,3995	0,3398	0,1081	0,1041	0,2539	0,1000	0,1645	0,1261	0,1692	0,7500	0,2242	0,7500	0,4487	0,3759
	Doğalgaz	0,9983	0,9658	0,8361	1,5323	1,0747	1,5702	0,2000	0,4724	0,4866	1,2306	0,4262	0,8533	0,2000	0,6865	0,6071
	Isı	0,3777	0,4874	0,4889	0,3294	1,0610	0,2083	0,2000	0,2691	0,3100	0,3385	0,2000	0,3791	0,2000	0,3836	0,2239
51	Elektrik	0,4795	0,3661	0,3335	0,2076	0,8743	0,1000	0,1000	0,3114	0,2641	0,4332	0,1000	0,1128	0,2422	0,4224	0,1999
	Rüzgar	0,3955	0,4081	0,3885	0,2954	0,1000	0,2523	0,1000	0,1387	0,1551	0,1091	0,1000	0,3829	0,1001	0,4580	0,1032
	Güneş	0,2956	0,2825	0,2882	0,1827	0,1000	0,1000	0,1000	0,4163	0,1260	0,2883	0,5000	0,4105	0,5000	0,1658	0,3100
	Doğalgaz	0,3939	0,4060	0,4575	1,5856	0,1896	0,1000	3,0000	0,4428	0,9002	0,1693	0,1000	0,1904	0,1000	0,5570	0,9081
52	Elektrik	0,4222	0,3981	0,4367	0,5959	0,7047	0,5210	1,1247	0,3010	0,3792	0,5358	0,1000	0,2370	0,1000	0,3820	1,0210
	Rüzgar	0,3702	0,2401	0,2559	0,1888	0,1021	0,4600	0,1000	0,1023	0,2529	0,2296	0,6000	0,4389	0,4743	0,2746	0,3093
	Güneş	0,3147	0,2648	0,2601	0,1003	0,1635	0,1651	0,5000	0,2315	0,3062	0,2620	0,2710	0,2393	0,1344	0,3099	0,1537
	Doğalgaz	0,3454	0,2955	0,3512	0,3362	0,1206	0,3607	0,1000	0,4236	0,1939	0,3917	0,1000	0,1429	0,1000	0,2370	0,3202
53	Isı	0,2791	0,3315	0,3917	0,2954	0,5653	0,1000	0,1000	0,4932	0,2555	0,4870	0,1000	0,1259	0,2445	0,3776	0,5790
	Elektrik	0,3413	0,2836	0,4706	0,1176	0,7261	0,2356	1,7500	0,4160	0,2914	0,6114	0,1000	0,3522	0,1269	0,5947	1,0418
	Rüzgar	0,3497	0,3556	0,3180	0,3613	0,1008	0,1092	0,1000	0,1023	0,4261	0,2715	0,1000	0,2832	0,6000	0,4521	0,1009
	Güneş	0,2436	0,2857	0,2831	0,1004	0,5000	0,2256	0,5000	0,2497	0,3517	0,2189	0,1000	0,1746	0,5000	0,3120	0,1803
54	Doğalgaz	1,3347	1,2455	1,2389	2,4931	0,9811	0,5869	0,1000	3,0664	1,1460	0,6318	0,1000	2,1754	3,2000	1,0781	2,9629
	Isı	0,3979	0,3429	0,2931	0,2663	0,1822	0,7963	0,9000	0,1455	0,1944	0,5711	0,9000	0,1408	0,1000	0,2482	0,4716
	Elektrik	0,4175	0,4439	0,4761	1,5952	0,2416	1,2365	1,6000	0,2680	0,9683	0,4819	0,2000	0,2780	0,2361	0,4973	0,4779
	Rüzgar	0,3281	0,2490	0,3199	0,1132	0,1299	0,6703	0,7500	0,2138	0,2492	0,1934	0,1000	0,1622	0,3800	0,1769	0,3697
54	Güneş	0,2693	0,3038	0,2739	0,1127	0,1303	0,1000	0,1000	0,1179	0,2943	0,2396	0,5000	0,4018	0,5000	0,1804	0,2300
	Doğalgaz	0,5137	0,5452	0,4192	0,2111	0,7789	1,1694	0,2000	0,2596	0,6746	0,3763	0,2000	0,2991	0,2010	0,3780	0,3043

Çizelge 4.30. (devam) Durum-10 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
56	Elektrik	0,3847	0,4491	0,3664	0,5375	0,1147	0,1808	0,1000	0,7782	0,4352	0,1842	0,1000	0,3332	0,1000	0,3499	0,3878
	Rüzgar	0,3320	0,4318	0,3171	0,1848	0,1429	0,1000	0,1000	0,4153	0,3758	0,5080	0,7461	0,2912	0,1000	0,3373	0,4050
	Güneş	0,3480	0,2552	0,2557	0,4036	0,1000	0,1000	0,5000	0,1354	0,1770	0,3950	0,5000	0,2222	0,1595	0,3178	0,1540
	Doğalgaz	0,3554	0,3554	0,4292	0,2203	0,5361	0,2833	0,2000	0,2698	0,2483	0,6189	1,0000	0,4380	1,0000	0,4272	0,4484
	Isı	0,2764	0,2950	0,3165	0,5928	0,2030	0,3402	0,9000	0,2882	0,1502	0,4149	0,1000	0,5752	0,5163	0,1776	0,5239
57	Elektrik	0,3563	0,4015	0,3505	1,3006	0,8923	0,5372	0,1000	0,5672	0,5191	0,7303	0,1000	0,1970	1,7303	0,2257	0,2595
	Rüzgar	0,2826	0,4102	0,2359	0,1282	0,1231	0,1000	0,2665	0,1823	0,2707	0,2771	0,2206	0,1321	0,1507	0,3223	0,1800
	Güneş	0,3193	0,2938	0,2519	0,1480	0,1155	0,1000	0,1000	0,1781	0,1314	0,2145	0,1000	0,2542	0,1714	0,3348	0,3810
	Doğalgaz	0,4247	0,4124	0,3907	0,7183	0,2000	0,2000	1,8000	0,2087	0,4542	0,5334	1,8000	0,2482	0,2000	0,4994	0,2524
58	Elektrik	0,4328	0,4037	0,3917	2,9566	1,5936	0,1000	0,1000	1,3192	0,9561	0,1782	2,8923	0,6577	0,9427	0,4037	0,9872
	Rüzgar	0,3245	0,3530	0,3565	0,1004	0,4228	0,3600	0,4184	0,1314	0,4521	0,1525	0,3016	0,1214	0,1000	0,5134	0,1007
	Güneş	0,3459	0,3323	0,2532	0,3950	0,2388	0,1000	0,1000	0,2233	0,1989	0,2010	0,1000	0,3630	0,1640	0,3151	0,3218
	Isı	0,4320	0,4355	0,4341	0,2172	0,2116	0,3863	0,2000	0,6188	0,5519	0,2374	0,2000	0,9186	0,2000	0,4585	0,5936
60	Elektrik	0,3455	0,4189	0,4224	0,2155	0,1000	0,1000	0,1000	0,3023	0,2918	0,3408	0,1000	0,1938	0,1000	0,3682	0,3220
	Rüzgar	0,2727	0,2899	0,3982	0,1264	0,2867	0,1000	0,7500	0,1689	0,4859	0,2415	0,7500	0,4107	0,4080	0,3055	0,1125
	Doğalgaz	0,5994	0,6093	0,5951	0,2756	1,4211	0,2000	0,9034	0,2776	0,2671	0,3107	0,2000	1,3858	0,9992	0,8694	0,6853
	Isı	0,2528	0,2997	0,2500	0,1011	0,3365	0,1485	0,5000	0,3090	0,2322	0,1820	0,1000	0,1418	0,3723	0,2813	0,2364
61	Elektrik	0,3485	0,4315	0,3944	0,2753	0,1000	0,8875	0,1000	0,5657	0,3103	0,2012	0,6005	0,2292	0,1000	0,2865	0,2501
	Rüzgar	0,3379	0,3280	0,3673	0,1393	0,5273	0,1986	0,1000	0,2494	0,1896	0,4055	0,7500	0,1549	0,4623	0,2736	0,5239
	Güneş	0,3096	0,2610	0,2440	0,1099	0,4933	0,1125	0,5000	0,1311	0,1917	0,3681	0,4999	0,1230	0,2914	0,1934	0,2308
	Doğalgaz	0,3042	0,3680	0,2827	0,2757	0,1378	0,1000	0,1000	0,2524	0,2507	0,4897	1,0000	0,9246	0,1000	0,1688	0,6159
	Isı	0,2980	0,2451	0,2415	0,1075	0,1267	0,2117	0,5000	0,1351	0,2878	0,2888	0,1000	0,4632	0,5000	0,2411	0,1584
62	Elektrik	0,3601	0,3640	0,3950	0,1001	0,1178	0,1614	1,0000	0,9905	0,1991	0,2239	0,1000	0,8624	1,0000	0,3626	0,2498
	Rüzgar	0,2359	0,3194	0,3112	0,1694	0,1442	0,1628	0,6000	0,2746	0,1725	0,2242	0,6000	0,1883	0,1025	0,1519	0,1784
	Güneş	0,3042	0,2764	0,2764	0,1106	0,3688	0,1000	0,1000	0,1381	0,2279	0,2907	0,1000	0,3491	0,5000	0,2478	0,2648
	Doğalgaz	0,4202	0,4919	0,4036	0,2008	0,2000	0,3557	1,0000	0,2248	0,3731	0,2184	0,2000	0,2604	0,2000	0,4622	0,5021
63	Elektrik	0,3890	0,3718	0,5504	0,5402	0,2375	0,6449	0,1000	0,7331	0,5271	0,2261	0,1000	0,2761	0,1000	0,5196	0,6947
	Rüzgar	0,3841	0,3152	0,2739	0,1039	0,1000	0,1000	0,1000	0,2949	0,3221	0,5336	0,7500	0,1927	0,1000	0,3211	0,5647
	Güneş	0,2346	0,2833	0,2814	0,2676	0,1000	0,4973	0,1000	0,2417	0,1359	0,2059	0,5000	0,3852	0,1000	0,3265	0,2050
	Doğalgaz	0,3694	0,4162	0,3709	0,1138	0,8970	0,1000	0,1000	0,3289	0,2122	0,4117	0,1000	0,9311	0,1174	0,3434	0,2865
	Isı	0,2519	0,2841	0,2672	0,1000	0,1001	0,1000	0,4000	0,1942	0,1785	0,2925	0,4000	0,1663	0,2752	0,1189	0,1053

Çizelge 4.30. (devam) Durum-10 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
64	Elektrik	0,3746	0,4615	0,6856	0,6051	0,3383	0,4941	0,1000	0,8161	0,9732	0,1387	0,1000	0,3547	1,7825	0,2395	0,6011
	Rüzgar	0,4069	0,4282	0,3020	0,1019	0,1000	0,1000	0,1000	0,1716	0,2539	0,3983	0,1000	0,1678	0,4956	0,2603	0,3455
	Güneş	0,3636	0,3512	0,2530	0,1330	0,1000	0,1000	0,5000	0,1970	0,1399	0,3619	0,4200	0,3030	0,1000	0,2930	0,1310
	Doğalgaz	0,4867	0,4580	0,5668	1,4291	0,2000	1,2695	0,2000	0,6031	0,3205	0,2723	0,2000	0,3472	0,2000	0,5140	0,2403
	Isı	0,2954	0,2856	0,2224	0,1041	0,1081	0,1000	0,4000	0,1702	0,2301	0,2677	0,1000	0,2103	0,1000	0,3665	0,1613
66	Elektrik	0,4379	0,4473	0,4758	0,7070	0,2093	1,0041	0,2000	0,3889	0,4621	0,3391	0,2000	1,0410	0,8441	0,2587	0,8141
	Rüzgar	0,4612	0,2877	0,2915	0,2609	0,6025	0,5250	0,1000	0,1737	0,1991	0,6212	0,2500	0,2131	0,7047	0,2256	0,1629
	Güneş	0,3408	0,2242	0,1845	0,1787	0,1077	0,3677	0,1000	0,4971	0,3550	0,2178	0,1000	0,1249	0,1320	0,2400	0,1737
	Doğalgaz	0,4861	0,4274	0,3938	0,1010	0,9651	0,2179	0,1000	0,1587	0,4016	0,2011	0,1000	0,2551	0,1611	0,4197	0,5110
	Isı	0,3174	0,2931	0,3076	0,1004	0,8484	0,1000	0,2465	0,1240	0,2290	0,2120	0,1000	0,8174	0,1000	0,3068	0,6361
67	Elektrik	0,4262	0,4098	0,5362	1,2392	1,3893	0,3503	0,2000	0,4755	0,8369	0,4870	0,2000	0,4731	0,2566	0,6245	0,3002
	Rüzgar	0,3351	0,3329	0,2905	0,4295	0,1089	0,1000	0,6000	0,4651	0,3827	0,3162	0,6000	0,2516	0,4823	0,2237	0,2755
	Güneş	0,3070	0,2522	0,2022	0,1001	0,1144	0,1000	0,5000	0,1937	0,1259	0,2806	0,5000	0,1314	0,2588	0,2927	0,3087
	Doğalgaz	0,4588	0,6557	0,5724	1,2202	0,2302	1,2752	0,1000	0,1233	1,8907	0,4097	0,1000	0,6006	0,1000	0,4794	0,4902
	Isı	0,3217	0,2869	0,2893	0,1049	0,1126	0,5289	0,1000	0,1335	0,1977	0,2843	0,1000	0,1861	0,1000	0,4653	0,1412
68	Elektrik	0,2653	0,3207	0,3533	0,1679	0,1003	0,1587	0,1000	0,3751	0,2531	0,4109	0,1000	0,1588	0,1000	0,8951	0,2426
	Rüzgar	0,3741	0,3052	0,3687	0,6471	0,6523	0,2547	0,1000	0,1441	0,3615	0,3726	0,1000	0,4632	0,7500	0,3611	0,3630
	Güneş	0,2861	0,2988	0,2665	0,1102	0,1363	0,4424	0,5000	0,3328	0,2197	0,3543	0,1000	0,1979	0,5000	0,2194	0,3955
	Doğalgaz	0,3996	0,3877	0,5550	0,1095	1,0218	0,9590	0,1000	0,8277	0,5505	0,4800	0,1000	0,5167	0,1000	0,2684	0,1065
	Isı	0,2575	0,3659	0,3372	0,1003	0,6681	0,5974	0,1000	0,3013	0,1572	0,1528	0,1000	0,4370	0,1000	0,6268	0,6066
69	Elektrik	0,3845	0,4277	0,3332	0,1009	0,1000	0,6454	0,1000	0,7515	0,9105	0,7991	0,1000	0,5520	0,1000	0,2389	0,1313
	Rüzgar	0,3463	0,3284	0,2707	0,3366	0,3160	0,4900	0,1000	0,3594	0,3014	0,2523	0,1000	0,2915	0,5964	0,3537	0,2454
	Güneş	0,2435	0,3215	0,2407	0,2764	0,1224	0,2197	0,1000	0,2400	0,1964	0,1923	0,1000	0,1629	0,4681	0,2748	0,1654
	Doğalgaz	0,5836	0,5500	0,7439	0,6730	0,1923	1,6718	0,1000	0,3996	1,0952	0,6288	0,1000	0,3352	0,4493	0,7954	0,5710
	Isı	0,5067	0,3714	0,4803	0,2097	0,3272	0,7122	0,2000	0,5351	0,2417	0,2760	0,2000	0,4364	0,2000	0,4092	0,6021
Toplam Maliyet (mu)		43555,118	43520,198	43687,591	41637,936	41655,550	41634,709	41316,791	42039,986	42188,055	42208,631	40983,913	42170,966	41587,512	42967,049	41947,166
Toplam Kayıp (pu)		12,0419	12,3221	12,4188	11,5159	11,5022	11,4288	16,8051	13,0355	12,4005	12,5112	11,7521	12,3167	12,7083	13,1891	12,4999
Amaç Fonksiyonu (mu)		43555,118	43520,198	43687,591	41637,936	41655,550	41634,709	41316,791	42039,986	42188,055	42208,631	40983,913	42170,966	41587,512	42967,049	41947,166
Hesaplama Zamanı (s)		105390,39	98614,45	95704,14	98491,43	95443,97	97125,88	94750,64	94888,67	95690,66	98237,44	92056,16	94806,72	99106,91	97174,04	104657,00

Durum-10 için algoritmalarından elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk fonksiyonu değerleri Çizelge 4.31’de verilmiştir. Çizelge 4.31 detaylı olarak incelendiğinde, COA algoritması hem minimum hem de ortalama uygunluk fonksiyonu değerinde göre birinci sırada yer almıştır. Ancak, FDB-LSHADESPACMA bütün algoritmalar içerisinde ortalama uygunluk fonksiyonu değerine göre on üçüncü sırada yer alırken, LSHADESPACMA ise on dördüncü olmuştur.

Çizelge 4.31. Durum-10 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	43555,1178	43646,4173	43617,7293	20,5913
LSHADESPACMA	43520,1982	43749,1522	43693,8753	62,0544
LSHADE	43687,5907	43817,5068	43773,6773	34,9163
MPA	41637,9363	42408,7217	42171,5650	190,8732
EO	41655,5495	42579,5513	42134,2613	219,6742
BMO	41634,7092	42413,0245	42061,4797	196,4821
AEFA	41316,7907	42385,0047	41965,4918	304,8153
AEO	42039,9864	42773,5637	42602,1902	144,4522
SDO	42188,0549	42892,8885	42652,9188	210,6544
AGDE	42208,6307	42903,4652	42640,1616	158,0358
COA	40983,9133	41977,0660	41691,9336	303,7537
SSA	42170,9662	42662,4745	42464,8601	154,9537
MFO	41587,5121	42388,4260	42062,3739	218,1026
GSA	42967,0488	43419,4067	43220,6552	132,6158
GA	41947,1661	42682,5569	42401,6982	224,7982

4.4.11. Durum-11 için Simülasyon Sonuçları

Durum 11’de, Test Sistemi-4 için amaç toplam enerji hub kayıplarının minimize edilmesidir. Çizelge 4.32’de verilen algoritmalarından elde edilen optimal çözüm değerlerine göre, COA 10,5637 pu değeri ile minimum uygunluk fonksiyon değerini elde etmiştir. FDB-LSHADESPACMA, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, SSA, LSHADE-SPACMA, MFO, LSHADE, GSA ve GA’dan elde edilen kayıp değerleri sırasıyla, 11,1848 pu, 11,1699 pu, 10,8760 pu, 11,3337 pu, 10,8422 pu, 11,4186 pu, 11,3111 pu, 11,5259 pu, 11,3721 pu, 11,0850 pu, 10,6098 pu, 11,9542 pu, 11,5611 pu ve 11,4810 pu’dur.

Çizelge 4.32. Durum-11 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,3164	0,3000	0,3242	0,2204	0,2594	0,1556	0,1000	0,2907	0,1836	0,1106	0,1000	0,1928	0,1000	0,5242	0,4368
2	Elektrik	0,8221	0,7142	0,7852	2,0905	0,6520	0,4000	0,4000	0,4783	0,5893	0,5097	0,4000	0,8044	2,5000	0,8872	1,0062
	Doğalgaz	0,9203	0,6702	0,8865	0,7583	0,5000	0,5000	0,5000	0,5213	0,7504	0,6022	0,5000	0,5538	0,5002	0,8126	0,6494
3	Elektrik	0,6645	0,5858	0,6625	1,7932	0,7918	0,7643	0,4000	0,4999	0,9126	0,6286	1,8114	0,5212	0,4000	0,7106	0,4553
	Doğalgaz	0,4135	0,5572	0,5362	0,2317	0,3180	0,4864	0,1000	0,2100	0,3453	0,2750	0,1000	0,8931	0,1782	0,8639	0,1983
4	Elektrik	0,3985	0,3860	0,4740	0,2707	0,2000	0,3465	0,2000	0,2772	0,3909	0,8529	0,2000	0,3419	0,2000	0,4263	0,6682
	Doğalgaz	0,3977	0,5442	0,4012	0,2059	0,2000	0,2109	1,0000	0,2145	0,3839	0,4418	1,0000	0,2824	1,0000	0,5010	0,6277
5	Elektrik	0,2071	0,2125	0,3189	0,2566	0,2860	0,1573	0,1000	0,2905	0,1512	0,3795	0,7034	0,6561	0,1006	0,3762	0,3915
	Isı	0,3312	0,2862	0,2784	0,4778	0,4913	0,1000	0,1000	0,1419	0,2067	0,4540	0,1000	0,1193	0,1192	0,3056	0,2328
6	Elektrik	0,2581	0,3893	0,4579	0,6482	1,1899	0,3349	0,2000	0,6678	0,9325	0,3375	0,4576	0,4904	1,2907	0,9053	0,3057
7	Elektrik	0,4567	0,6281	0,3755	0,3695	0,9306	0,1727	0,1000	0,8161	0,3954	0,1117	0,1000	0,2784	0,1000	0,4220	0,8877
	Doğalgaz	0,5190	0,5137	0,5232	0,3681	0,6893	0,8693	0,2000	0,4405	0,4796	0,3843	0,2000	0,2905	0,2000	0,5485	0,4649
8	Elektrik	0,6455	0,5297	0,6940	0,8956	0,3292	1,1474	0,3000	0,4580	0,8342	0,3031	0,3000	0,3264	0,3187	0,5994	0,4807
	Doğalgaz	0,3043	0,2088	0,3748	0,2057	0,2250	0,2452	0,1000	0,2000	0,3954	0,1204	0,1000	0,8115	0,1580	0,3430	0,4233
	Isı	0,3907	0,2344	0,2764	0,4225	0,3388	0,1000	0,1000	0,2752	0,1466	0,1564	0,7000	0,1854	0,7000	0,1755	0,3707
10	Rüzgar	0,2870	0,2128	0,2721	0,2301	0,1311	0,1761	0,1000	0,2596	0,1255	0,3216	0,1843	0,3262	0,6000	0,3264	0,4392
	Doğalgaz	0,6649	0,8303	0,6696	0,2314	0,2283	0,2000	0,2000	0,3414	0,5167	0,9148	0,7893	1,7690	0,2000	0,9468	0,9368
	Güneş	0,3444	0,1097	0,2674	0,1501	0,1198	0,1000	0,5000	0,2009	0,2586	0,2224	0,1000	0,1641	0,5000	0,3217	0,1678
11	Doğalgaz	1,5484	1,0593	1,5052	2,6318	2,1971	0,3784	3,0000	2,5219	2,3189	1,3974	3,0000	0,1837	0,1000	2,2860	1,1346
	Isı	0,1775	0,2346	0,3149	0,4156	0,1018	0,1000	0,1000	0,1481	0,2852	0,1626	0,1000	0,1356	0,1530	0,2871	0,1000
13	Elektrik	0,3731	0,3358	0,3006	0,1150	0,7345	0,3669	0,1000	0,3095	0,5432	0,3708	0,7500	0,1986	0,1000	0,2671	0,1241
	Doğalgaz	0,3016	0,3479	0,3615	0,1321	0,3117	0,1000	3,2000	0,7358	0,2748	0,3577	3,2000	0,1837	0,1000	0,4373	0,1858
14	Rüzgar	0,2632	0,2957	0,3305	0,1101	0,4910	0,2819	0,6000	0,1441	0,1855	0,2562	0,6000	0,1956	0,4059	0,2126	0,5400
	Isı	0,2144	0,2187	0,2251	0,2867	0,1098	0,1499	0,1000	0,1445	0,1495	0,1733	0,4000	0,3963	0,4000	0,2329	0,1000
	Güneş	0,3229	0,2216	0,2353	0,4227	0,1193	0,1000	0,1000	0,2248	0,1630	0,2032	0,1584	0,2947	0,1000	0,2504	0,1024
15	Doğalgaz	0,3680	0,3960	0,3436	0,1588	0,9836	0,1000	0,1000	0,3549	0,3154	0,3127	0,1000	0,6907	0,3671	0,2302	0,2137
	Isı	0,4040	0,3814	0,4329	0,2080	0,2088	0,2000	0,2000	0,4581	0,5433	0,2045	1,4000	0,6707	1,1284	0,4846	0,3850
	Elektrik	0,3314	0,7021	0,4308	0,4975	0,7450	2,3380	0,1000	0,8794	0,4106	0,3016	0,1000	1,2681	0,1000	0,3643	0,2841
16	Rüzgar	0,2792	0,4355	0,3498	0,3165	0,2599	0,1789	0,7500	0,3271	0,3212	0,4087	0,1161	0,2693	0,1050	0,2971	0,3033
	Güneş	0,1981	0,4476	0,2371	0,2457	0,1013	0,1000	0,1000	0,4201	0,1357	0,3835	0,1000	0,2570	0,1000	0,2599	0,3581
17	Elektrik	0,5266	0,5815	0,6306	0,3309	1,0761	0,9676	1,1000	0,8670	0,3167	0,7400	0,2000	0,7899	0,7273	0,3303	0,5944
	Rüzgar	0,4068	0,1554	0,3608	0,1353	0,1009	0,1000	0,1000	0,1293	0,1226	0,2136	0,1000	0,6005	0,1000	0,2784	0,2175
	Doğalgaz	0,3876	0,3072	0,4530	0,2946	0,1109	0,1000	0,1000	0,5904	0,6472	0,1789	0,4324	0,5578	0,1429	0,6665	0,2174

Çizelge 4.32. (devam) Durum-11 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
18	Elektrik	0,3322	0,7294	0,4701	0,3036	0,2097	0,2000	1,5000	0,2002	0,3642	0,4304	1,5000	0,2044	0,3314	0,3010	0,2806
	Güneş	0,3574	0,3801	0,2254	0,1774	0,1064	0,5000	0,1000	0,1757	0,1688	0,2805	0,5000	0,4468	0,1000	0,2936	0,2728
	Doğalgaz	0,4789	0,7885	0,5770	0,4739	0,2000	0,2000	1,0000	0,8891	0,3695	0,4308	1,0000	0,3458	0,9867	0,4409	0,4317
20	Elektrik	0,6717	0,5816	0,7207	0,6997	0,9227	0,8219	0,4000	1,0940	0,8306	0,6079	2,5000	1,6356	2,5000	0,5186	1,4560
	Güneş	0,3355	0,1555	0,2765	0,1021	0,1805	0,1677	0,1000	0,1687	0,1658	0,4460	0,1000	0,3517	0,4166	0,3221	0,2345
	Isı	0,3705	0,2147	0,3109	0,2419	0,2496	0,2000	0,5000	0,2005	0,2623	0,3220	0,2000	0,3661	0,5000	0,2512	0,2572
21	Elektrik	0,5417	0,6710	0,7076	1,4290	0,4000	0,4096	0,4000	0,5889	0,9216	0,6312	0,4000	0,4783	0,4000	0,7226	0,4432
	Rüzgar	0,2977	0,1001	0,2807	0,3541	0,3955	0,1000	0,1000	0,2310	0,1953	0,2537	0,1000	0,1205	0,7500	0,2802	0,1311
22	Rüzgar	0,3897	0,2395	0,3349	0,2600	0,5291	0,1000	0,1000	0,2455	0,1212	0,2205	0,7500	0,6141	0,7500	0,2863	0,2947
	Doğalgaz	0,4224	0,5321	0,5248	0,2016	0,2001	2,7000	0,2000	0,4649	0,4150	0,8601	0,2000	0,2428	0,2000	0,3932	0,2000
	Isı	0,3248	0,2323	0,3281	0,2274	0,4973	0,2000	0,2000	0,4853	0,4610	0,2712	0,2000	0,2055	0,4874	0,2853	0,3218
24	Güneş	0,2628	0,2681	0,2751	0,4267	0,4192	0,1000	0,1000	0,1912	0,2485	0,1602	0,1000	0,1969	0,1144	0,3491	0,2297
	Doğalgaz	0,2230	0,2836	0,4207	0,1576	0,1010	0,2651	0,1000	0,5516	0,6060	0,1694	0,1000	0,3863	0,1000	0,3913	0,6189
	Isı	0,6311	0,4836	0,4433	0,2862	0,2000	0,2000	0,2000	0,3558	0,3592	0,2175	1,5418	0,2458	0,6096	0,3797	0,5134
25	Elektrik	0,2171	0,3259	0,3107	0,2463	0,3719	0,3087	0,1000	0,3786	0,1834	0,1744	0,5290	0,5661	0,6813	0,3680	0,4299
	Doğalgaz	0,5255	0,7049	0,5117	0,6115	0,2496	0,3765	0,2000	0,4883	0,2851	0,2342	0,2441	0,5228	0,2000	0,4202	0,2000
	Isı	0,4763	0,5486	0,3407	0,3187	0,1000	0,9000	0,9000	0,1018	0,3301	0,1141	0,9000	0,1957	0,1000	0,3191	0,1015
27	Elektrik	0,4458	0,3459	0,3845	0,5095	0,1000	0,1000	0,1000	0,5339	0,2374	0,5192	0,1000	0,2982	0,1000	0,1894	0,3386
	Doğalgaz	0,6150	0,7481	0,4959	0,8431	0,1254	0,1000	1,1000	0,8432	0,7432	0,5007	0,7404	0,3582	1,1000	0,8806	0,9244
	Isı	0,2224	0,3954	0,4272	1,1268	0,2031	0,2000	0,2000	0,6225	0,2226	0,9712	0,2000	0,3198	0,3227	0,4427	0,2084
28	Elektrik	0,5530	0,6168	0,4509	0,5891	0,2002	0,2000	1,2500	0,6614	1,2447	0,6294	1,2500	0,2148	0,2000	0,2558	0,4998
	Güneş	0,2321	0,2574	0,2434	0,1342	0,2498	0,2458	0,5000	0,2162	0,4014	0,4487	0,5000	0,3607	0,1423	0,3511	0,1196
	Doğalgaz	0,2229	0,1000	0,4085	0,3706	0,4369	0,1000	0,1000	0,6537	0,2738	0,3405	0,1000	0,4935	0,1000	0,3712	0,5591
30	Elektrik	0,3447	0,4579	0,5624	0,2064	0,3536	0,2000	1,2500	0,9269	0,3726	0,5847	0,2000	0,2516	0,2063	0,6143	0,5617
	Güneş	0,3395	0,2605	0,2746	0,1328	0,1000	0,1000	0,1000	0,1427	0,1956	0,2388	0,5000	0,1148	0,5000	0,3892	0,1955
	Doğalgaz	0,4867	0,2731	0,5502	0,4414	0,2000	0,8547	0,2000	0,4958	0,6174	0,2125	0,2000	0,7935	0,2000	0,3221	0,2002
31	Elektrik	0,7053	0,8074	0,6710	1,2177	2,4226	0,4000	2,5000	1,2307	0,5959	0,9780	0,9009	0,4375	0,4000	0,7449	0,4083
	Rüzgar	0,2770	0,2173	0,3165	0,1626	0,4843	0,1000	0,7500	0,2645	0,6614	0,4423	0,7124	0,1329	0,1000	0,5166	0,1798
	Doğalgaz	0,6776	0,4168	0,5245	2,2890	0,2675	0,3263	0,1000	0,2287	0,5606	0,7656	0,1000	1,3777	0,2025	0,1613	1,4625
33	Elektrik	0,3779	0,4639	0,4712	1,1567	0,2364	0,2000	1,2500	0,3029	0,5273	0,2356	0,2000	0,2039	0,2000	0,4333	0,7684
	Güneş	0,1809	0,4249	0,2480	0,3202	0,1001	0,1075	0,5000	0,1689	0,2852	0,2477	0,5000	0,3428	0,5000	0,3389	0,2835
	Doğalgaz	0,9794	1,3718	1,1107	1,0385	0,5840	0,2000	0,2000	0,5016	0,7673	0,8151	0,2000	0,9221	0,3926	0,6306	0,7866
	Isı	0,4052	0,2925	0,3348	0,3715	0,2079	0,2000	0,5000	0,2743	0,3420	0,3339	0,2000	0,4647	0,2000	0,3930	0,3272

Çizelge 4.32. (devam) Durum-11 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
34	Elektrik	0,4723	0,4526	0,3459	0,1243	0,1280	0,1000	0,1000	0,4360	0,4636	0,3584	0,1000	0,3509	0,1000	0,4741	0,4219
	Rüzgar	0,3325	0,1493	0,3004	0,1371	0,4870	0,1000	0,6000	0,2762	0,4782	0,4705	0,1000	0,2890	0,4695	0,3545	0,1661
	Güneş	0,2608	0,3948	0,2960	0,1068	0,1785	0,1122	0,1000	0,4361	0,1652	0,2652	0,2269	0,3510	0,5000	0,3233	0,1579
	Doğalgaz	0,4069	0,4265	0,4384	0,5005	0,2703	0,2756	0,2000	0,2763	0,5342	0,2664	0,2000	0,3273	0,2000	0,4179	0,4569
35	Elektrik	0,4369	0,4818	0,4332	0,6624	0,1434	0,2050	0,1000	1,1567	0,5008	0,3335	0,1000	0,2064	0,1000	0,5372	1,0358
	Rüzgar	0,3352	0,2408	0,3113	0,2698	0,1055	0,6639	0,1000	0,5277	0,1899	0,2870	0,7500	0,6298	0,1000	0,2311	0,4827
	Güneş	0,3251	0,3812	0,2344	0,3975	0,5000	0,5000	0,5000	0,2739	0,1479	0,2082	0,1000	0,1945	0,5000	0,2802	0,2262
	Doğalgaz	1,0661	0,6968	1,3997	0,2389	2,0840	2,2596	2,7000	1,0031	0,9269	1,4425	0,2000	0,3309	2,7000	0,5227	0,7448
36	Elektrik	0,4125	0,4080	0,6023	0,3878	0,6756	0,9671	0,3000	1,2176	0,9304	0,4724	0,3000	0,3640	0,3000	0,6679	0,5033
	Rüzgar	0,3350	0,2706	0,3686	0,2134	0,2020	0,1000	0,1000	0,2522	0,2270	0,4820	0,1000	0,3500	0,1000	0,1681	0,2277
	Güneş	0,3620	0,2996	0,3098	0,1101	0,1000	0,4063	0,4591	0,3027	0,1645	0,2280	0,1000	0,3523	0,1000	0,3871	0,1620
	Doğalgaz	0,5556	0,4772	0,4239	0,2604	0,2087	1,0002	0,2000	0,4170	0,4452	0,2402	0,2000	0,2948	0,2577	0,5930	0,2000
37	Elektrik	0,3596	0,3962	0,3714	0,6827	0,1000	0,1312	0,1000	0,2604	0,5226	0,3140	2,0476	0,6353	1,2077	0,3748	0,1170
	Rüzgar	0,4263	0,2816	0,3504	0,2285	0,7491	0,1000	0,1000	0,1957	0,1603	0,4077	0,1000	0,5394	0,2064	0,3320	0,5018
	Güneş	0,3739	0,3398	0,2742	0,1079	0,4507	0,1018	0,1000	0,1588	0,2055	0,3962	0,1000	0,3967	0,5000	0,1737	0,3069
	Isı	0,3763	0,5980	0,4782	0,4913	0,3158	0,3084	0,2000	0,5810	0,2842	0,4455	0,2000	0,6053	0,2000	0,4263	0,7665
38	Elektrik	0,3816	0,3735	0,5145	0,2214	0,2012	0,2368	0,2000	0,5516	0,5506	0,5820	0,2000	0,2749	0,2000	0,4547	0,4332
	Rüzgar	0,3222	0,3576	0,3416	0,3034	0,1085	0,1000	0,1000	0,3173	0,5213	0,4467	0,1000	0,6217	0,7500	0,2325	0,3935
	Güneş	0,3406	0,2922	0,2498	0,4484	0,1000	0,2884	0,1000	0,2812	0,2296	0,1827	0,1000	0,2045	0,5000	0,3792	0,2468
39	Elektrik	0,4283	0,2736	0,4458	1,3173	2,2563	2,1950	1,1418	0,8225	0,3388	0,1784	0,1000	0,3209	0,1000	0,2499	1,7482
	Rüzgar	0,2493	0,4133	0,3345	0,5495	0,6565	0,1000	0,7500	0,2443	0,3197	0,4992	0,7500	0,5393	0,1000	0,4021	0,1777
	Doğalgaz	0,2516	0,5502	0,3540	0,1556	0,1088	0,1000	0,1000	0,4257	0,4287	1,4557	0,1000	0,2027	0,1000	0,5248	0,1727
40	Elektrik	0,2936	0,2617	0,3521	1,6975	0,3062	2,3571	0,1000	0,1398	0,4732	0,4334	2,0838	0,2808	0,1000	0,2811	0,3593
	Güneş	0,3418	0,2593	0,2269	0,2093	0,1141	0,1000	0,1000	0,1783	0,1506	0,2876	0,5000	0,1560	0,1000	0,2960	0,1912
	Isı	0,2193	0,3049	0,2516	0,1135	0,1000	0,1294	0,1000	0,1710	0,1670	0,1419	0,1000	0,3889	0,4000	0,1686	0,2141
41	Rüzgar	0,3550	0,3863	0,3237	0,1724	0,1469	0,2065	0,6000	0,5457	0,1842	0,1672	0,1000	0,5407	0,2622	0,3890	0,1052
	Doğalgaz	0,3799	0,4473	0,3445	0,1529	0,1001	0,1000	0,1000	0,1480	0,2624	0,1248	0,1000	0,4538	0,6076	0,2251	0,1843
	Isı	0,3003	0,1732	0,2457	0,3216	0,1164	0,1000	0,5000	0,3089	0,1909	0,2036	0,1000	0,2116	0,4633	0,2262	0,2849
43	Elektrik	0,7624	0,6792	0,5382	0,4017	1,0658	0,4435	1,7500	0,6371	1,0445	0,6194	0,3000	0,8234	0,3000	0,5508	0,4736
	Rüzgar	0,4645	0,1410	0,2928	0,1321	0,1952	0,1000	0,7500	0,1509	0,1554	0,3075	0,1000	0,5330	0,1382	0,3452	0,1602
	Doğalgaz	0,4722	0,5923	0,5336	0,4041	0,3392	0,3000	0,3000	0,6119	0,7218	0,4401	0,3000	0,4684	0,3038	0,6668	0,3213

Çizelge 4.32. (devam) Durum-11 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
46	Elektrik	0,6309	0,3064	0,4953	0,3101	0,7296	1,0489	0,2000	0,3229	0,2770	0,6174	0,2000	0,4316	0,6543	0,4221	0,2482
	Rüzgar	0,2981	0,2875	0,2578	0,1427	0,6000	0,2499	0,1000	0,4197	0,1634	0,1984	0,6000	0,4430	0,1000	0,1841	0,4139
	Doğalgaz	0,8612	0,8207	0,5102	0,1759	1,3166	0,4343	0,1000	0,2789	0,5040	0,3691	0,1000	0,2792	1,4000	0,4203	0,3288
	Isı	0,6898	0,4533	0,4619	0,2428	0,2109	0,2000	0,2000	0,2503	0,4468	0,2375	1,4000	0,7877	1,4000	0,4140	0,7452
47	Elektrik	0,4307	0,4544	0,3122	0,6150	0,1000	0,6230	0,1000	0,1764	0,5797	0,3856	0,2412	0,1129	0,1000	0,2493	0,3010
	Güneş	0,2105	0,2301	0,2489	0,1722	0,1034	0,1000	0,1000	0,4320	0,1956	0,2078	0,5000	0,4169	0,5000	0,2529	0,2020
	Doğalgaz	0,4085	0,2628	0,4957	0,5967	0,5472	0,4350	0,1000	0,2960	0,2341	0,1107	0,1000	0,1594	0,1000	0,2226	0,1580
	Isı	0,5075	0,4909	0,4102	1,3295	0,2000	0,9369	1,4000	0,4245	0,2945	0,8530	1,4000	0,2296	0,3581	0,3398	0,3020
48	Elektrik	0,4318	0,4876	0,4724	0,2265	0,3196	0,2067	0,2000	0,4109	0,3417	0,3757	0,2000	0,5332	0,3490	0,4741	0,3237
	Rüzgar	0,4652	0,6067	0,3137	0,1368	0,1306	0,1000	0,1000	0,3289	0,2220	0,3849	0,1000	0,1210	0,1000	0,2443	0,4032
	Doğalgaz	0,6815	0,6202	0,8690	0,2124	0,8357	1,7465	1,8000	0,7939	0,9607	0,5470	1,8000	0,3907	0,2000	0,8971	0,8457
	Isı	0,3920	0,3775	0,4071	0,4933	0,2000	1,7000	0,2000	0,4052	0,5007	0,8860	0,2000	0,9160	0,2000	0,4664	0,2479
51	Elektrik	0,3758	0,5587	0,3413	0,2778	0,1628	0,3519	1,0000	0,3840	0,3179	0,6836	0,1000	0,4144	0,2087	0,4517	0,3238
	Rüzgar	0,4720	0,2544	0,3431	0,1189	0,1104	0,2558	0,1000	0,1809	0,2221	0,1911	0,1056	0,3649	0,2321	0,2009	0,3090
	Güneş	0,2407	0,2373	0,2605	0,2770	0,1386	0,3097	0,1000	0,3605	0,2850	0,1870	0,5000	0,4400	0,2969	0,2364	0,2796
	Doğalgaz	0,6058	0,5726	0,4619	0,6432	0,1000	0,1105	0,1000	0,1271	1,0073	0,3763	0,1000	0,1392	0,1000	0,2042	0,3707
52	Elektrik	0,4638	0,4459	0,4025	0,9393	0,3791	0,1000	0,1000	0,3331	0,4779	0,4044	0,1000	0,1341	3,0000	0,4194	0,4272
	Rüzgar	0,2705	0,3562	0,3009	0,1062	0,1142	0,1000	0,6000	0,2474	0,2168	0,2044	0,6000	0,1929	0,1000	0,1515	0,3002
	Güneş	0,3530	0,1820	0,2676	0,1855	0,1610	0,1000	0,5000	0,1604	0,1923	0,3299	0,5000	0,1308	0,4317	0,2566	0,3696
	Doğalgaz	0,4023	0,4145	0,3338	0,9266	0,1002	0,4672	0,1000	0,1399	0,4403	0,6808	0,1000	0,4904	0,1109	0,4175	0,6244
53	Isı	0,2591	0,1875	0,3168	0,1676	1,4994	0,3084	0,1000	0,1771	0,2257	0,1126	0,2090	0,4509	0,2734	0,4683	1,0289
	Elektrik	0,3270	0,3667	0,5542	0,1124	1,2901	0,9037	0,1000	0,1048	0,2965	0,5400	0,1000	0,3047	1,3553	0,2105	0,4515
	Rüzgar	0,3946	0,4277	0,3207	0,1413	0,1000	0,1000	0,1000	0,2805	0,2845	0,2261	0,1000	0,3253	0,6000	0,2980	0,3972
	Güneş	0,2639	0,3244	0,2201	0,1366	0,1177	0,2774	0,1000	0,1406	0,1788	0,2253	0,5000	0,1133	0,1005	0,3521	0,1314
54	Doğalgaz	1,5663	1,2549	0,9211	2,4791	2,9761	0,9966	0,1000	2,7586	2,5440	2,4285	0,1000	2,9323	0,1000	0,9299	1,7120
	Isı	0,5319	0,4285	0,3070	0,1206	0,1148	0,2519	0,1000	0,1776	0,4751	0,5563	0,1000	0,4836	0,1000	0,3829	0,1103
	Elektrik	0,3834	0,6528	0,5246	0,2089	0,2545	0,6757	1,6000	0,3303	0,5172	0,6358	0,2000	1,0876	0,3358	0,6160	0,2991
	Rüzgar	0,3490	0,2208	0,3189	0,3259	0,1000	0,1128	0,7500	0,3320	0,2630	0,3706	0,1000	0,2224	0,1000	0,3894	0,1492
54	Güneş	0,2581	0,2199	0,2275	0,1050	0,4236	0,1218	0,5000	0,1665	0,1119	0,2870	0,1000	0,1146	0,1000	0,4580	0,2362
	Doğalgaz	0,5518	0,7206	0,4638	0,3004	0,5323	0,7377	0,2000	0,4358	0,2928	1,2300	0,2000	0,2502	0,2000	0,7726	1,2514

Çizelge 4.32. (devam) Durum-11 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
56	Elektrik	0,3978	0,4777	0,4007	0,2889	0,8617	0,3553	0,1000	0,5795	0,5273	0,7409	0,3994	0,7337	0,1000	0,4674	1,7492
	Rüzgar	0,2175	0,3719	0,3250	0,1063	0,3259	0,1000	0,1000	0,2059	0,4241	0,1487	0,1000	0,1115	0,6328	0,2062	0,1159
	Güneş	0,3641	0,2325	0,2541	0,1020	0,1093	0,1000	0,1000	0,1287	0,1500	0,3396	0,1000	0,2424	0,4528	0,2084	0,2966
	Doğalgaz	0,3531	0,6652	0,3720	0,2155	0,2000	0,5773	1,0000	0,3319	0,3838	0,2146	0,2000	0,5966	1,0000	0,3522	0,3659
	Isı	0,2869	0,4519	0,3567	0,3435	0,1019	0,1000	0,1000	0,2416	0,2059	0,1298	0,2227	0,8512	0,3642	0,2596	0,7144
57	Elektrik	0,3598	0,4636	0,4208	1,0916	0,1000	0,1000	0,1000	0,5735	1,2159	0,5846	3,0000	0,1542	0,1000	0,6909	0,1622
	Rüzgar	0,3273	0,3332	0,2180	0,1630	0,2814	0,1000	0,1000	0,4228	0,1922	0,2889	0,1000	0,4123	0,1000	0,3042	0,1662
	Güneş	0,2528	0,1390	0,2110	0,1032	0,3262	0,4691	0,5000	0,2340	0,1963	0,3347	0,1000	0,2856	0,2796	0,3106	0,2200
	Doğalgaz	0,3656	0,3030	0,4638	0,2968	0,7122	0,5889	1,5396	0,9861	0,2863	0,4798	0,2000	0,2591	0,2000	0,5791	0,3912
58	Elektrik	0,3147	0,3971	0,4319	1,2616	0,7386	2,9111	0,1000	0,4666	0,4215	0,1212	0,1000	0,1268	0,1531	0,4235	0,1157
	Rüzgar	0,1998	0,3675	0,3743	0,2955	0,1451	0,2624	0,1000	0,1786	0,5126	0,6351	0,2150	0,2490	0,6504	0,3352	0,1363
	Güneş	0,3889	0,3896	0,2453	0,3229	0,1297	0,2264	0,1000	0,2299	0,2969	0,2048	0,1000	0,2077	0,1000	0,1678	0,2171
	Isı	0,4254	0,4527	0,4460	1,1320	1,3469	0,2002	0,2000	0,3918	0,3057	0,2039	0,2000	0,2525	0,2072	0,3335	0,4956
60	Elektrik	0,2090	0,2298	0,4564	0,1055	0,2758	0,3503	0,1000	0,5846	0,6229	0,8248	0,1000	0,1993	0,8544	0,6466	0,1701
	Rüzgar	0,3865	0,3336	0,3221	0,1593	0,3976	0,1646	0,1000	0,4639	0,1740	0,5398	0,1000	0,4937	0,5598	0,1731	0,2182
	Doğalgaz	0,4684	0,5500	0,6144	0,6145	0,8083	1,6141	0,2000	0,4919	0,2830	0,9221	0,2000	0,7186	1,3575	0,7661	1,4926
	Isı	0,2219	0,3610	0,2472	0,1108	0,1021	0,1000	0,1000	0,1317	0,3095	0,1430	0,1000	0,3623	0,1000	0,3150	0,1000
61	Elektrik	0,3303	0,5136	0,3535	0,3738	0,1717	0,8945	0,1000	0,5448	0,3501	0,1581	0,1000	0,3527	0,1000	0,2743	0,1249
	Rüzgar	0,2864	0,4506	0,3923	0,2977	0,1033	0,7500	0,7500	0,2545	0,3989	0,3204	0,1000	0,1846	0,1000	0,2716	0,1373
	Güneş	0,3801	0,2485	0,2148	0,1283	0,4687	0,1000	0,5000	0,2100	0,3188	0,4202	0,5000	0,1342	0,2380	0,2142	0,1753
	Doğalgaz	0,3126	0,2898	0,3171	0,1505	0,9791	0,1005	1,0000	0,2156	0,2095	0,8255	0,1000	0,4915	0,1000	0,3348	0,4435
	Isı	0,2836	0,3651	0,2320	0,2198	0,1256	0,1000	0,1000	0,1450	0,3108	0,2120	0,1000	0,1944	0,5000	0,2870	0,3453
62	Elektrik	0,3976	0,5174	0,3433	0,2921	0,8481	0,1195	0,1000	0,2807	0,2161	0,3425	1,0000	0,1600	0,7922	0,2421	0,5340
	Rüzgar	0,2710	0,2247	0,2846	0,1123	0,3623	0,1220	0,1000	0,1926	0,2470	0,1250	0,4884	0,3154	0,1426	0,5867	0,1982
	Güneş	0,3172	0,2734	0,3035	0,1031	0,2428	0,1000	0,1000	0,2908	0,1414	0,2123	0,3160	0,4863	0,2126	0,3561	0,1566
	Doğalgaz	0,3043	0,3679	0,4556	0,2111	0,2000	0,5017	0,2000	0,3229	0,2915	0,2164	0,2000	0,2330	0,2000	0,4602	0,2705
63	Elektrik	0,5972	0,3203	0,4809	0,3039	0,1028	0,1000	0,1000	0,4006	0,6061	0,4861	0,1000	0,7662	0,1000	0,3432	0,7323
	Rüzgar	0,4156	0,1474	0,3934	0,7017	0,5355	0,6861	0,7500	0,1842	0,1991	0,2890	0,1429	0,5624	0,5579	0,3638	0,5912
	Güneş	0,1607	0,2797	0,2684	0,3310	0,1551	0,1246	0,5000	0,4155	0,1614	0,2648	0,1000	0,1074	0,1000	0,1838	0,1143
	Doğalgaz	0,2912	0,1618	0,4587	0,1681	0,1000	0,1000	0,1000	1,6432	0,6146	0,1418	0,1000	0,1885	0,1000	0,3835	0,2172
	Isı	0,3193	0,2675	0,2050	0,1220	0,2248	0,1000	0,1000	0,2667	0,2915	0,1498	0,1000	0,1309	0,1143	0,2341	0,1943

Çizelge 4.32. (devam) Durum-11 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
64	Elektrik	0,4246	0,5405	0,4606	0,1911	0,1114	0,3574	0,1000	0,1674	0,2185	0,2641	0,1000	0,2661	0,8213	0,4660	0,7091
	Rüzgar	0,3752	0,2007	0,3874	0,2119	0,1188	0,1000	0,7500	0,2715	0,1556	0,5045	0,1000	0,3152	0,4055	0,4381	0,1669
	Güneş	0,4458	0,3834	0,2678	0,3079	0,3205	0,1000	0,1000	0,2847	0,1942	0,2455	0,1000	0,2339	0,2586	0,2813	0,3898
	Doğalgaz	0,3783	0,2079	0,4617	0,3325	0,2025	0,4990	0,2000	0,8189	0,4703	0,3040	0,2000	0,2944	0,2000	0,5705	0,2107
	Isı	0,2578	0,2108	0,2402	0,1244	0,2502	0,1000	0,1000	0,1087	0,1155	0,2596	0,1498	0,1176	0,2736	0,2123	0,1946
66	Elektrik	0,4901	0,6096	0,4956	0,2256	0,2707	0,2000	0,2000	0,6843	0,5904	0,2393	0,2000	0,4533	0,2000	0,4295	0,4702
	Rüzgar	0,4117	0,2595	0,3368	0,1044	0,7462	0,1684	0,1000	0,2069	0,2351	0,3355	0,1000	0,7242	0,1000	0,3831	0,1206
	Güneş	0,3906	0,2813	0,2492	0,1375	0,1671	0,1000	0,5000	0,1629	0,1895	0,3099	0,5000	0,1644	0,5000	0,2650	0,2092
	Doğalgaz	0,4271	0,4878	0,5488	0,4942	0,1003	0,1000	0,1900	0,2303	0,6695	0,4833	0,1000	0,2495	0,9972	0,6291	0,2443
	Isı	0,2303	0,3234	0,3147	0,1315	0,1187	0,3774	0,9000	0,4482	0,1926	0,2523	0,1000	0,2586	0,8990	0,3439	0,2696
67	Elektrik	0,3456	0,3468	0,5679	0,2172	0,2025	0,3994	1,5000	0,3254	0,3502	0,7854	0,2540	0,5922	0,2000	0,3070	0,6861
	Rüzgar	0,2375	0,2765	0,2658	0,2460	0,2840	0,2060	0,6000	0,1768	0,1356	0,3696	0,1000	0,1145	0,1000	0,3291	0,1212
	Güneş	0,2657	0,3099	0,2864	0,1135	0,1023	0,1000	0,1000	0,1335	0,1007	0,3557	0,1000	0,1963	0,3379	0,2116	0,1573
	Doğalgaz	0,4583	0,6852	0,5580	0,4915	1,0111	0,1000	0,1000	0,6511	0,6771	0,6726	3,2000	0,4338	0,7770	0,7163	0,2189
	Isı	0,3068	0,2430	0,3942	0,2445	0,8756	0,6097	0,9000	0,2993	0,2128	0,4367	0,1000	0,1967	0,7440	0,3706	0,3305
68	Elektrik	0,2697	0,4190	0,4032	0,1387	0,7888	0,6993	0,1000	0,4330	0,3557	0,1397	1,0000	0,4779	0,1000	0,4029	0,3331
	Rüzgar	0,4479	0,2771	0,3193	0,2453	0,7500	0,7452	0,1000	0,2620	0,4763	0,3125	0,1000	0,3796	0,1000	0,2716	0,4954
	Güneş	0,2487	0,3301	0,2703	0,1919	0,1356	0,1599	0,1000	0,1202	0,2747	0,3715	0,1258	0,1095	0,1591	0,3164	0,1100
	Doğalgaz	0,5125	0,2779	0,3751	0,3764	0,1999	1,5051	0,1000	0,3174	0,3287	0,6516	0,1000	0,1860	0,1000	0,6239	0,2087
	Isı	0,2049	0,3636	0,3017	0,2729	0,7425	0,1000	0,9000	0,3283	0,2539	0,2862	0,1000	0,2196	0,1491	0,2120	0,4867
69	Elektrik	0,4292	0,8856	0,3674	0,5603	0,1041	1,0605	0,9117	0,4939	1,4506	0,1513	0,1000	0,3037	0,1000	0,4648	1,1717
	Rüzgar	0,3382	0,2674	0,3094	0,1406	0,1209	0,1213	0,6000	0,1631	0,5826	0,2645	0,1000	0,1459	0,1888	0,2524	0,1177
	Güneş	0,2080	0,2212	0,2508	0,2454	0,1921	0,2613	0,5000	0,1804	0,1566	0,3593	0,3848	0,2950	0,2925	0,2997	0,2089
	Doğalgaz	0,4631	0,4363	0,5657	0,1091	0,1000	1,8000	0,1000	0,5300	0,2958	0,1181	0,1000	1,0757	1,8000	0,4369	1,0208
	Isı	0,5663	0,5286	0,4590	0,6076	0,5339	0,2000	0,2000	0,2106	0,3414	0,2307	0,2000	0,2363	0,6496	0,2230	0,7227
Toplam Maliyet (mu)		43492,595	43625,350	43848,179	41967,556	42350,165	42201,758	42150,027	42599,904	42980,795	43056,769	43042,768	42872,495	42705,136	43439,987	43108,152
Toplam Kayıp (pu)		11,1848	11,0850	11,9542	11,1699	10,8760	11,3337	10,8422	11,4186	11,3111	11,5259	10,5637	11,3721	10,6098	11,5611	11,4810
Amaç Fonksiyonu (pu)		11,1848	11,0850	11,9542	11,1699	10,8760	11,3337	10,8422	11,4186	11,3111	11,5259	10,5637	11,3721	10,6098	11,5611	11,4810
Hesaplama Zamanı (s)		109210,55	100108,06	97369,41	97095,39	95761,90	101520,53	91480,26	96642,16	100688,63	99134,49	97788,04	101190,09	100193,30	99026,98	96186,90

Algoritmalarından 30 bağımsız deneme sonucunda elde edilen simülasyon sonuçlarına göre, minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk fonksiyonu değerleri hesaplanmıştır ve Çizelge 4.33’de verilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, COA algoritması en kararlı performansı gösterip en iyi ortalama uygunluk fonksiyonu değerini vermiştir. FDB-LSHADESPACMA ise ikinci en iyi ortalama uygunluk fonksiyonu değerini elde etmiştir.

Çizelge 4.33. Durum-11 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	11,1848	11,3911	11,2995	0,0520
LSHADESPACMA	11,0850	11,5714	11,3469	0,1444
LSHADE	11,9542	12,4070	12,2881	0,1032
MPA	11,1699	12,5389	12,0190	0,4073
EO	10,8760	12,4714	11,8183	0,3895
BMO	11,3337	12,6741	11,9362	0,4272
AEFA	10,8422	11,9528	11,4035	0,3628
AEO	11,4186	12,7145	12,2206	0,3447
SDO	11,3111	12,8701	12,2724	0,4028
AGDE	11,5259	12,5037	12,0368	0,3060
COA	10,5637	11,7185	11,2733	0,3027
SSA	11,3721	12,4417	11,9430	0,2723
MFO	10,6098	12,3225	11,6244	0,4595
GSA	11,5611	12,4708	12,1820	0,2425
GA	11,4810	12,5183	12,0026	0,2825

4.4.12. Durum-12 için Simülasyon Sonuçları

Test Sistemi-4 için hem enerji hub maliyetinin hem de enerji hub kayıplarının minimize edildiği problemde, algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları Çizelge 4.34’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, AEFA 47583,8893 mu değeri ile en uygun optimum çözümü elde etmiştir. FBLSHADESPACMA, MPA, EO, BMO, AEO, SDO, AGDE, COA, SSA, LSHADE-SPACMA, MFO, LSHADE, GSA ve GA algoritmalarından elde edilen minimum uygunluk fonksiyon değerleri sırasıyla, 51875,7656 mu, 49411,6909 mu, 49260,7740 mu, 49586,8079 mu, 50313,0890 mu, 50608,1811 mu, 50281,5340 mu, 48464,6929 mu, 49868,0213 mu, 51893,7542 mu, 49000,1653 mu, 51473,8890 mu, 51077,2405 mu ve 50258,5789 mu’dur.

Çizelge 4.34. Durum-12 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
1	Elektrik	0,2957	0,3864	0,3567	0,2571	0,2421	0,1066	0,1000	0,2902	0,1339	0,4118	0,1014	0,1266	0,1000	0,2563	0,2463
2	Elektrik	0,6785	0,6567	0,4681	0,4349	0,4000	0,4000	0,4000	0,4783	1,1921	0,7048	0,4000	1,5923	0,4000	0,5702	0,7790
	Doğalgaz	0,7947	0,8156	0,9070	0,8514	0,5000	0,5655	0,6020	0,5214	0,5848	0,5729	0,5000	0,5842	0,5005	0,8700	0,5921
3	Elektrik	0,6633	0,6586	0,5154	0,5506	1,8357	0,5175	0,4000	0,4998	0,5350	0,6555	2,5000	1,0679	0,4000	0,4706	0,4616
	Doğalgaz	0,7516	0,3522	0,5900	0,1199	0,1264	0,5147	0,1000	0,2100	0,4118	0,4370	0,1000	0,1470	0,8293	0,6913	0,7539
4	Elektrik	0,4013	0,4877	0,3952	0,4855	0,5558	0,3636	0,2000	0,2772	0,3035	0,6251	0,2000	1,2278	0,2000	0,5075	0,3276
	Doğalgaz	0,4363	0,4344	0,3828	0,2609	0,3056	0,2144	0,2000	0,2144	0,2091	0,2580	0,2000	0,4913	0,3090	0,2304	0,4172
5	Elektrik	0,4049	0,3088	0,3735	0,1722	0,1619	0,4370	0,1000	0,2905	0,1164	0,4950	0,7500	0,1140	0,1856	0,1714	0,5579
	Isı	0,3498	0,2597	0,3690	0,1363	0,1000	0,1000	0,1000	0,1417	0,2114	0,3740	0,8000	0,7955	0,1000	0,2306	0,4683
6	Elektrik	0,4844	0,5241	0,4903	0,4646	0,2000	0,2000	0,2000	0,6700	0,4024	0,2901	0,2000	1,1700	1,5881	0,3841	0,6825
7	Elektrik	0,3829	0,4287	0,3929	0,6566	0,1000	0,2318	0,1000	0,8161	0,8710	0,6083	0,1000	0,1411	0,1000	0,6816	0,1107
	Doğalgaz	0,4363	0,5040	0,4686	0,2171	0,4849	1,8000	1,8000	0,4402	0,8015	0,2460	1,8000	1,4012	0,2226	0,6488	0,5460
8	Elektrik	0,5295	0,5182	0,6598	1,0460	0,3195	1,4239	0,3000	0,4579	1,1406	0,3844	0,3000	1,2618	0,3000	0,3888	0,5482
	Doğalgaz	0,3826	0,3702	0,3542	1,1394	0,1000	0,2251	0,1000	0,2000	1,1799	0,3755	0,1000	0,2018	0,5638	0,6429	0,2397
	Isı	0,3972	0,3755	0,4295	0,1458	0,1107	0,1000	0,1000	0,2778	0,1129	0,1908	0,7000	0,5342	0,7000	0,2512	0,1668
10	Rüzgar	0,4009	0,2701	0,2740	0,1061	0,1003	0,1000	0,1000	0,2601	0,4267	0,3683	0,1000	0,3114	0,1307	0,1555	0,4917
	Doğalgaz	0,7463	0,7403	0,7485	1,2653	0,2000	0,2000	0,2000	0,3419	1,1566	1,5380	0,2000	0,7017	0,2000	1,1538	1,2352
11	Güneş	0,2583	0,3462	0,3393	0,1204	0,1000	0,1000	0,5000	0,2009	0,1465	0,3143	0,5000	0,2754	0,5000	0,1672	0,1502
	Doğalgaz	1,1938	1,6157	1,5338	2,8711	1,8876	0,3915	3,0000	2,5234	1,2998	1,1986	3,0000	2,3260	0,1000	0,6916	0,5791
	Isı	0,3615	0,2809	0,3092	0,6439	0,2963	0,1000	0,1000	0,1489	0,1736	0,1734	0,9000	0,1215	0,8852	0,5769	0,5244
13	Elektrik	0,3198	0,3521	0,3932	0,3100	0,7500	0,2958	0,1000	0,3095	0,4259	0,3515	0,1000	0,5600	0,1041	0,2672	0,1206
	Doğalgaz	0,3751	0,3972	0,4779	0,4602	1,4230	0,1000	0,1000	0,7358	0,3237	0,1936	0,1000	0,1414	0,1040	0,5477	0,1471
14	Rüzgar	0,2690	0,2818	0,2128	0,5845	0,4828	0,2507	0,6000	0,1441	0,3659	0,1575	0,1000	0,1231	0,6000	0,2722	0,2293
	Isı	0,2069	0,2603	0,2797	0,1102	0,3137	0,1233	0,1000	0,1445	0,1120	0,2842	0,1000	0,3911	0,4000	0,1837	0,3146
15	Güneş	0,3584	0,3112	0,3056	0,1556	0,2955	0,1000	0,1000	0,2248	0,3440	0,3950	0,5000	0,1189	0,3158	0,1826	0,1968
	Doğalgaz	0,3492	0,2904	0,3670	0,1046	0,8331	0,1000	0,1000	0,3549	0,7104	0,6987	0,5369	0,1410	0,1000	0,4131	0,1217
	Isı	0,3920	0,3931	0,3941	0,2294	1,2393	0,2000	1,4000	0,4581	0,2700	0,4388	0,2000	0,2278	0,2000	0,3649	0,2261
16	Elektrik	0,4430	0,3569	0,6350	2,5737	3,0000	2,5867	3,0000	0,8794	0,6894	0,9447	0,1000	0,6878	0,3161	0,4852	0,2961
	Rüzgar	0,2853	0,4761	0,2424	0,1044	0,1000	0,1797	0,1000	0,3271	0,3355	0,4514	0,5476	0,1766	0,5235	0,5294	0,2942
	Güneş	0,3125	0,2768	0,1945	0,2857	0,2555	0,1000	0,1000	0,4201	0,1518	0,2672	0,1000	0,2587	0,4999	0,2818	0,2536
17	Elektrik	0,4620	0,4825	0,3507	0,2824	0,3832	0,4332	0,2000	0,8670	0,2189	0,3184	1,1000	1,0529	0,2000	0,4153	0,9999
	Rüzgar	0,3088	0,3651	0,4532	0,1352	0,1387	0,1000	0,1000	0,1291	0,3745	0,6130	0,1000	0,5760	0,1001	0,4632	0,2279
	Doğalgaz	0,3836	0,4643	0,3084	0,1387	0,2347	0,1000	0,1000	0,5904	0,1853	0,3262	0,1000	0,1778	0,1000	0,3574	0,2177

Çizelge 4.34. (devam) Durum-12 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
18	Elektrik	0,4586	0,4165	0,6687	0,3493	0,2265	0,2000	0,2000	0,2002	0,7296	0,3421	0,2000	0,7031	0,2000	0,4972	1,0457
	Güneş	0,3485	0,2507	0,2878	0,4603	0,5000	0,3577	0,1000	0,1758	0,1059	0,2199	0,5000	0,2767	0,1000	0,2299	0,2610
	Doğalgaz	0,6828	0,4788	0,4567	0,3217	0,6497	0,2000	1,0000	0,8893	0,3096	0,2746	0,2000	0,3431	1,0000	0,7818	0,4104
20	Elektrik	0,7117	0,6550	0,7600	0,6153	0,4000	1,4650	2,5000	1,0939	0,5513	0,9209	0,4000	0,4913	1,3936	0,5663	0,7326
	Güneş	0,2514	0,3348	0,3066	0,1256	0,1000	0,1508	0,5000	0,1687	0,3732	0,4111	0,1001	0,3532	0,4148	0,3447	0,1092
	Isı	0,3988	0,3047	0,2922	0,2055	0,4532	0,2000	0,2000	0,2015	0,2168	0,3059	0,4960	0,3462	0,5000	0,4072	0,2378
21	Elektrik	0,5983	0,6825	0,6961	0,5318	2,5000	0,4118	0,4000	0,5889	0,8935	0,5029	0,4000	0,4481	0,4037	0,9130	0,5937
	Rüzgar	0,4019	0,3825	0,2530	0,1527	0,1000	0,1000	0,1000	0,2310	0,1943	0,1963	0,1000	0,1029	0,1000	0,2655	0,2463
22	Rüzgar	0,2699	0,3110	0,2714	0,1391	0,3222	0,1000	0,1000	0,2458	0,3103	0,4174	0,1000	0,4597	0,1000	0,2128	0,3221
	Doğalgaz	0,4743	0,4586	0,4064	0,3702	0,3182	1,5905	0,2000	0,4648	0,7769	0,3374	0,2000	0,2459	0,2073	0,5016	0,2353
	Isı	0,3397	0,3597	0,2802	0,2043	0,2000	0,2000	0,5000	0,4853	0,2245	0,3512	0,2000	0,2522	0,5000	0,3419	0,3517
24	Güneş	0,2720	0,2202	0,3213	0,1729	0,1199	0,1000	0,5000	0,1912	0,1381	0,1984	0,4456	0,4330	0,3130	0,1769	0,3861
	Doğalgaz	0,3891	0,2945	0,4654	0,1356	0,1000	0,2660	0,1000	0,5537	0,1151	0,3279	1,9611	0,4554	0,1000	0,2333	1,0000
	Isı	0,4029	0,4335	0,4521	0,2055	0,2286	0,2554	0,2000	0,3557	0,2273	0,5451	0,2000	0,6070	1,7000	0,4738	0,4541
25	Elektrik	0,3981	0,3077	0,2842	0,1682	0,1089	0,4103	0,7500	0,3788	0,1242	0,3252	0,7500	0,1227	0,7205	0,2735	0,4587
	Doğalgaz	0,5076	0,4957	0,6386	0,2435	0,3915	0,4741	1,0000	0,4883	0,6882	0,3608	0,2000	0,2168	1,0000	0,3552	0,2041
	Isı	0,2981	0,3331	0,3619	0,2033	0,1169	0,1000	0,1000	0,1017	0,3316	0,1417	0,1000	0,3758	0,9000	0,2007	0,4754
27	Elektrik	0,2863	0,4004	0,3222	0,1932	0,2171	0,1000	0,1000	0,5339	0,2047	0,5444	0,1000	0,1292	0,7500	0,3768	0,1029
	Doğalgaz	0,6515	0,6326	0,7054	0,1995	0,5203	0,1000	1,1000	0,8432	0,4342	0,8015	0,1000	0,7757	1,0945	0,6813	1,0921
	Isı	0,3960	0,5004	0,3786	0,2107	0,2011	0,2000	0,2000	0,6225	0,2113	0,2832	0,2000	0,2322	0,2000	0,4391	0,2291
28	Elektrik	0,4471	0,4728	0,4065	0,2873	1,2375	0,2000	0,2000	0,6614	0,3618	0,2136	0,2000	0,2642	0,2000	0,4751	0,7276
	Güneş	0,3298	0,2739	0,2071	0,1091	0,3786	0,2306	0,1000	0,2162	0,1935	0,3948	0,1000	0,1372	0,4999	0,3435	0,1149
	Doğalgaz	0,3357	0,3496	0,2765	0,1337	0,1885	0,1000	0,1000	0,6537	0,6291	0,2157	0,1000	0,1319	0,1489	0,2681	0,7269
30	Elektrik	0,5791	0,4435	0,4315	0,2043	0,4779	1,0900	0,2000	0,9278	0,4754	0,4449	0,2000	0,6051	0,2000	0,4101	0,2768
	Güneş	0,2388	0,3289	0,2009	0,1760	0,1427	0,1111	0,1000	0,1427	0,2543	0,2971	0,5000	0,2768	0,5000	0,4101	0,1319
	Doğalgaz	0,4378	0,4406	0,4768	0,9203	0,3423	1,1493	0,2000	0,4961	0,3943	1,1110	0,2000	0,2984	0,2000	0,3947	0,5723
31	Elektrik	0,6948	0,6814	0,5556	0,6230	1,1755	0,4000	2,5000	1,2340	1,5582	0,8361	0,4000	0,4527	0,4000	1,1980	0,4312
	Rüzgar	0,3778	0,2776	0,2430	0,2382	0,2084	0,1000	0,7500	0,2645	0,2131	0,2089	0,1000	0,5752	0,1000	0,3439	0,1759
	Doğalgaz	0,4923	0,5211	0,3939	0,6149	0,2068	0,4027	0,1000	0,2339	0,6123	0,2940	0,1000	1,1440	0,3215	0,3250	1,0095
33	Elektrik	0,3998	0,4302	0,4754	0,3585	0,4710	0,2213	0,2000	0,3029	0,6616	0,4737	1,2500	0,2257	0,2000	0,3739	0,5049
	Güneş	0,3101	0,2238	0,3998	0,1226	0,1094	0,1000	0,5000	0,1696	0,2151	0,1500	0,1000	0,1728	0,1394	0,2655	0,1424
	Doğalgaz	1,0392	0,6701	0,7957	1,1738	1,9000	0,2000	1,7769	0,5015	0,8360	1,4918	0,2000	1,6093	1,9000	0,5300	0,7859
	Isı	0,3246	0,3968	0,3992	0,2301	0,2001	0,2000	0,5000	0,2742	0,2513	0,3384	0,2202	0,3675	0,5000	0,3390	0,3330

Çizelge 4.34. (devam) Durum-12 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
34	Elektrik	0,4469	0,3814	0,4261	0,1064	0,1000	0,1000	0,1000	0,4354	0,4243	0,5323	2,7000	0,3296	0,1044	0,6539	0,2138
	Rüzgar	0,3229	0,2663	0,4513	0,1627	0,1049	0,1000	0,1000	0,2759	0,4017	0,2827	0,1000	0,5815	0,6000	0,3771	0,3960
	Güneş	0,3264	0,3119	0,2145	0,1890	0,1721	0,1089	0,1000	0,4361	0,1150	0,1873	0,5000	0,4157	0,2017	0,2765	0,4125
	Doğalgaz	0,4143	0,4041	0,4349	0,2160	0,2000	0,2000	0,2000	0,2764	0,3283	0,5417	0,6481	0,3702	1,0000	0,4587	0,6520
35	Elektrik	0,4742	0,3505	0,7551	0,8262	0,1228	0,1739	0,1000	1,1568	0,3339	0,7829	0,1000	0,2186	0,6308	0,7151	0,3046
	Rüzgar	0,2795	0,3191	0,3163	0,1778	0,1148	0,2069	0,7500	0,5277	0,2160	0,3801	0,7500	0,1055	0,7499	0,6244	0,1544
	Güneş	0,2793	0,3611	0,2596	0,2364	0,1000	0,4712	0,5000	0,2740	0,2590	0,3941	0,5000	0,2734	0,4808	0,1461	0,3803
	Doğalgaz	1,0837	0,9847	1,0911	1,7583	1,2009	2,6107	0,2000	1,0031	2,6932	0,9456	1,2457	0,3583	2,7000	0,9403	0,9219
36	Elektrik	0,5675	0,5261	0,7047	0,8767	0,5868	0,7791	0,3000	1,2179	0,3676	0,5950	0,3000	0,8738	1,7500	0,4459	0,3587
	Rüzgar	0,3379	0,3651	0,2821	0,1159	0,2259	0,1000	0,6000	0,2522	0,1614	0,2944	0,1000	0,2168	0,5929	0,4978	0,1846
	Güneş	0,3210	0,3369	0,2602	0,1953	0,1129	0,4976	0,1000	0,3060	0,2309	0,3723	0,1000	0,4460	0,5000	0,3971	0,1381
	Doğalgaz	0,4191	0,4433	0,4722	0,9438	0,2062	1,0341	0,2000	0,4170	0,2356	0,2279	0,2000	0,2868	1,8000	0,4144	0,6519
37	Elektrik	0,3600	0,4354	0,4533	0,7417	1,7324	0,1000	0,1000	0,2604	0,4105	0,7878	0,1000	0,4651	0,1000	0,4288	0,6725
	Rüzgar	0,4424	0,4183	0,3400	0,2637	0,1000	0,1000	0,1000	0,1954	0,1504	0,3646	0,7500	0,1510	0,1000	0,1486	0,3140
	Güneş	0,3023	0,3133	0,3949	0,1102	0,4986	0,1000	0,5000	0,1586	0,1233	0,1666	0,5000	0,4095	0,1105	0,3498	0,3554
	Isı	0,4476	0,4555	0,4082	0,4899	0,2319	0,3326	0,2000	0,5810	0,4516	0,3244	0,2000	0,2671	0,2000	0,4409	0,4034
38	Elektrik	0,4317	0,4638	0,6829	1,7418	1,4469	0,2650	0,2000	0,5515	0,7931	0,7090	0,2000	0,2140	0,2000	0,3085	0,2250
	Rüzgar	0,3411	0,2279	0,3585	0,1569	0,1960	0,1000	0,1000	0,3175	0,3713	0,2724	0,1000	0,2498	0,1000	0,5847	0,1998
	Güneş	0,2450	0,3257	0,3240	0,1163	0,4035	0,2160	0,1000	0,2812	0,2979	0,1834	0,5000	0,2895	0,5000	0,3290	0,1005
39	Elektrik	0,3738	0,3626	0,2158	0,3492	0,1253	0,1000	0,1000	0,8213	0,4435	0,1470	0,1000	0,2641	0,1000	0,1912	0,6898
	Rüzgar	0,2818	0,3502	0,4228	0,2408	0,3162	0,1000	0,1000	0,2443	0,3809	0,4794	0,7500	0,5895	0,2230	0,3089	0,2911
	Doğalgaz	0,3662	0,3653	0,1265	0,3123	0,7878	0,1000	0,1000	0,4266	0,1185	0,4041	0,1000	0,1450	0,1000	0,3389	0,4995
40	Elektrik	0,4007	0,3647	0,3979	2,5860	0,1004	2,6840	0,1000	0,1399	1,5004	0,2467	2,7000	0,2381	0,1000	0,4971	0,9824
	Güneş	0,2889	0,3642	0,2202	0,3537	0,1442	0,1916	0,5000	0,1782	0,2221	0,1883	0,5000	0,2878	0,1000	0,3471	0,2476
	Isı	0,2879	0,1962	0,2446	0,1276	0,1108	0,1046	0,1000	0,1710	0,1710	0,1190	0,1509	0,3599	0,1000	0,2415	0,2574
41	Rüzgar	0,3614	0,2884	0,2257	0,2775	0,1000	0,2175	0,1000	0,5457	0,1733	0,4697	0,1044	0,2572	0,2280	0,2936	0,2446
	Doğalgaz	0,3361	0,2839	0,3726	0,3071	0,2615	0,1000	0,1000	0,1480	0,7390	0,1823	1,0000	0,1552	0,1054	0,3606	0,4422
	Isı	0,2219	0,3460	0,2241	0,1240	0,2419	0,1000	0,5000	0,3089	0,3073	0,2689	0,5000	0,1647	0,1000	0,3708	0,2000
43	Elektrik	0,4930	0,5338	0,5754	1,0976	0,3000	0,4638	1,7500	0,6371	1,0556	0,4167	0,3000	0,3929	0,3000	0,5791	0,3150
	Rüzgar	0,3603	0,3864	0,3048	0,2184	0,2469	0,1000	0,1000	0,1523	0,1950	0,2280	0,1000	0,4267	0,4504	0,3098	0,5644
	Doğalgaz	0,5958	0,5806	0,4460	1,0934	0,5401	0,3000	0,3000	0,6120	1,6015	0,9605	3,0000	0,5005	0,5065	0,5286	0,3413

Çizelge 4.34. (devam) Durum-12 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
46	Elektrik	0,4355	0,4941	0,5069	0,2228	0,2512	1,0647	0,2000	0,3229	0,4517	0,3962	1,1000	0,6229	1,0898	0,4939	0,7142
	Rüzgar	0,3750	0,3152	0,3011	0,2536	0,1870	0,1923	0,6000	0,4038	0,1358	0,2683	0,6000	0,1052	0,6000	0,3273	0,3524
	Doğalgaz	0,4159	0,8381	0,4891	0,4635	0,3656	0,4980	0,1000	0,2789	0,5245	0,2564	0,1000	1,2348	0,1098	0,2446	0,2718
	Isı	0,5230	0,5170	0,3187	0,3784	0,3060	0,2000	0,2000	0,2503	0,4287	0,4367	0,2000	0,2289	0,2011	0,2901	0,2525
47	Elektrik	0,3381	0,3139	0,2982	0,2306	0,4364	0,6914	0,7500	0,1764	0,1695	0,1445	0,1000	0,3802	0,7057	0,2184	0,2289
	Güneş	0,3484	0,3014	0,3004	0,1409	0,1021	0,1000	0,1000	0,4263	0,2683	0,2855	0,1000	0,3460	0,4779	0,3500	0,1607
	Doğalgaz	0,4231	0,3974	0,2441	0,6732	0,1000	0,1000	0,1000	0,2960	1,1846	0,4891	0,1000	0,1957	0,1000	0,5052	1,4197
	Isı	0,3615	0,3727	0,5219	0,2393	0,2000	0,2000	0,2000	0,4245	0,2167	0,3769	0,2000	0,3860	0,2000	0,5672	0,3801
48	Elektrik	0,4579	0,3902	0,4415	0,3445	0,2340	0,3613	0,2000	0,4110	0,8391	0,5471	0,2000	0,5413	0,8571	0,4076	0,3968
	Rüzgar	0,3161	0,4009	0,2881	0,1558	0,1041	0,1000	0,1000	0,3289	0,2506	0,4921	0,7419	0,1944	0,1000	0,4428	0,3811
	Doğalgaz	0,7155	1,0047	1,2441	1,1244	1,0747	1,0782	0,2000	0,7899	1,5589	0,7820	1,8000	0,2454	1,7460	0,6449	0,6801
	Isı	0,4428	0,4492	0,3717	0,5339	1,0610	0,2000	0,2000	0,4052	0,2119	0,6575	0,2000	0,4389	0,6737	0,6093	0,3612
51	Elektrik	0,2994	0,4476	0,3832	0,5126	0,8743	0,8582	1,0000	0,3841	0,2595	0,1360	0,1000	0,1184	0,1000	0,2172	0,3587
	Rüzgar	0,3547	0,4293	0,4471	0,5346	0,1000	0,4852	0,1000	0,1809	0,1074	0,3055	0,1000	0,3500	0,4897	0,3662	0,3676
	Güneş	0,2879	0,2417	0,2330	0,1122	0,1000	0,2704	0,5000	0,3619	0,1203	0,2116	0,1000	0,1729	0,1000	0,2298	0,4987
	Doğalgaz	0,5067	0,4391	0,8793	0,8699	0,1896	0,1595	0,1000	0,1271	0,2830	0,5648	0,1000	0,7315	0,1000	0,8236	1,2528
52	Elektrik	0,4653	0,4503	0,4078	1,3853	0,7047	0,1000	0,1000	0,3331	0,4930	0,2399	0,1000	0,1327	0,1000	0,3624	1,0942
	Rüzgar	0,2597	0,3154	0,3093	0,1814	0,1021	0,1000	0,6000	0,2473	0,2095	0,1936	0,2707	0,2958	0,5568	0,1743	0,1000
	Güneş	0,2702	0,3377	0,2770	0,1686	0,1635	0,1453	0,5000	0,1604	0,1909	0,2170	0,1000	0,3853	0,1000	0,3277	0,2398
	Doğalgaz	0,3809	0,3812	0,4232	0,2561	0,1206	0,4713	0,1000	0,1399	0,1465	0,3280	0,1000	0,1347	0,1000	0,2148	0,2025
53	Isı	0,2790	0,2976	0,5403	0,1923	0,5653	0,1291	0,1000	0,1771	0,2152	0,2826	0,1000	0,6955	0,1000	0,2635	0,4055
	Elektrik	0,4491	0,3245	0,5640	1,6749	0,7261	0,1000	0,1000	0,1009	0,1640	0,7123	0,1000	0,1231	0,1000	0,3853	0,7765
	Rüzgar	0,3650	0,3531	0,3590	0,1301	0,1008	0,1243	0,6000	0,2805	0,1507	0,4715	0,6000	0,4131	0,1000	0,4392	0,4999
	Güneş	0,3703	0,2343	0,2597	0,2027	0,5000	0,3599	0,5000	0,1406	0,2173	0,1724	0,1000	0,4163	0,4889	0,1437	0,2621
54	Doğalgaz	1,1620	1,5018	0,6225	1,2969	0,9811	0,1000	0,1000	2,7587	1,3537	1,0185	3,2000	0,2881	0,1525	1,9705	1,6135
	Isı	0,2808	0,3454	0,3797	0,1285	0,1822	0,2358	0,9000	0,1774	0,1593	0,5171	0,9000	0,2712	0,3535	0,1550	0,5218
	Elektrik	0,4362	0,4453	0,6013	1,0102	0,2416	0,2000	0,2000	0,3305	0,5135	0,2800	0,2000	0,5030	0,2000	0,2419	1,0332
	Rüzgar	0,3678	0,3754	0,3265	0,2139	0,1299	0,1578	0,1000	0,3324	0,2838	0,2394	0,1000	0,1427	0,6955	0,3293	0,4232
54	Güneş	0,2683	0,2854	0,1726	0,1033	0,1303	0,1147	0,5000	0,1678	0,2498	0,1924	0,1000	0,3249	0,1000	0,3102	0,2141
	Doğalgaz	0,4503	0,4819	0,3928	0,7177	0,7789	0,4624	0,2000	0,4358	0,2614	1,0771	0,2000	0,2993	0,2000	0,6076	0,4018

Çizelge 4.34. (devam) Durum-12 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
56	Elektrik	0,4018	0,4001	0,4263	0,4620	0,1147	0,2219	1,7500	0,5795	1,0473	0,4783	0,1000	0,1212	0,1000	0,2702	0,1476
	Rüzgar	0,3161	0,2799	0,3551	0,2856	0,1429	0,1430	0,1000	0,2059	0,3112	0,5368	0,7500	0,2028	0,3007	0,3420	0,2466
	Güneş	0,2367	0,3609	0,1977	0,1564	0,1000	0,1000	0,5000	0,1287	0,3026	0,2811	0,1000	0,3728	0,5000	0,2774	0,4634
	Doğalgaz	0,4826	0,4117	0,4164	0,3281	0,5361	0,9893	0,9241	0,3318	0,3138	0,2579	0,2000	0,2226	0,2501	0,5436	0,5404
	Isı	0,4242	0,3214	0,2259	0,4065	0,2030	0,1000	0,3994	0,2416	0,1748	0,2401	0,9000	0,1163	0,9000	0,5909	0,1020
57	Elektrik	0,3759	0,3476	0,4405	0,1443	0,8923	1,4479	0,1000	0,5740	0,3673	0,2547	0,1000	0,2331	0,8285	0,1780	1,1339
	Rüzgar	0,2600	0,3709	0,3139	0,1151	0,1231	0,1000	0,1000	0,4228	0,3701	0,2515	0,1000	0,1720	0,1016	0,3284	0,1218
	Güneş	0,2712	0,2784	0,2133	0,1451	0,1155	0,3690	0,1000	0,2340	0,1984	0,2023	0,1000	0,3135	0,1000	0,2542	0,3299
	Doğalgaz	0,4329	0,4375	0,5728	0,2189	0,2000	0,8930	1,8000	0,9860	0,2223	0,4455	1,8000	0,2057	0,2000	0,3647	0,3259
58	Elektrik	0,3822	0,2967	0,3905	0,1136	1,5936	2,7987	1,9084	0,4735	0,6269	0,2172	1,9079	0,2373	0,1000	0,5514	0,4096
	Rüzgar	0,3692	0,3240	0,4736	0,1056	0,4228	0,1545	0,1000	0,1786	0,2837	0,1982	0,7500	0,1165	0,7491	0,2917	0,4831
	Güneş	0,2975	0,3151	0,3335	0,1587	0,2388	0,2180	0,1000	0,2300	0,2925	0,2421	0,1000	0,2012	0,4346	0,2968	0,2188
	Isı	0,4211	0,3936	0,3635	0,7364	0,2116	0,2000	0,2000	0,3919	1,1671	0,3249	0,2000	0,7692	0,2014	0,5277	0,4991
60	Elektrik	0,3535	0,3589	0,2689	0,1170	0,1000	1,2989	0,3268	0,5847	0,5720	0,1753	0,1000	0,1115	0,1000	0,4404	0,5363
	Rüzgar	0,2680	0,3494	0,2576	0,1678	0,2867	0,1542	0,1000	0,4628	0,4568	0,3575	0,1000	0,3981	0,7500	0,1283	0,1002
	Doğalgaz	0,7577	0,6891	0,6844	0,2488	1,4211	1,6971	0,2000	0,4919	0,3913	1,1022	0,2000	0,8948	0,2000	0,3842	0,9371
	Isı	0,2991	0,2803	0,2333	0,1805	0,3365	0,1476	0,1000	0,1317	0,1779	0,3319	0,1000	0,2148	0,2889	0,3899	0,4323
61	Elektrik	0,3275	0,3801	0,4015	1,0222	0,1000	0,1000	0,1000	0,5448	0,3450	0,5845	0,1000	0,4791	0,2045	0,2465	0,2604
	Rüzgar	0,3305	0,2968	0,2933	0,1101	0,5273	0,7484	0,1000	0,2539	0,6587	0,2790	0,1000	0,7324	0,1000	0,4489	0,2228
	Güneş	0,2555	0,3447	0,3207	0,3225	0,4933	0,2332	0,1000	0,2100	0,2062	0,4608	0,1000	0,1101	0,1000	0,2114	0,3995
	Doğalgaz	0,4094	0,2955	0,3234	0,2396	0,1378	0,1000	1,0000	0,2156	0,2888	0,7041	0,1000	0,9259	0,1636	0,2196	0,5272
	Isı	0,2457	0,3130	0,2285	0,1142	0,1267	0,1000	0,1000	0,1450	0,2138	0,2176	0,1000	0,4502	0,1661	0,2198	0,1000
62	Elektrik	0,3899	0,3920	0,3058	0,3388	0,1178	0,1000	0,1000	0,2808	0,3260	0,1510	0,1028	0,1144	0,1059	0,4081	0,4399
	Rüzgar	0,3291	0,2694	0,2737	0,1987	0,1442	0,5441	0,1000	0,1926	0,2242	0,2437	0,1000	0,1667	0,1048	0,3426	0,2462
	Güneş	0,3014	0,3217	0,4360	0,1433	0,3688	0,1044	0,5000	0,2908	0,1387	0,2479	0,4169	0,2150	0,1399	0,2067	0,1132
	Doğalgaz	0,4431	0,4079	0,4051	0,3046	0,2000	1,0000	0,2000	0,3229	0,2939	0,5647	0,2000	0,3853	0,6214	0,4900	0,6766
63	Elektrik	0,3520	0,4077	0,2768	0,1194	0,2375	0,4071	0,1000	0,4005	0,1416	0,6661	0,1000	0,3790	0,1107	0,3432	0,1697
	Rüzgar	0,4374	0,2870	0,3498	0,1058	0,1000	0,6788	0,1000	0,1842	0,3896	0,4099	0,1000	0,5731	0,1000	0,2472	0,3914
	Güneş	0,3030	0,2588	0,3074	0,1137	0,1000	0,1000	0,1000	0,4155	0,1484	0,3490	0,1000	0,1389	0,4553	0,3383	0,4999
	Doğalgaz	0,3919	0,3818	0,3567	0,3632	0,8970	1,7152	0,1000	1,6432	0,2878	0,7040	0,1000	0,8642	0,2931	0,3876	0,1000
	Isı	0,2528	0,2363	0,1935	0,2923	0,1001	0,1000	0,2213	0,2667	0,1057	0,2537	0,3961	0,1889	0,4000	0,1426	0,1068

Çizelge 4.34. (devam) Durum-12 için algoritmalarından elde edilen optimal çözüm sonuçları.

Hub No	Giriş Enerjisi	FDB-LSHADE SPACMA	LSHADE SPACMA	LSHADE	MPA	EO	BMO	AEFA	AEO	SDO	AGDE	COA	SSA	MFO	GSA	GA
64	Elektrik	0,3745	0,2902	0,2873	0,2812	0,3383	0,4184	0,1000	0,1675	0,1127	0,5871	0,1000	0,2163	2,1000	0,4751	0,2146
	Rüzgar	0,2784	0,3751	0,4294	0,4371	0,1000	0,1004	0,1000	0,2716	0,2502	0,3049	0,7458	0,7381	0,2045	0,4641	0,2887
	Güneş	0,2861	0,3455	0,1826	0,1925	0,1000	0,1000	0,1000	0,2847	0,2602	0,3832	0,1000	0,4718	0,1899	0,2720	0,1919
	Doğalgaz	0,4670	0,4728	0,5119	0,6734	0,2000	0,2000	0,2000	0,8189	0,2262	0,3271	0,2000	0,5557	0,2000	0,3641	0,2452
	Isı	0,2539	0,2690	0,2067	0,1042	0,1081	0,1000	0,4000	0,1087	0,2192	0,2577	0,4000	0,3224	0,3678	0,2955	0,2409
66	Elektrik	0,4235	0,4437	0,5623	0,2394	0,2093	0,2000	0,2000	0,6896	0,2776	0,3901	0,2000	0,3822	0,2000	0,4461	0,2000
	Rüzgar	0,3438	0,3495	0,3309	0,1035	0,6025	0,2114	0,1000	0,2059	0,1044	0,4762	0,1000	0,2760	0,6369	0,2021	0,1980
	Güneş	0,2821	0,3182	0,3116	0,1067	0,1077	0,1069	0,5000	0,1628	0,1487	0,1557	0,1000	0,4121	0,1000	0,2381	0,2377
	Doğalgaz	0,5448	0,4401	0,6813	0,1030	0,9651	0,9463	1,0000	0,2303	0,2954	0,2651	0,1000	0,1520	0,1000	0,8545	0,1029
	Isı	0,3403	0,2912	0,3526	0,1619	0,8484	0,3161	0,9000	0,4480	0,1480	0,2131	0,1000	0,2393	0,5279	0,4214	0,1019
67	Elektrik	0,4482	0,4636	0,5976	0,8833	1,3893	0,5372	1,5000	0,3254	0,2574	0,4155	0,2000	0,7172	1,5000	0,3962	0,3591
	Rüzgar	0,3456	0,3202	0,3551	0,1574	0,1089	0,1917	0,1000	0,1768	0,1531	0,2059	0,3918	0,1132	0,3957	0,4724	0,3682
	Güneş	0,3649	0,3076	0,1705	0,3371	0,1144	0,1000	0,1000	0,1335	0,1419	0,2373	0,5000	0,2695	0,1083	0,1511	0,3601
	Doğalgaz	0,6083	0,4695	0,6273	0,2929	0,2302	1,3012	0,1000	0,6511	0,1143	0,2901	0,1000	0,9352	0,4999	0,7083	0,8685
	Isı	0,2560	0,3406	0,2847	0,3611	0,1126	0,5760	0,9000	0,2992	0,1022	0,1784	0,1000	0,4078	0,2876	0,2302	0,3709
68	Elektrik	0,3212	0,2600	0,2961	0,1645	0,1003	0,2512	0,9192	0,4327	0,5319	0,2046	0,1000	0,4426	0,2511	0,1759	0,1316
	Rüzgar	0,3318	0,3884	0,2723	0,1639	0,6523	0,4081	0,7500	0,2620	0,2848	0,2568	0,1000	0,4514	0,4522	0,3013	0,3118
	Güneş	0,3147	0,2991	0,1828	0,1039	0,1363	0,2068	0,2497	0,1202	0,2482	0,2076	0,1000	0,1704	0,5000	0,4629	0,2820
	Doğalgaz	0,3568	0,3865	0,5625	0,2972	1,0218	1,5803	0,1000	0,3091	0,1369	0,3805	0,1000	0,1662	0,1018	0,3043	0,2171
	Isı	0,2661	0,2974	0,3967	0,1219	0,6681	0,1000	0,9000	0,3283	0,3643	0,3974	0,9000	0,1319	0,4967	0,1471	0,2688
69	Elektrik	0,3546	0,3530	0,4626	0,3070	0,1000	1,0318	0,1000	0,4939	0,2404	0,3279	0,1000	0,3122	0,1000	0,7617	0,3501
	Rüzgar	0,3442	0,2845	0,3327	0,4145	0,3160	0,1521	0,1000	0,1631	0,2591	0,1512	0,6000	0,2542	0,6000	0,3580	0,2878
	Güneş	0,2886	0,2355	0,1967	0,1180	0,1224	0,2702	0,5000	0,1804	0,1959	0,1407	0,3673	0,1118	0,1000	0,2590	0,1364
	Doğalgaz	0,5054	0,6078	0,5578	0,1835	0,1923	1,7594	1,8000	0,5300	0,2694	0,3700	0,1000	0,5549	0,1010	0,6662	0,3386
	Isı	0,4459	0,4444	0,3444	1,2491	0,3272	0,2000	0,2000	0,2101	1,4555	0,6930	0,2000	0,5825	0,2000	0,3855	0,2166
Toplam Maliyet (mu)		43629,230	43662,597	43419,184	41843,855	41655,552	41967,387	40965,761	42593,545	42133,111	42486,951	40983,984	42156,538	41598,686	42777,715	42413,657
Toplam Kayıp (pu)		11,9079	11,8766	11,6871	11,3941	11,5022	11,4380	10,1778	11,4180	12,6724	11,5579	11,4992	11,5243	11,2093	12,2230	11,6526
Amaç Fonksiyonu (mu)		51875,766	51893,754	51473,889	49411,691	49260,774	49586,808	47583,889	50313,089	50608,181	50281,534	48464,693	49868,021	49000,165	51077,240	50258,579
Hesaplama Zamanı (s)		103510,65	98718,32	98276,71	100213,64	96738,50	104964,11	93378,19	95989,46	99941,12	99189,84	97631,00	95292,82	91267,79	100014,05	97076,22

Çizelge 4.35'te MSA algoritmalarından elde edilen 30 bağımsız denemenin minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre, AEFA en optimal çözümü elde ederken, COA ortalama değerinde ilk sırada yer almıştır. Ancak, FDB-LSHADESPACMA algoritması rakiplerine göre kötü performans sergileyerek on üçüncü sırada yer almıştır.

Çizelge 4.35. Durum-12 için MSA algoritmalarının minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma uygunluk değerleri.

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
FDB-LSHADESPACMA	51875,7656	52105,2862	52015,9860	62,2338
LSHADESPACMA	51893,7542	52403,2095	52203,7890	151,5140
LSHADE	51473,8890	52391,5988	52261,3022	161,7311
MPA	49411,6909	51059,7019	50356,8671	468,1039
EO	49260,7740	51107,6947	50384,1191	547,1785
BMO	49586,8079	50482,1003	50128,5078	236,7694
AEFA	47583,8893	50557,3381	49670,0988	737,6863
AEO	50313,0890	51367,6298	50978,4691	295,3811
SDO	50608,1811	51585,0128	51147,5410	293,6221
AGDE	50281,5340	51333,6705	51020,5116	228,8804
COA	48464,6929	49932,3446	49315,4837	396,2870
SSA	49868,0213	51065,4046	50669,1921	269,2165
MFO	49000,1653	50636,0986	50030,5686	448,8609
GSA	51077,2405	51962,7545	51626,5277	252,2884
GA	50258,5789	51400,1241	50861,1597	278,6187

4.4.13. İstatistiksel Analiz ve Yakınsama Analizi

Bu alt bölümde, enerji hub modelleri kullanılarak oluşturulan dört farklı test sistemi ile amaç fonksiyonları kullanılarak oluşturulan on iki simülasyon çalışmasının sonuçları istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Algoritmalarından elde edilen sonuçları değerlendirmek amacıyla, parametrik olmayan ve literatürde algoritmaların performanslarını karşılaştırmak için sıklıkla kullanılan Friedman testi kullanılmıştır. Friedman puanları, algoritmalarından 30 bağımsız deneme sonucunda elde edilen ortalama uygunluk fonksiyonu değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu puanlar, algoritmaların istatistiksel olarak sırasını gösterir. On iki simülasyon çalışması için algoritmaların Friedman puanları Çizelge 4.36'da verilmiştir. Çizelge 4.36'nın son sütununda, tüm simülasyon çalışmaları sonucunda algoritmaların elde ettiği puanların ortalama değeri verilmiştir. Her çalışma sonucunda elde edilen en iyi puan koyu renk ile işaretlenmiştir.

Çizelge 4.36. On iki durum çalışması için algoritmaların Friedman sıralama sonuçları.

Algoritma	Durum-1	Durum-2	Durum-3	Durum-4	Durum-5	Durum-6	Durum-7	Durum-8	Durum-9	Durum-10	Durum-11	Durum-12	Ortalama Sıra
FDB-LSHADESPACMA	1,2667	1,0000	1,7667	1,2333	1,0333	1,1333	1,7667	1,0333	1,4000	13,0667	2,8000	13,0333	3,3778
COA	5,0000	3,2000	5,2333	4,4667	2,8000	4,8667	4,4333	2,9667	4,2667	1,0000	1,9333	1,0667	3,4361
LSHADESPACMA	3,0667	2,1000	3,0000	2,8333	2,1667	3,0000	3,0000	2,0333	2,9667	13,9333	2,9000	14,2667	4,6056
AGDE	4,0333	7,1000	5,3333	4,6333	8,1333	5,2667	4,5667	8,9667	4,9000	10,2333	9,8333	9,6000	6,8833
MPA	6,7667	10,4667	4,4333	6,0333	6,3667	4,9667	6,2333	12,3667	5,8333	5,6333	10,1000	5,0667	7,0222
BMO	11,8333	5,0000	11,6333	9,7333	4,7333	9,5667	9,3333	5,7667	8,7000	3,2667	8,5667	3,8000	7,6611
LSHADE	1,8000	13,3000	1,2333	1,9333	14,6333	1,8667	1,2333	12,5333	1,6333	15,0000	12,9667	14,7000	7,7361
EO	13,6000	5,2667	10,4000	12,0000	5,4667	10,1000	9,4667	9,9000	10,2000	5,2000	6,7667	5,6667	8,6694
GA	12,2333	7,0000	13,7667	8,8667	10,3000	8,7667	6,8333	6,5000	7,0000	7,2667	9,3000	8,1000	8,8278
MFO	9,9667	8,0667	11,4000	13,2333	9,8333	11,5667	10,9667	10,7333	10,2333	3,4000	4,5667	3,4667	8,9528
SDO	6,7333	11,5333	7,6000	7,1000	11,1667	6,9667	8,1667	7,4667	8,9000	10,3667	13,8333	10,8333	9,2222
AEFA	8,8000	9,7667	9,6000	14,1667	10,9667	14,7333	12,4667	14,6333	12,2667	2,5000	2,9667	2,0667	9,5778
SSA	12,6000	11,3000	13,4333	10,0333	9,2667	11,2333	14,8000	8,6000	14,0333	7,7667	7,7667	6,8667	10,6417
AEO	12,9000	10,6000	12,0667	10,9333	12,6000	12,7667	12,6333	5,7667	12,9333	9,3667	13,3333	9,4667	11,2806
GSA	9,4000	14,3000	9,1000	12,8000	10,5333	13,2000	14,1000	10,7333	14,7333	12,0000	12,3667	12,0000	12,1056

Çizelge 4.36’da verilen sonuçlar incelendiğinde, FDB-LSHADESPACMA Durum-1, Durum-2, Durum-4, Durum-5, Durum-6, Durum-8 ve Durum-9 için rakip algoritmalar arasında birinci sırada yer almıştır. Durum-3 ve Durum-7’den elde edilen sonuçlar incelendiğinde, LSHADE algoritması birinci olurken, FDB-LSHADESPACMA onu takip ederek ikinci olmuştur. Durum-11’de ise COA algoritması rakiplerini geçerek ilk sırada yer alırken, FDB-LSHADESPACMA ikinci sırada yer almıştır. Durum-10 ve Durum-12’nin puan sıralamasına bakıldığında ise, FDB-LSHADESPACMA algoritması kötü bir performans sergileyerek 15 MSA algoritması arasında on üçüncü sırada yer almıştır ve bu durumlarda COA algoritması birinci olmuştur. Sonuç olarak, FDB-LSHADESPACMA algoritması on iki durum çalışmasından yedisinde birinci sıradadır.

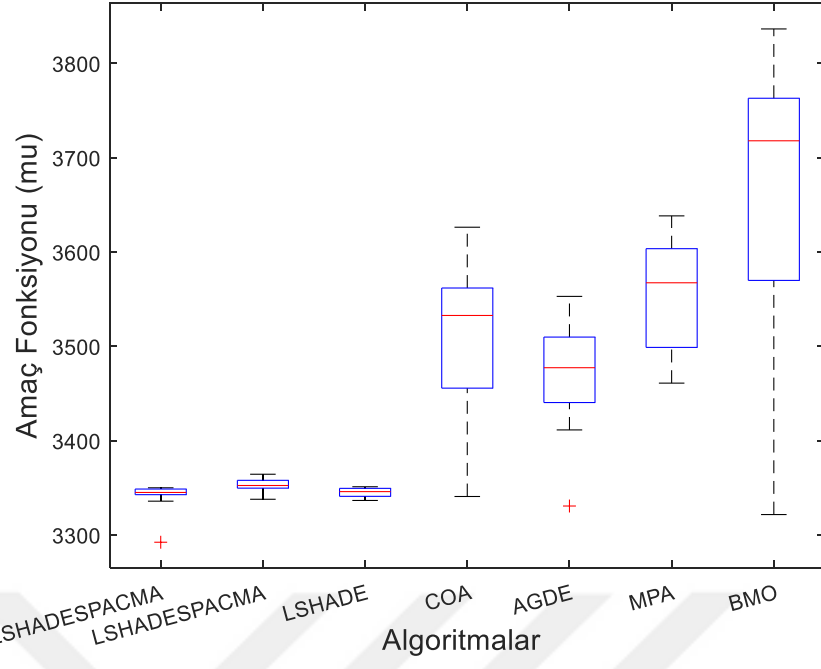
Ortalama sıralama değerlerine göre Çizelge 4.36’da verilen sonuçlar değerlendirildiğinde, FDB-LSHADESPACMA birinci sırada yer alarak rakiplerine göre üstün bir performans göstermiştir. İkinci sırada yer alan COA algoritması Test Sistemi-4 için gerçekleştirilen çalışmalarda, rakiplerini geçerek birinci olurken, diğer çalışmalarda ise sıralamada ilk beş içerisinde yer almıştır. Üçüncü sırada yer alan LSHADESPACMA algoritması ise, FDB-LSHADESPACMA gibi Durum-10 ve Durum-12 için kötü bir puan elde ederken, diğer durumlarda elde ettiği puanlara göre tüm algoritmalar arasında ilk üç sıradadır. Çizelge 4.36’da verilen sonuçlara göre, LSHADE algoritmasının yedinci sırada yer alması dikkat çekici bir sonuçtur. LSHADE, CEC2014 yarışmasının kazanan algoritmasıdır. Ancak, Durum-3 ve Durum-7’de ilk sıradayken, Durum-2, Durum-5, Durum-8, Durum-10, Durum-11 ve Durum-12’de 15 algoritma içerisinde son ikide yer almıştır. Geri kalan durumlarda ise, ikinci sırada bulunmaktadır.

Önerilen FDB-LSHADESPACMA algoritması ile Çizelge 4.36’da verilen ortalama sıralama değerinde ilk yedi de yer alan COA, LSHADESPACMA, AGDE, MPA, BMO ve LSHADE algoritmaları arasındaki rekabete göre kazananı belirlemek, algoritmaların birbirine üstünlüğünü kanıtlamak ve algoritmalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark ortaya çıkarmak için Wilcoxon işaretli sıra testi uygulanmıştır. Wilcoxon ikili işaret testi sonuçları Çizelge 4.37’de verilmiştir. Wilcoxon işaret testi %5 anlamlılık düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlara göre, R+ değeri, 30 bağımsız deneme için önerilen FDB-LSHADESPACMA algoritmasının sonuçları ile rakip algoritmanın sonuçları karşılaştırıldığında rakip algoritmanın galip geldiği deneme sayısı toplamından elde edilen skoru göstermektedir. R- değeri ise önerilen algoritmanın 30 deneme içerisinde galip geldiği deneme sayısının toplamından oluşan skor değerini ifade etmektedir.

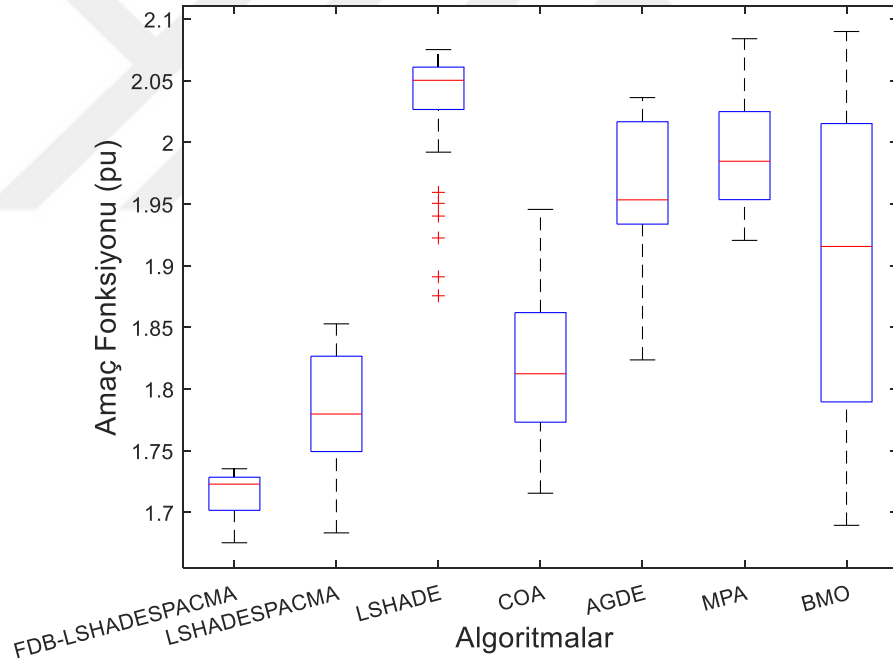
Çizelge 4.37. On iki durum çalışması için Wilcoxon ikili işaret testi sonuçları.

	LSHADESPACMA vs FDB-LSHADESPACMA			COA vs FDB-LSHADESPACMA			AGDE vs FDB-LSHADESPACMA		
	R+	R-	p-değeri	R+	R-	p-değeri	R+	R-	p-değeri
Durum-1	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-2	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-3	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-4	19	446	1,13E-05	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-5	0	465	1,73E-06	1	464	1,92E-06	0	465	1,73E-06
Durum-6	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-7	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-8	0	465	1,73E-06	1	464	1,92E-06	0	465	1,73E-06
Durum-9	0	465	1,92E-06	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-10	13	452	6,32E-06	465	0	1,73E-06	465	0	1,73E-06
Durum-11	145	320	7,19E-02	246	219	7,81E-01	0	465	1,73E-06
Durum-12	0	465	1,73E-06	465	0	1,73E-06	465	0	1,73E-06
	MPA vs FDB-LSHADESPACMA			BMO vs FDB-LSHADESPACMA			LSHADE vs FDB-LSHADESPACMA		
	R+	R-	p-değeri	R+	R-	p-değeri	R+	R-	p-değeri
Durum-1	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	131	334	3,68E-02
Durum-2	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-3	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	56	409	2,83E-04
Durum-4	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	44	421	1,06E-04
Durum-5	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-6	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	71	394	8,94E-04
Durum-7	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	87	378	2,77E-03
Durum-8	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-9	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06	174	291	2,29E-01
Durum-10	465	0	1,73E-06	465	0	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-11	1	464	1,92E-06	0	465	1,73E-06	0	465	1,73E-06
Durum-12	465	0	1,73E-06	465	0	1,73E-06	30	435	3,11E-05

Algoritmaların arama performansının detaylı olarak incelenebilmesi için on iki durumdan 30 bağımsız deneme sonucunda elde edilen veriler kullanılarak box-plot grafikleri çizdirilmiştir ve Şekil 4.6’da on iki durum için gösterilmiştir.

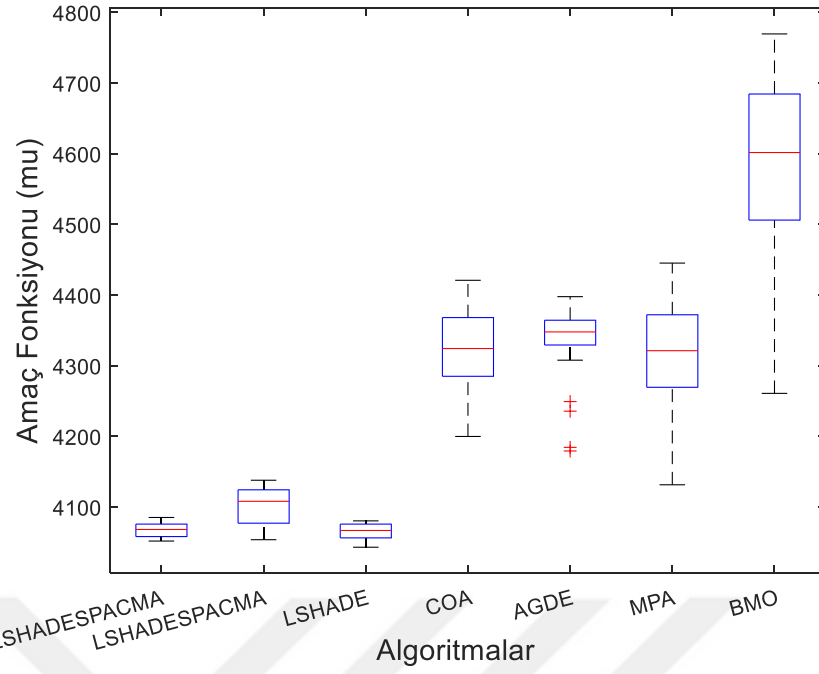


(a)

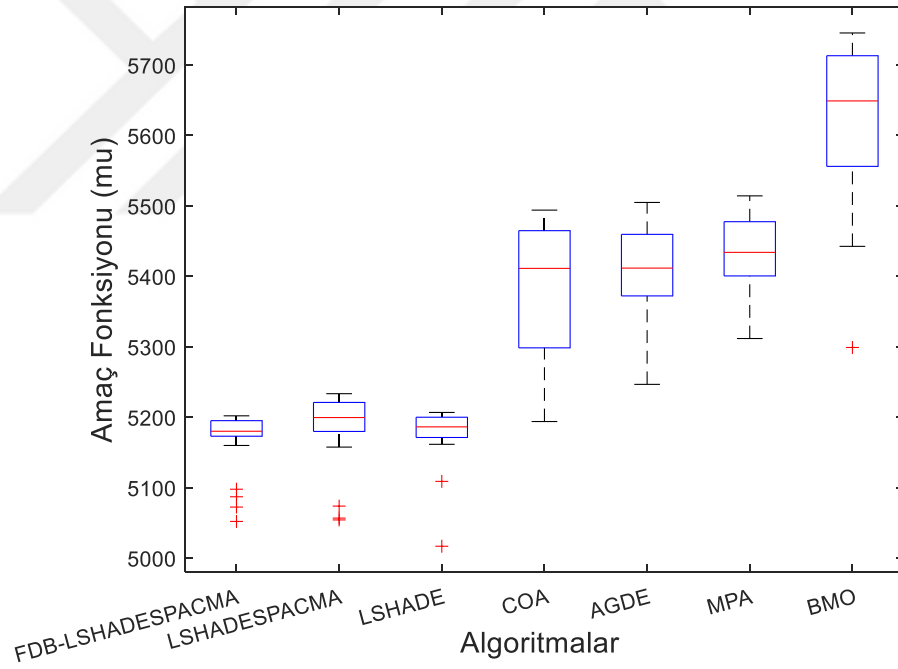


(b)

Şekil 4.6. Box-plot grafikleri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.

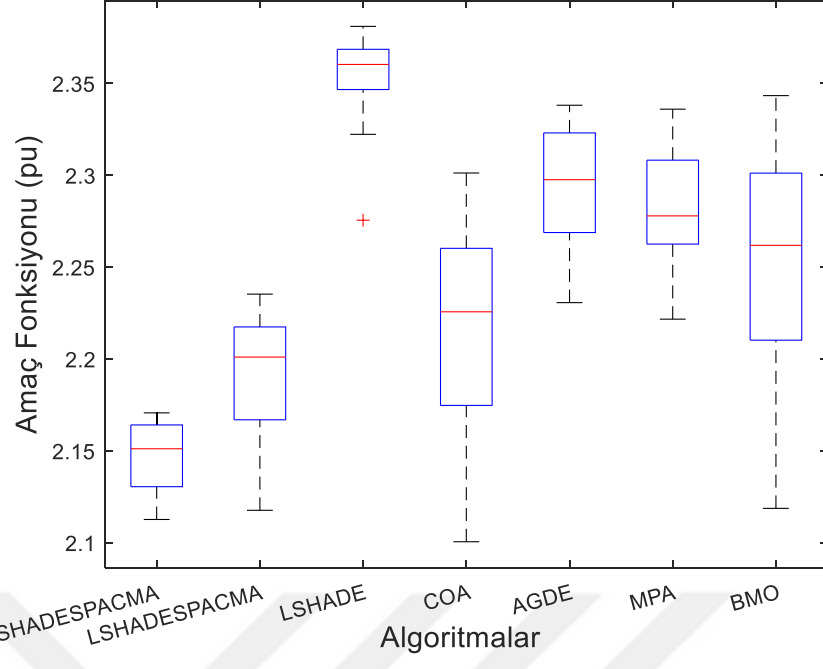


(c)

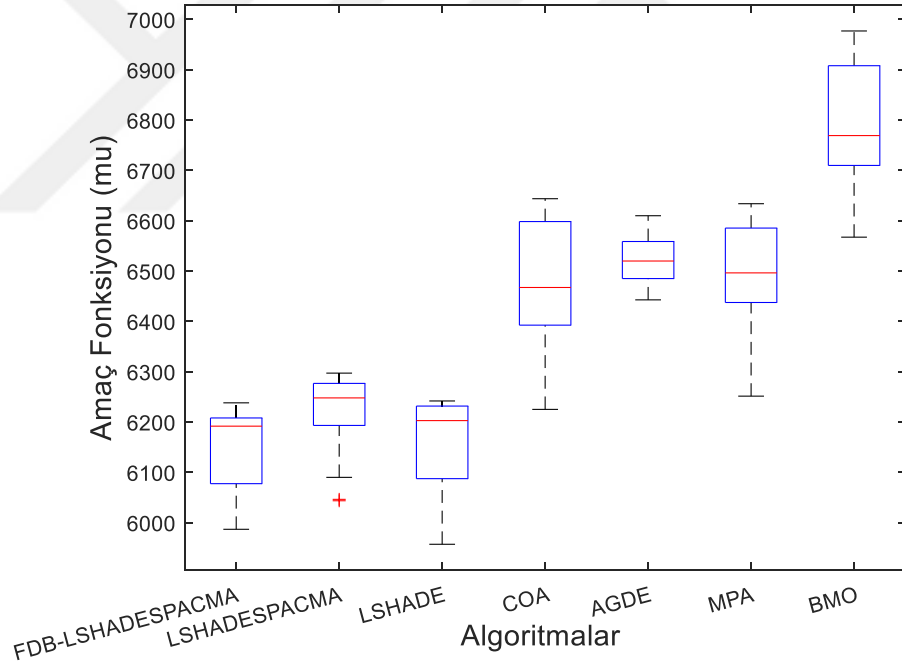


(d)

Şekil 4.6. (devam) Box-plot grafikleri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.

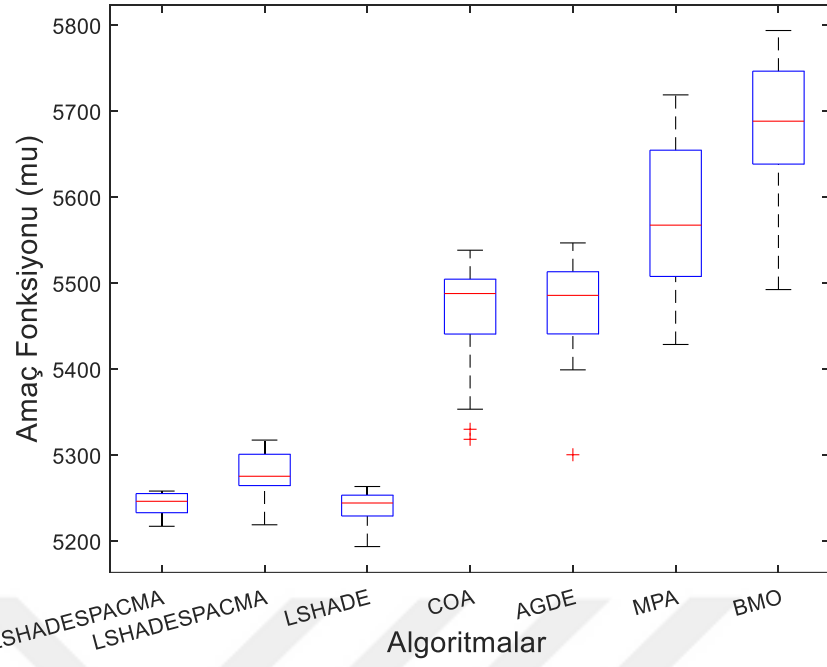


(e)

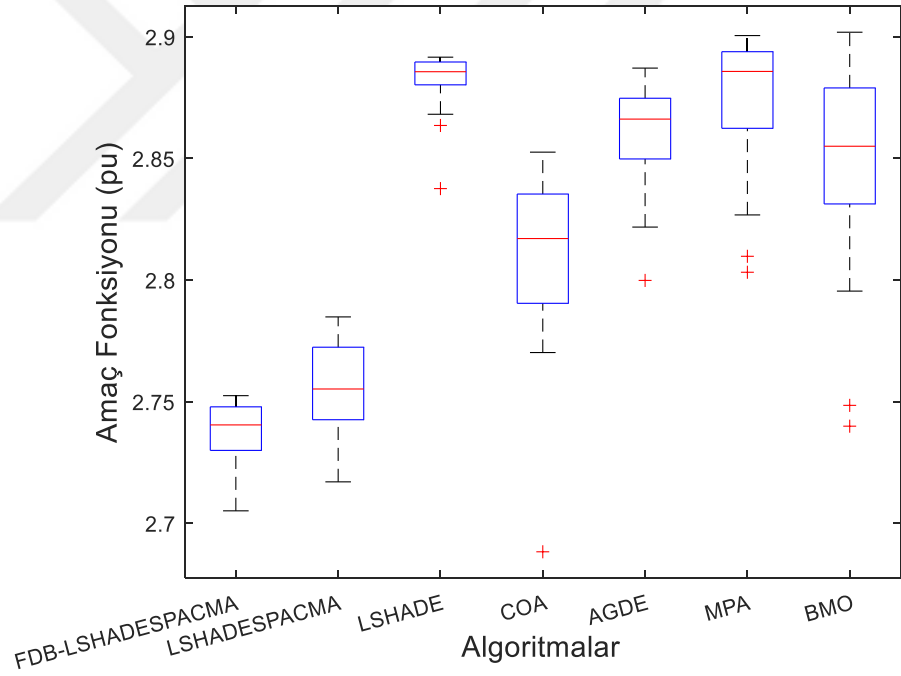


(f)

Şekil 4.6. (devam) Box-plot grafikleri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.

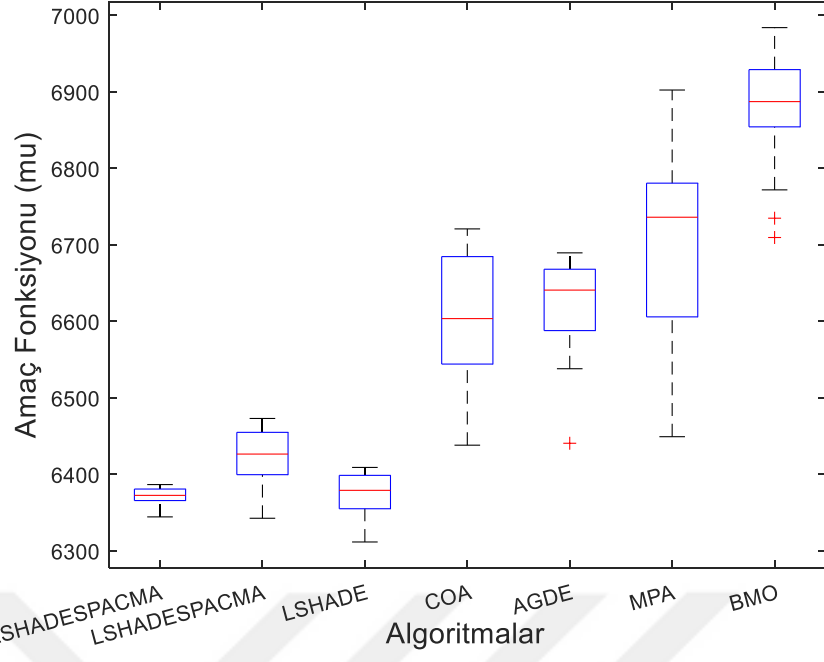


(g)

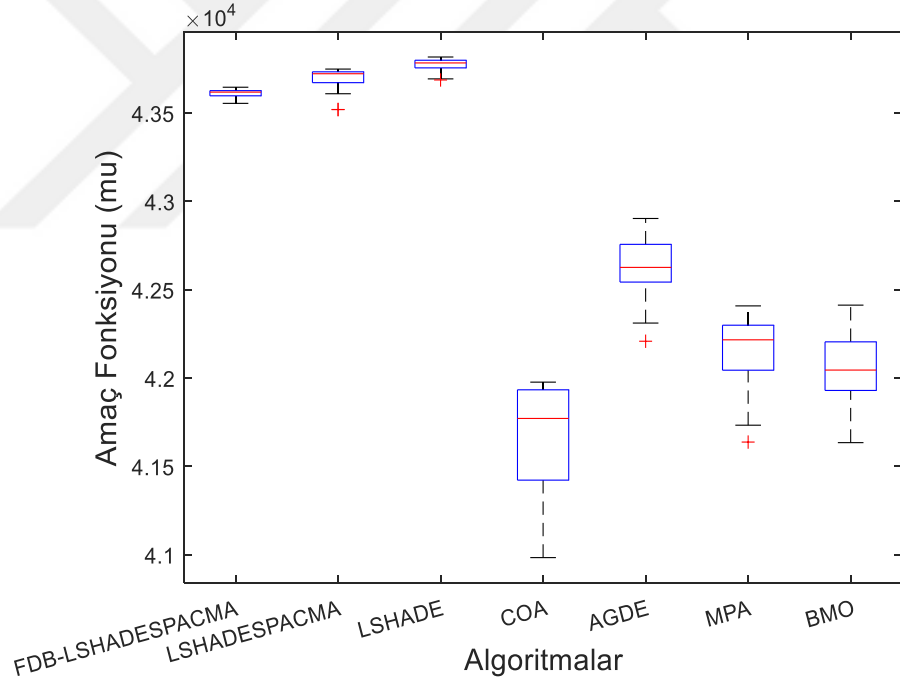


(h)

Şekil 4.6. (devam) Box-plot grafikleri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.

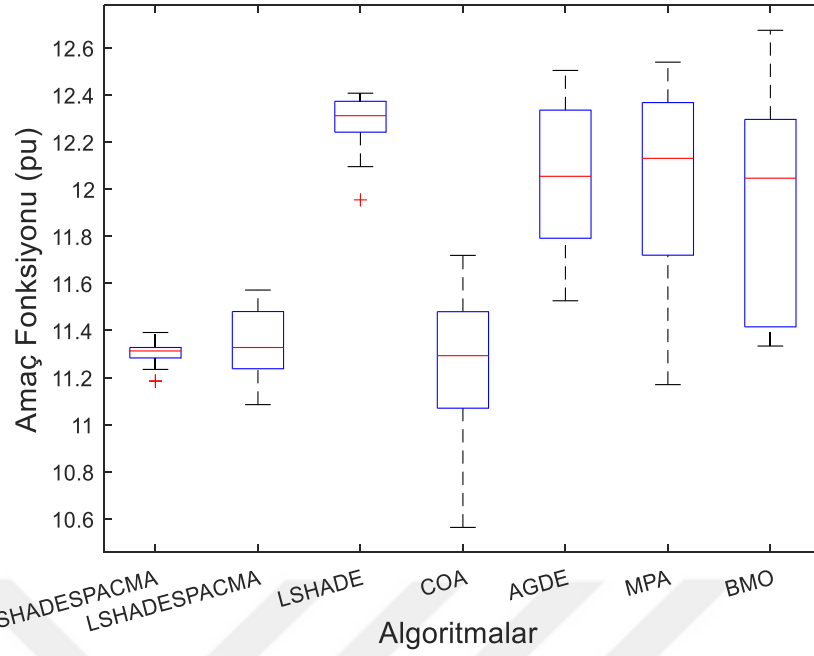


(i)

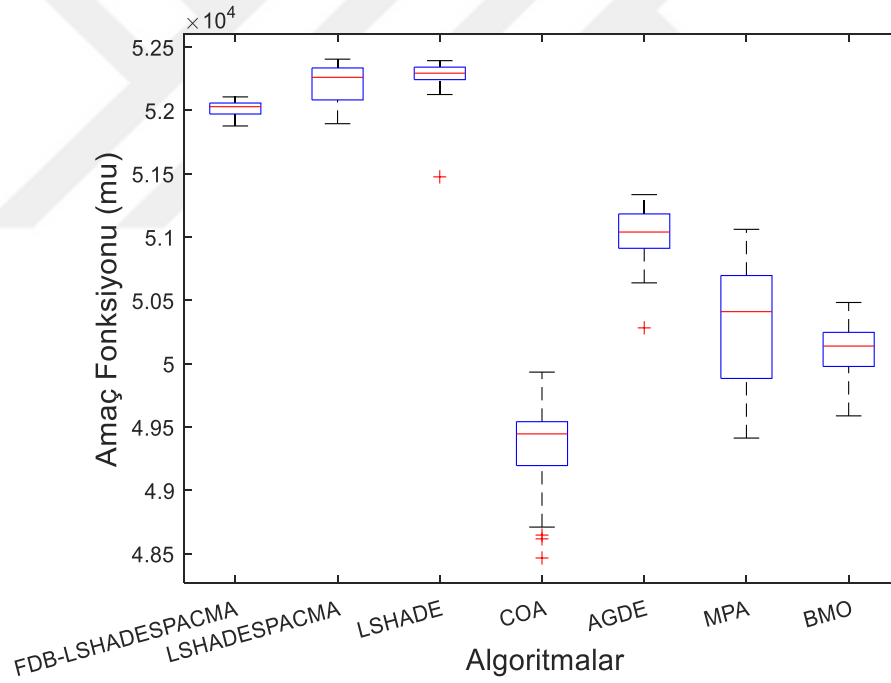


(j)

Şekil 4.6. (devam) Box-plot grafikleri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.



(k)



(l)

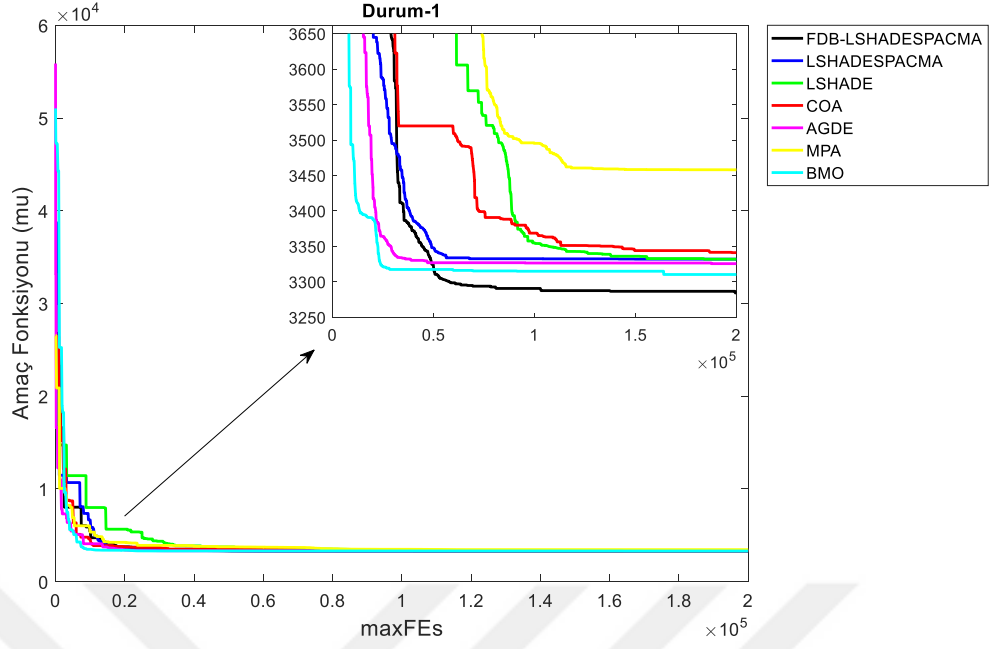
Şekil 4.6. (devam) Box-plot grafikleri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.

Şekil 4.6 (a, b, d, e, f, h, i)'da sırasıyla Durum-1, Durum-2, Durum-4, Durum-5, Durum-6, Durum-8 ve Durum-9 için verilen box-plot grafikleri incelendiğinde, FDB-

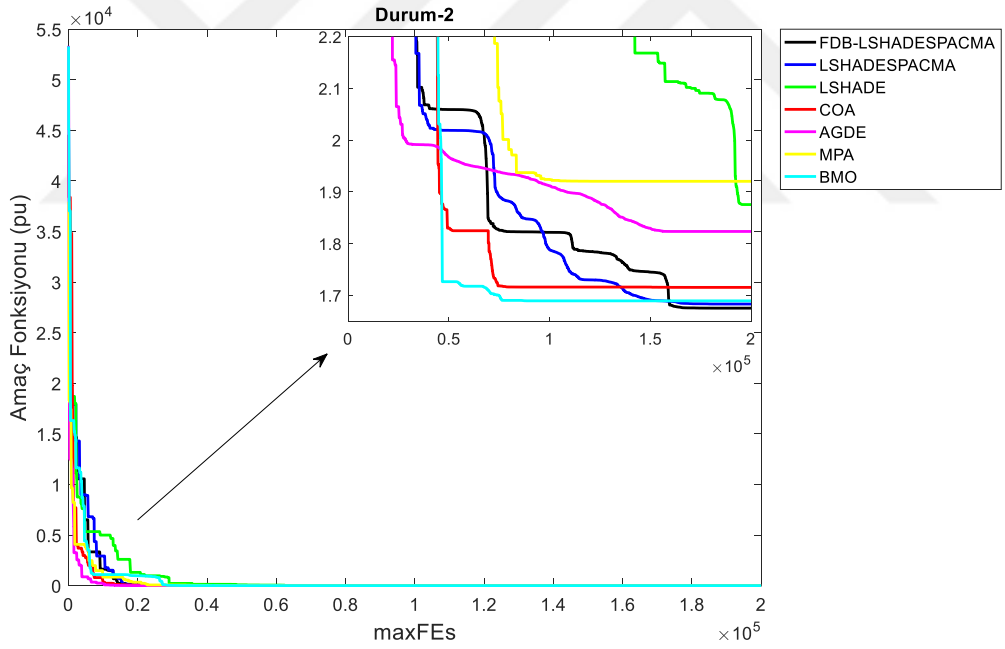
LSHADESPACMA algoritmasının rakip algoritmalarla göre daha kararlı ve iyi bir arama performansı sergilediği görülmektedir. Şekil 4.6 (c, g)'de sırasıyla Durum-3 ve Durum-7'ye ait box-plot grafikleri verilmiştir. Bu grafiklere göre, LSHADE minimum uygunluk fonksiyonu değerinde FDB-LSHADESPACMA' dan daha iyi sonuç elde ederken, ortalama ve medyan uygunluk fonksiyonu değerlerinde yakın sonuçlar göstermişlerdir. Şekil 4.6 (j, k, l)'de verilen box-plot grafikleri sırasıyla Durum-10, Durum-11 ve Durum-12'ye ait olup, COA algoritması rakiplerine göre daha iyi bir arama performansı göstermiştir. Box-plot grafiklerinden elde edilen sonuçlar, Çizelge 4.36'da verilen algoritmaların Friedman sıralama sonuçları ile de uyumludur.

Çizelge 4.36'dan elde edilen Friedman ortalama sıralama sonuçlarına göre ilk yedide yer alan FDB-LSHADESPACMA, COA, LSHADESPACMA, AGDE, MPA, BMO ve LSHADE algoritmalarının yakınsama eğrileri Şekil 4.7'de Durum 1-12 için verilmiştir. Şekil 4.7 (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l) sırasıyla Durum-1, Durum-2, Durum-3, Durum-4, Durum-5, Durum-6, Durum-7, Durum-8, Durum-9, Durum-10, Durum-11 ve Durum-12'ye ait yakınsama eğrilerini göstermektedir. Şekil 4.7 (a, b, c, d, e, f, g, h, i) verilen yakınsama eğrileri incelendiğinde, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının global optimum çözüme yakınsamada başarılı bir performans sergilediği görülmektedir. Ancak, Şekil 4.7 (j, k, l) grafikleri analiz edildiğinde, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının erken yakınsama gösterdiği ve bu nedenle de global optimum değere ulaşmada başarısız olduğu görülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, önerilen FDB-LSHADESPACMA ve rekabetçi 14 MSA algoritmasından on iki durum çalışmasının çözümü için elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. İstatistiksel analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçların, box-plot grafiklerinin ve yakınsama eğrilerinin değerlendirilmesi sonucunda, FDB-LSHADESPACMA algoritmasının on iki durumdan sadece Durum-10 ve Durum-12'de kötü performans sergilediği görülmektedir. Bu sonuç, önerilen algoritmanın rakiplerine kıyasla arama performansının daha iyi olduğu görülmektedir.

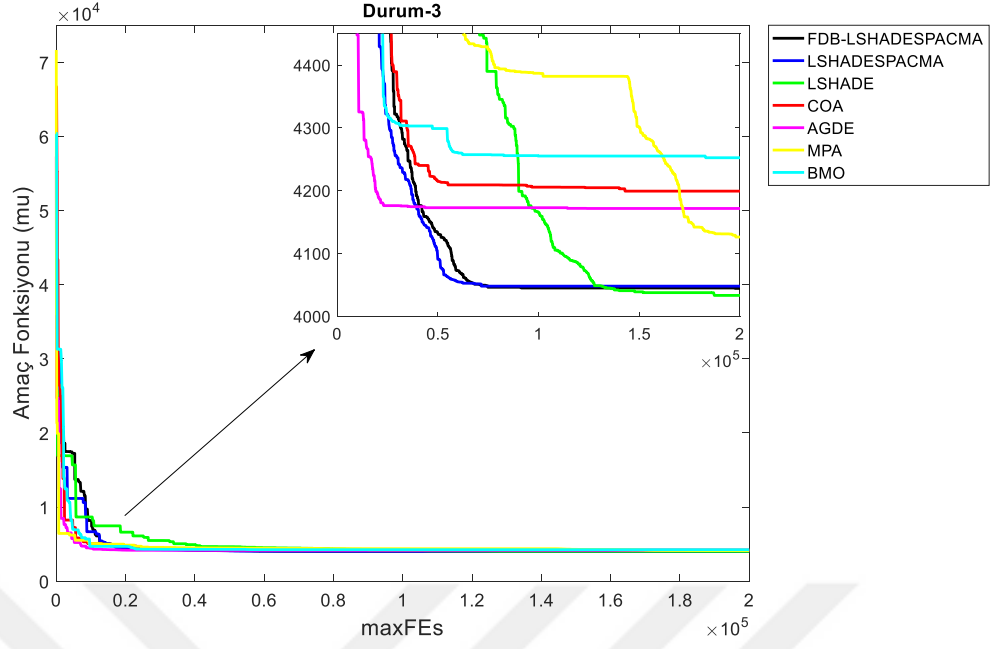


(a)

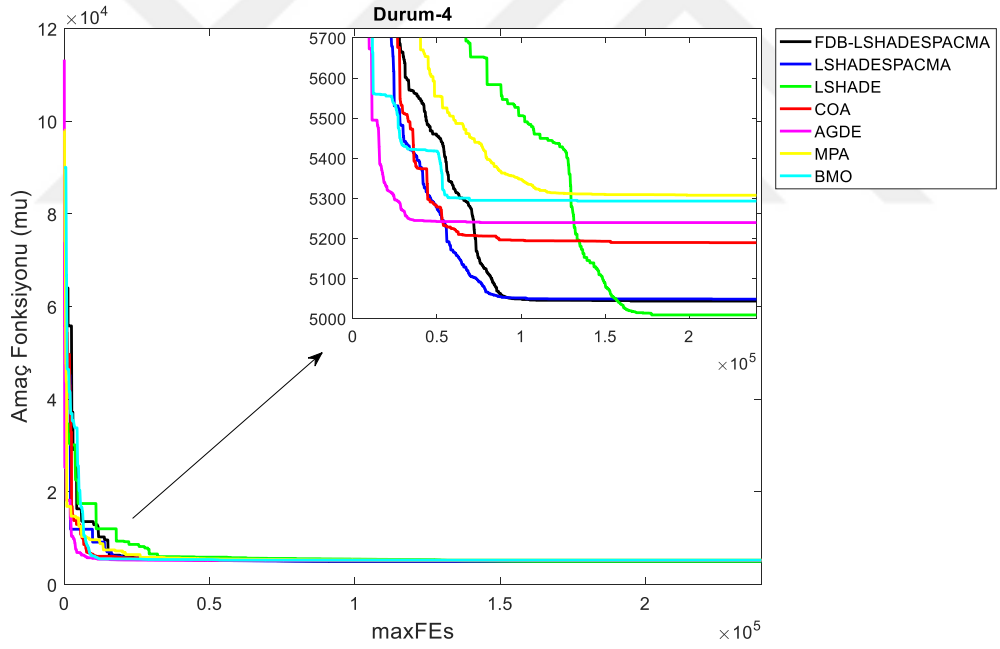


(b)

Şekil 4.7. Algoritmaların yakınsama eğrileri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.

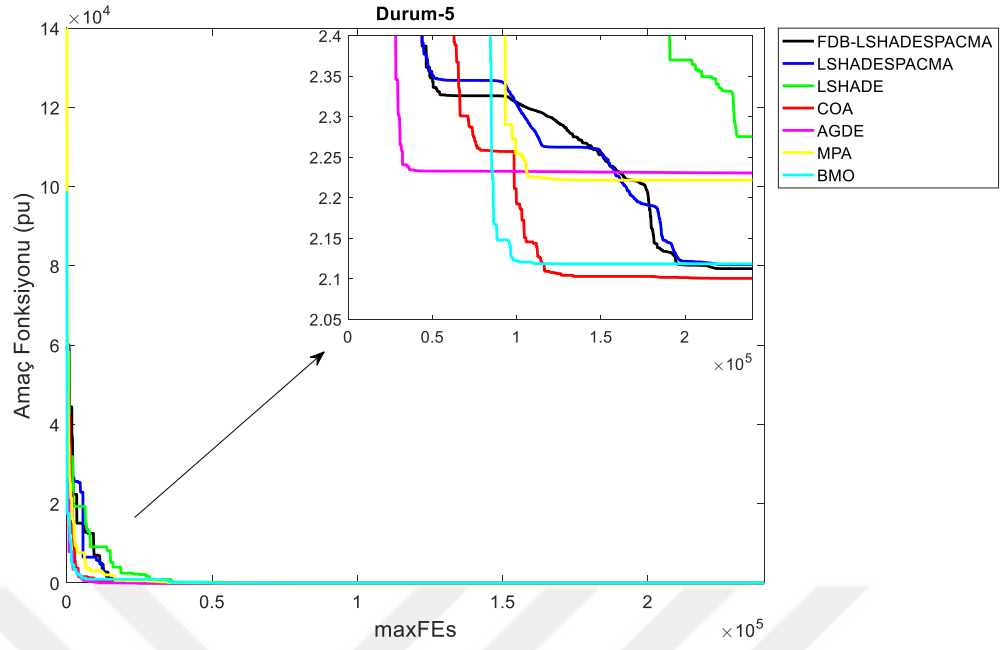


(c)

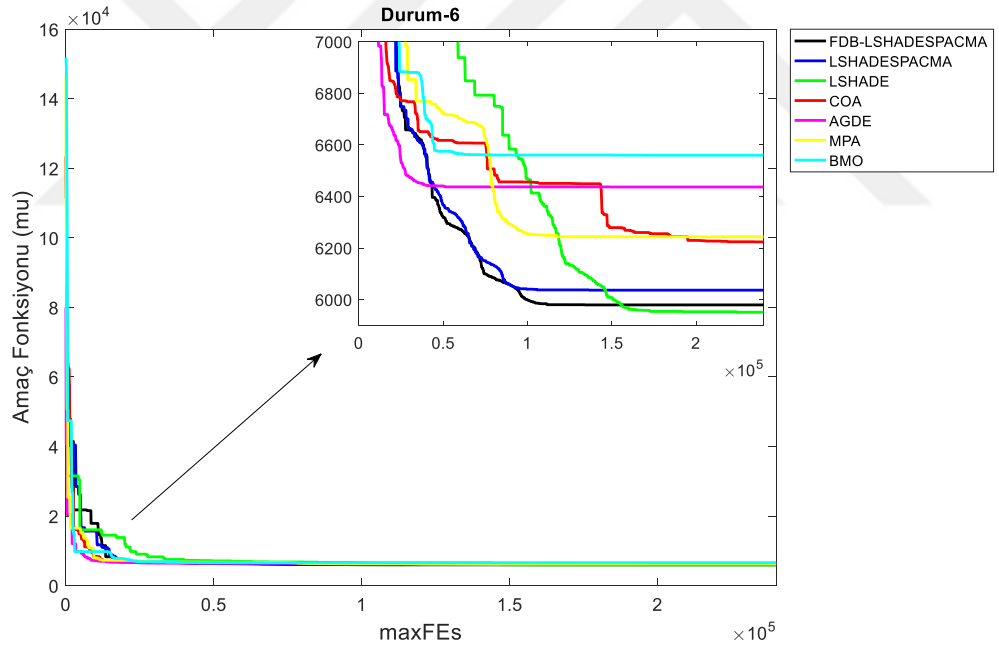


(d)

Şekil 4.7. (devam) Algoritmaların yakınsama eğrileri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.

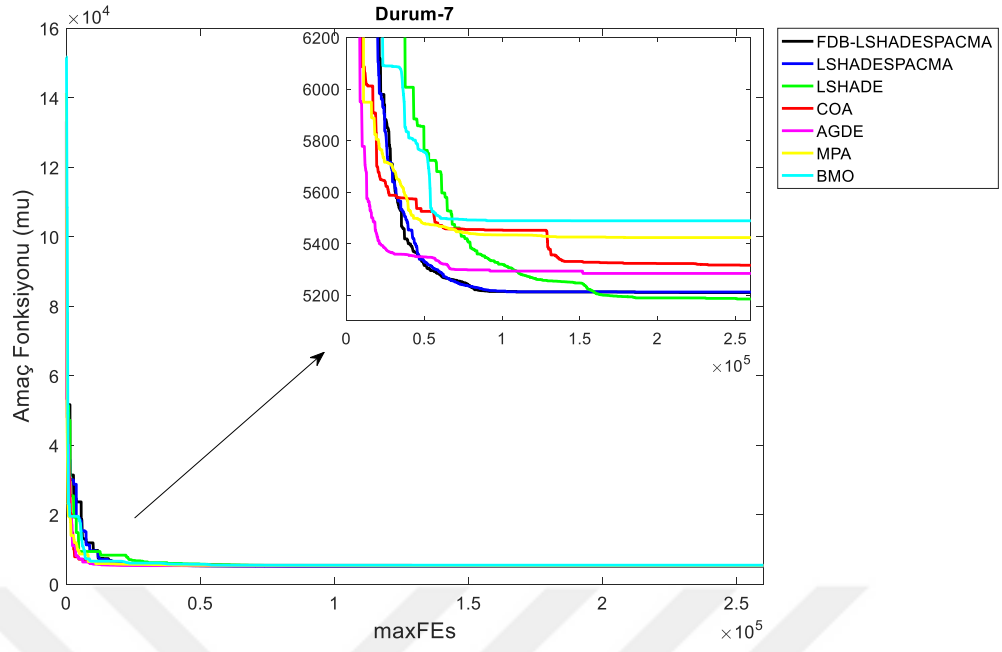


(e)

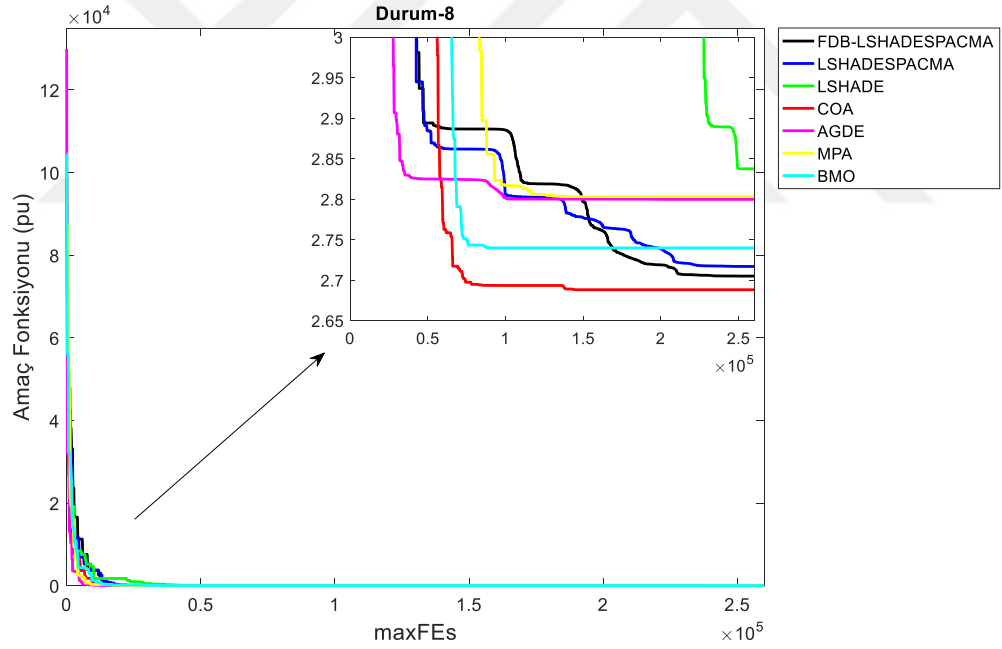


(f)

Şekil 4.7. (devam) Algoritmaların yakınsama eğrileri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.

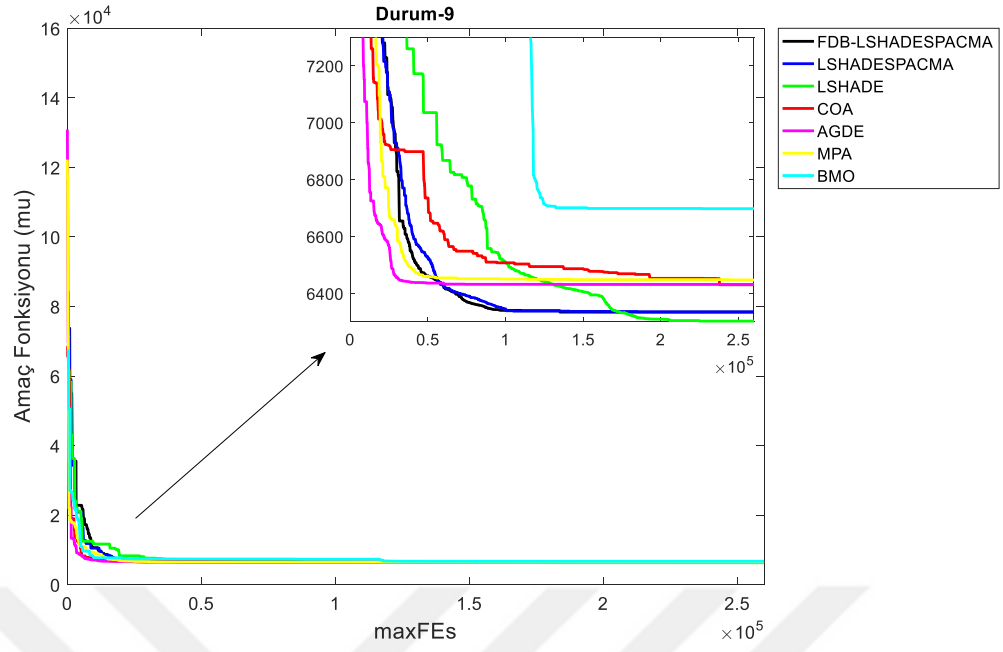


(g)

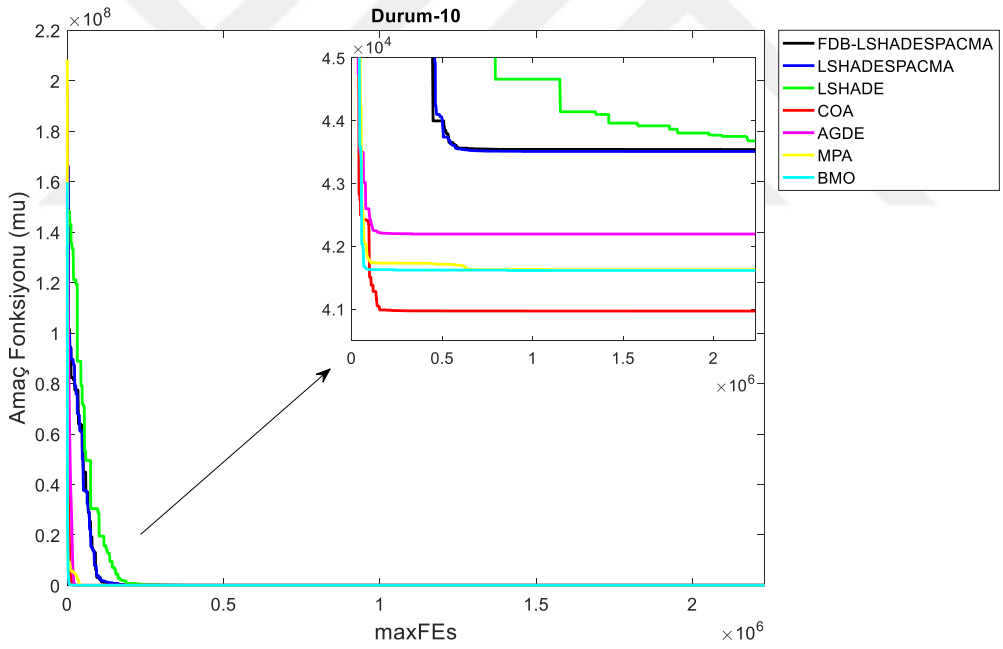


(h)

Şekil 4.7. (devam) Algoritmaların yakınsama eğrileri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.

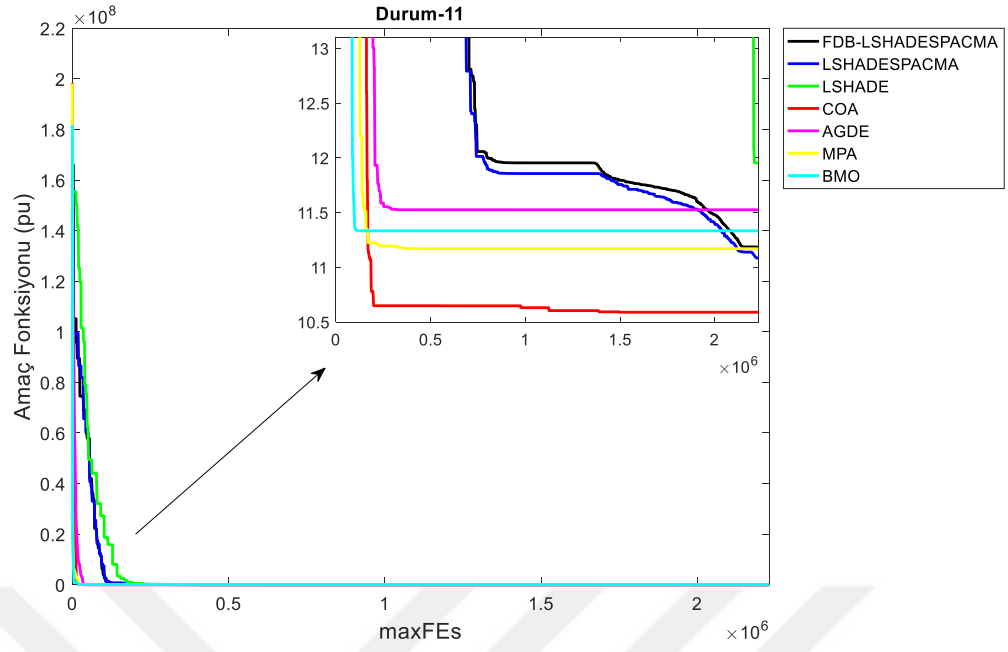


(i)

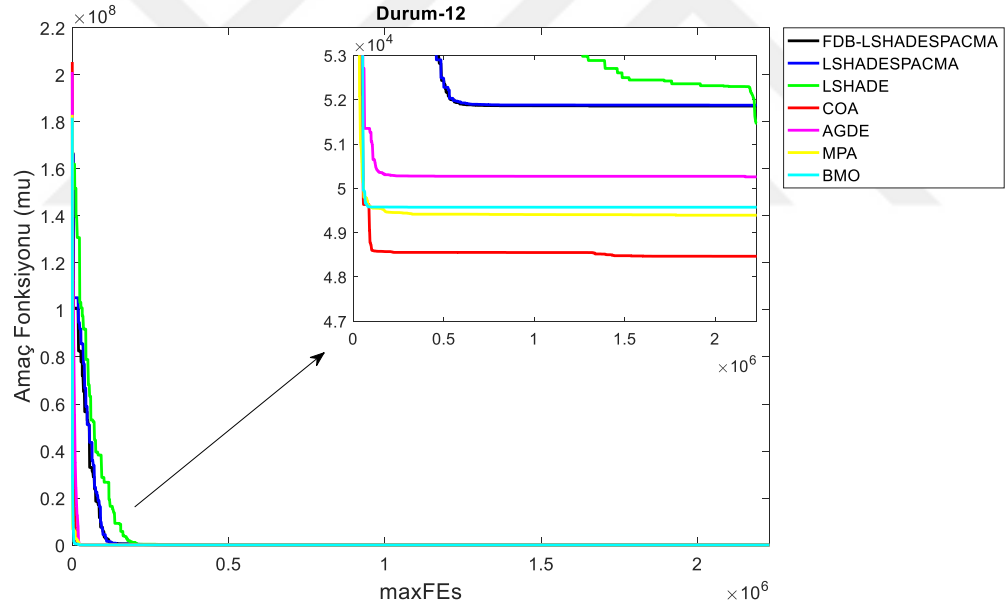


(j)

Şekil 4.7. (devam) Algoritmaların yakınsama eğrileri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.



(k)



(l)

Şekil 4.7. (devam) Algoritmaların yakınsama eğrileri (a) Durum-1, (b) Durum-2, (c) Durum-3, (d) Durum-4, (e) Durum-5, (f) Durum-6, (g) Durum-7, (h) Durum-8, (i) Durum-9, (j) Durum-10, (k) Durum-11, (l) Durum-12.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması, enerji hub için optimizasyon problemlerini ve bu problemi çözmek için önerilen hibrit optimizasyon algoritmasını içermektedir. Bu doğrultuda, tez çalışması genel olarak iki bölümden oluşmaktadır.

Tez çalışmasının ilk bölümünde, EH giriş enerji taşıyıcılarının elektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğal gaz ve ısı olduğu, talep olarak ise elektrik, ısı, soğutma ve basınçlı havanın üretildiği bir enerji hub modeli önerilmiştir. Bu enerji hub modeli ve çeşitli enerji dönüşüm elemanlarının kombinasyonu sonucunda her hub yapısında mutlaka elektrik enerjisi üretilmesi sağlanacak şekilde 69 enerji hub yapısı oluşturulmuştur. Enerji hub optimizasyonu kapsamında, ikisi tek-amaçlı problem ve bir tanesi çok-amaçlı problem olmak üzere üç amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Tek-amaçlı problemler, toplam enerji hub maliyetinin ve toplam enerji hub kayıplarının minimize edilmesidir. Çok-amaçlı problemde ise, enerji hub maliyetinin ve kayıplarının minimize edilmesi amaçlanmıştır. Ancak, bu çok-amaçlı problem tek-amaçlı bir probleme dönüştürülerek çözülmüştür. Enerji hub maliyeti, her bir enerji taşıyıcısının maliyeti ayrı ayrı hesaplanıp, toplanması ile elde edilmiştir. Rüzgar ve güneş enerjisinin belirsiz ve stokastik doğasından dolayı maliyetleri doğrudan maliyet, ceza maliyeti ve rezerv maliyetinin toplamı olarak modellenmektedir. Bu model oldukça karışık olup, sistemin optimizasyonunu zorlaştırmaktadır. Literatürde, enerji hub modeline rüzgar ve güneş enerjisinin dahil edildiği çalışmalarda, rüzgar ve güneş enerjisinin maliyeti enerji hub maliyetine ya dahil edilmemiş ya da sadece bir katsayı olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, ilk kez rüzgar ve güneş enerjisinin maliyeti doğrudan maliyet, ceza maliyeti ve rezerv maliyetinin toplamı olarak hesaplanıp, toplam enerji hub maliyetine dahil edilmiştir. Böylelikle, literatüre yeni bir problem önerilmiştir.

Enerji hub optimizasyon problemlerinin tanımlanmasından sonra, bu problemin çözümü için hibrit bir algoritma önerilmiştir. Bu kapsamda, FDB seçim yönteminin LSHADESPACMA algoritmasının arama performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için kapsamlı bir deneysel çalışma yapılmıştır. CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemlerinde yer alan dört farklı problem tipi (tek-modlu, çok-modlu, hibrit ve birleşik) için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, LSHADESPACMA algoritmasının erken yakınsama problemleri yaşadığı tespit edilmiştir. Bu problemin

sebebi, algoritmanın arama performansının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. LSHADESPACMA algoritmasında keşif işlemi mutasyon aşamasında gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, LSHADESPACMA algoritmasının mutasyon stratejisine FDB yöntemi uygulanmıştır ve dört farklı versiyon oluşturulmuştur. Oluşturulan bu LSHADESPACMA versiyonlarının performansları CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Friedman testi ve Wilcoxon ikili işaret testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, Friedman testi ve Wilcoxon ikili işaret testi sonuçlarına göre, Versiyon-3 olarak isimlendirilen LSHADESPACMA versiyonu rakiplerinden iyi sonuç elde etmiştir ve FDB-LSHADESPACMA olarak çalışmanın geri kalanında kullanılmıştır.

Önerilen algoritmanın, literatürde sıklıkla tercih edilen 14 MSA algoritması ile CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama problemleri kullanılarak performans karşılaştırması yapılmıştır. Friedman testi ve Wilcoxon ikili işaret testi kullanılarak elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, önerilen FDB-LSHADESPACMA algoritması rakiplerine üstünlük göstermiştir. Ayrıca, CEC2017 ve CEC2020 kıyaslama takımında kullanılan dört farklı problem tipi için ayrı ayrı Friedman testi uygulandığında, gerçekleştirilen yirmi dört deneyin yirmi birinde rakiplerine üstünlük sağlarken, üç deneyde LSHADESPACMA ile aynı sonucu elde etmiştir. Sonuç olarak, önerilen algoritmanın literatürde verilen 14 algoritmadan performans olarak daha iyi sonuç gösterdiği ispatlanmıştır.

Önerilen hibrit FDB-LSHADESPACMA algoritmasının kısıtlı gerçek dünya problemlerinde test edilmesi için tez çalışmasında önerilen enerji hub optimizasyon problemleri üzerinde test edilmiştir. Çalışmada oluşturulan 69 EH yapısı kullanılarak IEEE 14-, 30-, 57- ve 118-baralı test sistemlerinde bulunan jeneratör sayıları ile doğru orantılı olarak dört farklı boyutta test sistemi oluşturulmuştur. Bu test sistemleri ve üç amaç fonksiyonunun kombinasyonları ile on iki durum çalışması belirlenmiştir. On iki durum çalışması sonucunda elde edilen minimum uygunluk fonksiyonu değerleri baz alındığında, önerilen FDB-LSHADESPACMA algoritması orijinal LSHADESPACMA algoritması ile kıyaslandığında sırasıyla Durum-1, Durum-2, Durum-3, Durum-4, Durum-5, Durum-6, Durum-7, Durum-8 ve Durum-12 için %1,3648, %0,4758, %0,0470, %0,0422, %0,2358, %0,9382, %0,0337, %0,4384 ve %0,0346 oranlarında iyileşme sağladığı görülmüştür. Ortalama uygunluk fonksiyonu değeri baz alındığında ise, önerilen FDB-LSHADESPACMA algoritması orijinal LSHADESPACMA algoritması ile kıyaslandığında sırasıyla Durum-1, Durum-2, Durum-3, Durum-4, Durum-5, Durum-

6, Durum-7, Durum-8, Durum-9, Durum-10, Durum-11 ve Durum-12 için %0,2969, %3,6056, %0,8343, %0,3667, %2,1051, %1,2296, %0,6690, %0,6147, %0,8129, %0,1742, %0,4179 ve %0,3597 oranlarında iyileşme sağladığı görülmüştür.

FDB-LSHADESPACMA algoritmasının bu problemler üzerinde performansını karşılaştırmak için güncel ve sıklıkla kullanılan 14 MSA algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmalar, MPA, EO, BMO, AEFA, AEO, SDO, AGDE, COA, LSHADESPACMA, MFO, LSHADE, GSA ve GA'dır. Bu algoritmalarından on iki durum sonucunda elde edilen sonuçlar, istatistiksel analiz yöntemleri olan Friedman testi ve Wilcoxon ikili işaret testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Friedman testi sonuçlarına göre, on iki durum çalışmasının yedisinde FDB-LSHADESPACMA yöntemi birinci sırada gelirken, üçünde ikinci ve iki durumda on üçüncü sırada yer almıştır. Ortalama sıralama değerine göre 15 algoritma arasında birinci sırada yer almıştır. Ancak, FDB-LSHADESPACMA yöntemi, Durum-10 ve Durum-12'nin çözümünde yetersiz kalmıştır.

Özetle, tez çalışması sonucunda iki önemli konu üzerinde araştırma yapılmış ve literatüre katkı sağlanmıştır. Bu konulardan ilki, rüzgar ve güneş enerjisinin entegre edildiği bir enerji hub modelinin oluşturulmasıdır. Daha sonra, bu hub modellerinin optimizasyonu için üç amaç fonksiyonu önerilmiştir. Bu amaç fonksiyonlarından maliyetin minimize edilmesinin amaçlandığı problemde, rüzgar ve güneş enerjisinin maliyet modeli ilk kez dahil edilerek yeni bir amaç fonksiyonu önerilmiştir. Tez kapsamında çalışılan ikinci konu ise, bir hibrit MSA algoritmasının geliştirilmesidir. FDB seçim yöntemi kullanılarak, LSHADESPACMA algoritmasının arama performansı iyileştirilmiştir. Önerilen algoritmanın performansını test etmek için kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, enerji hub için önerilen amaç fonksiyonlarının çözümü için de FDB-LSHADESPACMA algoritması kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen algoritmanın enerji hub optimizasyonu probleminde başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermiştir.

6. KAYNAKLAR

- [1] L. Abualigah, D. Yousri, M. Abd Elaziz, A. A. Ewees, M. A. Al-Qaness ve A. H. Gandomi, “Aquila optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm”, *Computers & Industrial Engineering*, c. 157, ss. 107250, 2021.
- [2] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja ve H. Chen, “Harris hawks optimization: Algorithm and applications”, *Future Generation Computer Systems*, c. 97, ss. 849-872, 2019.
- [3] M. Khishe ve M. R. Mosavi, “Chimp optimization algorithm”, *Expert Systems with Applications*, c. 149, ss. 113338, 2020.
- [4] S. Mirjalili ve A. Lewis, “The whale optimization algorithm”, *Advances in Engineering Software*, c. 95, ss. 51-67, 2016.
- [5] J. Dréo, A. Pétrowski, P. Siarry ve E. Taillard, “Metaheuristics for hard optimization: methods and case studies”, *Springer Science & Business Media*, 2006.
- [6] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr ve M. P. Vecchi, “Optimization by simulated annealing”, *Science*, c. 220, sayı 4598, ss. 671-680, 1983.
- [7] J. H. Holland, “Genetic Algorithms”, *Scientific American*, c. 267, sayı 1, ss. 44-50 1992.
- [8] L. Abualigah, A. Diabat, S. Mirjalili, M. Abd Elaziz ve A. H. Gandomi, “The arithmetic optimization algorithm”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, c. 376, ss. 113609, 2021.
- [9] R. Storn ve K. Price, “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.
- [10] H. G. Beyer, ve H. P. Schwefel, “Evolution strategies - A comprehensive introduction”, *Natural Computing*, c. 1, sayı 1, ss. 3-52, 2002
- [11] D. Simon, “Biogeography-based optimization”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 12, sayı 6, ss. 702-713, 2008.
- [12] M. H. Tayarani-N ve M. R. Akbarzadeh-T, “Magnetic optimization algorithms a new synthesis,” *In 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, Hong Kong, Çin, 2008, ss. 2659-2664.
- [13] A. R. Formato, “Central force optimization”, *Progress in Electromagnetics Research*, c. 77, sayı 1, ss. 425-491, 2007.
- [14] E. Rashedi, H. Nezamabadi-Pour ve S. Saryazdi, “GSA: A gravitational search algorithm”, *Information Sciences*, c. 179, sayı 13, ss. 2232-2248, 2009.
- [15] F. Glover, “Tabu search-Part I”, *ORSA Journal on Computing*, c. 1, sayı 3, ss. 190-206, 1989.

- [16] E. Atashpaz-Gargari ve C. Lucas, "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", *In 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore, 2007, ss. 4661-4667.
- [17] R. V. Rao, V. J. Savsani ve D. P. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: an optimization method for continuous non-linear large scale problems", *Information Sciences*, c. 183, sayı 1, ss. 1-15, 2012.
- [18] R. Eberhart ve J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory", *In MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japonya, 1995, ss. 39-43.
- [19] M. Dorigo, V. Maniezzo ve A. Colorni, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, c. 26, sayı 1, ss. 29-41, 1996.
- [20] D. Karaboga, "Artificial bee colony algorithm", *Scholarpedia*, c. 5, sayı 3, ss. 6915, 2010.
- [21] H. T. Kahraman, S. Aras ve E. Gedikli, "Fitness-distance balance (FDB): A new selection method for meta-heuristic search algorithms", *Knowledge-Based Systems*, c. 190, ss. 105169, 2020.
- [22] 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.
- [23] S. Duman, H. T. Kahraman, Y. Sonmez, U. Guvenc, M. Kati ve S. Aras, "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, ss. 104763, 2022.
- [24] 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, sayı 8, ss. 6577-6617, 2021.
- [25] 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, ss. 107421, 2021.
- [26] H. Bakir, U. Guvenc, H. T. 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.
- [27] M. Geidl, G. Koeppel, P. Favre-Perrod, B. Klockl, G. Andersson ve K. Frohlich, "Energy hubs for the future", *IEEE Power and Energy Magazine*, c. 5, sayı 1, ss. 24-30, 2006.
- [28] M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-Ivatloo ve H. Yousefi, "Energy hub: from a model to a concept—a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 80, ss. 1512-1527, 2017.
- [29] M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-ivatloo, M. Hosseinzadeh, S. T. Yousefi H, Khorasani, "Optimal management of energy hubs and smart energy hubs—a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 89, ss. 33-50, 2018.

- [30] M. Geidl, G. Koepfel, P. Favre-Perrod, B. Klöckl, G. Andersson ve K. Fröhlich, “The energy hub—a powerful concept for future energy systems”, *In Third Annual Carnegie Mellon Conference on the Electricity Industry*, 2007.
- [31] T. Liu, D. Zhang, S. Wang ve T. Wu, “Standardized modelling and economic optimization of multi-carrier energy systems considering energy storage and demand response”, *Energy Conversion and Management*, c. 182, ss. 126-142, 2019.
- [32] A. Dolatabadi, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Abapour ve S. Tohidi, “Optimal stochastic design of wind integrated energy hub”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, c. 13, sayı 5, ss. 2379-2388, 2017.
- [33] A. Najafi, H. Falaghi, J. Contreras ve M. Ramezani, “Medium-term energy hub management subject to electricity price and wind uncertainty”, *Applied Energy*, c. 168, ss. 418-433, 2016.
- [34] A. H. Honarmanda ve S. M. Rashidb, “A sustainable framework for long-term planning of the smart energy hub in the presence of renewable energy sources, energy storage systems and demand response program”, *Journal of Energy Storage*, c. 52, sayı C, ss. 105009, 2022.
- [35] S. Rahmani ve N. Amjady, “Optimal operation strategy for multi-carrier energy systems including various energy converters by multi-objective information gap decision theory and enhanced directed search domain method”, *Energy Conversion and Management*, c. 198, ss. 111804, 2019.
- [36] P. Favre-Perrod, “A vision of future energy networks”, *In 2005 IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa*, Durban, Güney Afrika, 2005, ss. 13-17.
- [37] A. Maroufmashat, S. T. Taqvi, A. Miragha, M. Fowler ve A. Elkamel, “Modeling and optimization of energy hubs: A comprehensive review”, *Inventions*, c. 4, sayı 3, ss. 50, 2019.
- [38] M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-ivatloo, H. Yousefi ve S. Jalilinasrabad, “Optimal scheduling of energy hubs in the presence of uncertainty-A review”, *Journal of Energy Management and Technology*, c. 1, sayı 1, ss. 1-17, 2017.
- [39] A. Shabanpour-Haghighi ve A. R. Seifi, “Multi-objective operation management of a multi-carrier energy system”, *Energy*, c. 88, ss. 430-442, 2015.
- [40] A. Shabanpour-Haghighi ve A. R. Seifi, Simultaneous integrated optimal energy flow of electricity, gas, and heat, *Energy Conversion and Management*, c. 101, ss. 579-591, 2015
- [41] M. Geidl ve G. Andersson, “Optimal power flow of multiple energy carriers”, *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 22, sayı 1, ss. 145-155, 2007.
- [42] M. Moeini-Aghaie, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, M ve E. Hajipour, “A decomposed solution to multiple-energy carriers optimal power flow”, *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 29, sayı 2, ss. 707-716.
- [43] M. Moeini-Aghaie, P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, ve A. Abbaspour, “Multiagent genetic algorithm: an online probabilistic view on economic dispatch of energy hubs constrained by wind availability,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, c. 5, sayı 2, ss. 699-708, 2013.

- [44] A. Shabanpour-Haghighi ve A. R. Seifi, 2015, "Multi-objective operation management of a multi-carrier energy system", *Energy*, c. 88, ss. 430-442, 2015.
- [45] S. D. Beigvand, H. Abdi, M. La Scala, "Economic dispatch of multiple energy carriers", *Energy*, c. 138, ss. 861-872, 2017.
- [46] S. D. Beigvand, H. Abdi, M. La Scala, "A general model for energy hub economic dispatch", *Applied Energy*, c. 190, ss. 1090-1111.
- [47] M. Schulze, L. Friedrich, M. Gautschi, "Modeling and optimization of renewables: applying the energy hub approach", In *2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Singapore, 2008. ss. 83-88.
- [48] S. Pazouki, M. R. Haghifam ve A. Moser, "Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 61, ss. 335-345, 2014.
- [49] S. Pazouki ve M.R. Haghifam, "Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 80, ss. 219-239, 2016.
- [50] D. Rakipour ve H. Barati, "Probabilistic optimization in operation of energy hub with participation of renewable energy resources and demand response", *Energy*, c. 173, ss. 384-399, 2019.
- [51] M. H. Shams, M. Shahabi, M. Kia, A. Heidari, M. Lotfi, M. Shafie-Khah ve J. P. Catalão, "Optimal operation of electrical and thermal resources in microgrids with energy hubs considering uncertainties", *Energy*, c. 187, ss. 115949, 2019.
- [52] M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo ve S. Asadi, "Optimal operation of multi-carrier energy networks with gas, power, heating, and water energy sources considering different energy storage technologies", *Journal of Energy Storage*, c. 31, ss. 101574, 2020.
- [53] M. Nasir, A. R. Jordehi, M. Tostado-Veliz, V. S. Tabar, V. S., Mansouri, S. A., ve Jurado, F., "Operation of energy hubs with storage systems, solar, wind and biomass units connected to demand response aggregators", *Sustainable Cities and Society*, ss. 103974, 2022.
- [54] A. Tavakoli ve A. Karimi, "Optimal probabilistic operation of energy hub with various energy converters and electrical storage based on electricity, heat, natural gas, and biomass by proposing innovative uncertainty modeling methods", *Journal of Energy Storage*, c. 51, ss. 104344, 2022.
- [55] A. Shabanpour-Haghighi ve A. R. Seifi, "Effects of district heating networks on optimal energy flow of multi-carrier systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 59, ss. 379-387, 2016.
- [56] M. Geidl ve G. Andersson, "Optimal power dispatch and conversion in systems with multiple energy carriers," in *Proc. 15th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Liège, Belçika, 2005.
- [57] M. Geidl ve G. Andersson, "A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow," in *IEEE Russia Power Technology*, St. Petersburg, Rusya, 2005, ss. 1-7.

- [58] C. Shao, X. Wang, M. Shahidehpour, X. Wang ve B. Wang, “ An MILP-based optimal power flow in multicarrier energy systems”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, c. 8, sayı 1, ss. 239-248, 2016.
- [59] I. G. Moghaddam, M. Saniei ve E. Mashhour, “A comprehensive model for self-scheduling an energy hub to supply cooling, heating and electrical demands of a building”, *Energy*, c. 94, ss. 157-170, 2016.
- [60] P. P. Biswas, P. N. Suganthan ve G. A. Amaratunga, “Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power”, *Energy Conversion and Management*, c. 148, ss. 1194-1207, 2017.
- [61] P. P. Biswas, P. N. Suganthan, B. Y. Qu ve G. A. Amaratunga, “Multiobjective economic-environmental power dispatch with stochastic wind-solar-small hydro power”, *Energy*, c. 150, ss. 1039-1057, 2018.
- [62] R. Roy ve H. T. Jadhav, “Optimal power flow solution of power system incorporating stochastic wind power using Gbest guided artificial bee colony algorithm”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 64, ss. 562-578, 2015.
- [63] M. H. Sulaiman, Z. Mustaffa, A. J. Mohamad, M. M. Saari ve M. R. Mohamed, “Optimal power flow with stochastic solar power using barnacles mating optimizer”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, c. 31, sayı 5, ss. e12858, 2021.
- [64] T. Ma, J. Wu ve L. Hao, “Energy flow modeling and optimal operation analysis of the micro energy grid based on energy hub”, *Energy Conversion and Management*, c. 133, ss. 292-306, 2017.
- [65] J. Ebrahimi, T. Niknam ve B. B. Firouzi, “Electrical and thermal power management in an energy hub system considering hybrid renewables”, *Electrical Engineering*, c. 103, ss. 1965-1976, 2021.
- [66] D. Huo, S. Le Blond, C. Gu, W. Wei ve D. Yu, “Optimal operation of interconnected energy hubs by using decomposed hybrid particle swarm and interior-point approach”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 95, ss. 36-46, 2018.
- [67] A. Shabanpour-Haghighi ve A. R. Seifi, “Energy flow optimization in multicarrier systems”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, c. 11, sayı 5, ss. 1067-1077, 2015.
- [68] S. D. Beigvand, H. Abdi ve M. La Scala, “Optimal operation of multicarrier energy systems using time varying acceleration coefficient gravitational search algorithm”, *Energy*, c. 114, ss. 253-26, 2016.
- [69] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, S. Mirjalili ve A. H. Gandomi, “Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic”, *Expert Systems with Applications*, c. 152, ss. 113377, 2020.
- [70] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens ve S. Mirjalili, “Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm”, *Knowledge-Based Systems*, c. 191, ss. 105190, 2020.
- [71] M. H. Sulaiman, Z. Mustaffa, M. M. Saari ve H. Daniyal, “Barnacles mating optimizer: A new bio-inspired algorithm for solving engineering optimization

- problems”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, c. 87, ss. 103330, 2020.
- [72] A. Yadav, “AEFA: Artificial electric field algorithm for global optimization”, *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 48, ss. 93-108, 2019.
 - [73] W. Zhao, L. Wang ve Z. Zhang, “Artificial ecosystem-based optimization: a novel nature-inspired meta-heuristic algorithm”, *Neural Computing and Applications*, c. 32, sayı 13, ss. 9383-9425, 2020.
 - [74] W. Zhao, L. Wang L ve Z. Zhang, “Supply-demand-based optimization: a novel economics-inspired algorithm for global optimization”, *IEEE Access*, c. 7, ss. 73182-73206, 2019.
 - [75] A. W. Mohamed ve A.K. Mohamed, “Adaptive guided differential evolution algorithm with novel mutation for numerical optimization”, *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, c. 10, sayı 2, ss. 253-277, 2019.
 - [76] J. Pierezan ve L. D. S. Coelho, “Coyote optimization algorithm: a new metaheuristic for global optimization problems”, *In 2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Rio de Janeiro, Brezilya, 2018, ss. 1-8.
 - [77] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris ve S. M. Mirjalili, “Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems”, *Advances in Engineering Software*, c. 114, ss. 163-191, 2017.
 - [78] A. W. Mohamed, A. A. Hadi, A. M. Fattouh ve K. M. Jambi, “LSHADE with semi-parameter adaptation hybrid with CMA-ES for solving CEC 2017 benchmark problems”, *In 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Donostia, İspanya, 2017, ss. 145-152.
 - [79] S. Mirjalili S, “Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm”, *Knowledge-Based Systems*, c. 89, ss. 228-249, 2015.
 - [80] R. Tanabe R ve A. S. Fukunaga, “Improving the search performance of SHADE using linear population size reduction”, *In 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Beijing, Çin, 2014, ss. 1658-1665.
 - [81] E. Rashedi, H. Nezamabadi-Pour ve S. Saryazdi, “GSA: A gravitational search algorithm”, *Information Sciences*, c. 179, sayı 13, ss. 2232-2248, 2009.
 - [82] P. C. Chu ve J. E. Beasley, “A genetic algorithm for the multidimensional knapsack problem”, *Journal of Heuristics*, c. 4, sayı 1, ss. 63-86, 1998.
 - [83] M. Abdel-Basset, L. Abdel-Fatah ve A. K. Sangaiah, “Metaheuristic algorithms: A comprehensive review”, *Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications*, ss. 185-231, 2018.
 - [84] R. Mallipeddi, P. N. Suganthan, Q. K. Pan, Q. ve M. F. Tasgetiren, “Differential evolution algorithm with ensemble of parameters and mutation strategies”, *Applied Soft Computing*, c. 11, sayı 2, ss. 1679-1696, 2011.
 - [85] A. W. Mohamed, A. A. Hadi ve K. M. Jambi, “Novel mutation strategy for enhancing SHADE and LSHADE algorithms for global numerical optimization”, *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 50, ss. 100455, 2019.
 - [86] A. W. Mohamed ve P. N. Suganthan, “Real-parameter unconstrained optimization based on enhanced fitness-adaptive differential evolution algorithm with novel mutation”, *Soft Computing*, c. 22, sayı 10, ss. 3215-3235, 2018.

- [87] R. Tanabe ve A. Fukunaga, “Evaluating the performance of SHADE on CEC 2013 benchmark problems”, *In 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Cancun, Meksika, 2013, ss. 1952-1959.
- [88] J. Zhang ve A. C. Sanderson, “JADE: adaptive differential evolution with optional external archive”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 13, sayı 5, ss. 945-958, 2009.
- [89] N. Hansen, “The CMA evolution strategy: A comparing review”, *Towards a New Evolutionary Computation*, ss. 75-102, 2006.
- [90] N. Hansen, S. D. Müller ve P. Koumoutsakos, “Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES)”, *Evolutionary Computation*, c. 11, sayı 1, ss. 1-18, 2003.
- [91] N. H. Awad, M. Z. Ali, J. J. Liang, B. Y. Qu, ve P. N. Suganthan, “Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2017 special session and competition on single objective real-parameter numerical optimization,” *Technical Report*, 2016
- [92] J. J. Liang, B. Y. Qu, D. W. Gong, ve C. T. Yue, “Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2019 special session on multimodal multiobjective optimization,” *Technical Report*, 2019.

7. EKLER

7.1. EK 1: CEC2017 TEST FONKSİYONLARI

Çizelge 7.1. CEC2017 Test Fonksiyonları [91].

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 Schaffer 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 7.1. CEC2017 Test Fonksiyonları (devam) [91].

Fonksiyon Tipi	Fonksiyon No	Fonksiyon	Global Optimum
Birleşik	21	Rosenbrock, Yüksek Koşullu Elliptic ve Rastrigin Birleşik Fonksiyonu	2100
	22	Rastrigin, Griewank ve Modifiye Schwefel Birleşik Fonksiyonu	2200
	23	Rosenbrock, Ackley, Modifiye Schwefel ve Rastrigin Birleşik Fonksiyonu	2300
	24	Ackley, Yüksek Koşullu Elliptic, Griewank ve Rastrigin Birleşik Fonksiyonu	2400
	25	Rastrigin, HappyCat, Ackley, Discus ve Rosenbrock Birleşik Fonksiyonu	2500
	26	Genişletilmiş Scaffer, Modifiye Schwefel, Griewank, Rosenbrock ve Rastrigin Birleşik Fonksiyonu	2600
	27	HGBat, Rastrigin, Modifiye Schwefel, Bent Cigar, Yüksek Koşullu Elliptic ve Genişletilmiş Scaffer Birleşik Fonksiyonu	2700
	28	Ackley, Griewank, Discus, Rosenbrock, HappyCat, Genişletilmiş Scaffer Birleşik Fonksiyonu	2800
	29	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Rastrigin, Genişletilmiş Scaffer ve Lunacek Bi_Rastrigin Birleşik Fonksiyonu	2900
	30	Kaydırılmış ve döndürülmüş Rastrigin, Sürekli Olmayan Rastrigin ve Levy Birleşik Fonksiyonu	3000
Arama Uzayı: [-100, 100] ^D			

7.2. EK 2: CEC2020 TEST FONKSİYONLARI

Çizelge 7.2. CEC2020 Test Fonksiyonları [92].

Fonksiyon Tipi	Fonksiyon No	Fonksiyon	Global Optimum
Tek-modlu	1	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Bent Cigar Fonksiyonu	100
Çok- modlu	2	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Schwefel Fonksiyonu	1100
	3	Kaydırılmış ve Döndürülmüş Lunacek Bi-Rastrigin Fonksiyonu	700
	4	Genişletilmiş Rosenbrock ve Griewangk Fonksiyonu	1900
Hibrit	5	Hibrit Fonksiyon 1 (N=3)	1700
	6	Hibrit Fonksiyon 2 (N=4)	1600
	7	Hibrit Fonksiyon 3 (N=5)	2100
Birleşik	8	Birleşik Fonksiyon 1 (N=3)	2200
	9	Birleşik Fonksiyon 2 (N=4)	2400
	10	Birleşik Fonksiyon 3 (N=5)	2500
Arama Uzayı: [-100, 100] ^D			

7.3. EK 3: ENERJİ HUB MODELLERİNİN VERİMLİLİK KATSAYILARI

Çizelge 7.3. EH yapılarının verimlilik katsayıları.

Hub No	Verimlilik Katsayıları
1	$n_T = 0.95$
2	$n_T = 0.95, n_{CHP_e} = 0.30, n_{CHP_h} = 0.40$
3	$n_T = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.26, n_{CHCP_h} = 0.30, n_{CHCP_c} = 0.31$
4	$n_{INV} = 0.94, n_{GF} = 0.75$
5	$n_{INV} = 0.95, n_{HE} = 0.75$
6	$n_T = 0.96, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.60$
7	$n_T = 0.96, n_{CHP_e} = 0.31, n_{CHP_h} = 0.42, n_{GF} = 0.75$
8	$n_T = 0.95, n_{CHP_e} = 0.27, n_{CHP_h} = 0.41, n_{HE} = 0.75$
9	$n_{CONV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.26, n_{CHP_h} = 0.36, n_{C_h} = 0.28, n_{C_a} = 0.55$
10	$n_{CONV} = 0.94, n_{CHCP_e} = 0.30, n_{CHCP_h} = 0.31, n_{CHCP_c} = 0.29, n_{GF} = 0.74$
11	$n_{INV} = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.25, n_{CHCP_h} = 0.30, n_{CHCP_c} = 0.30, n_{HE} = 0.69$
12	$n_{INV} = 0.94, n_{CHCP_e} = 0.26, n_{CHCP_h} = 0.32, n_{CHCP_c} = 0.27, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.60$
13	$n_T = 0.97, n_{GF} = 0.65, n_{C_h} = 0.28, n_{C_a} = 0.55$
14	$n_{CONV} = 0.95, n_{HE} = 0.73, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.70$
15	$n_{INV} = 0.95, n_{HE} = 0.90, n_{GF} = 0.74$
16	$n_T = 0.92, n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.94$
17	$n_T = 0.92, n_{CONV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.30, n_{CHP_h} = 0.45$
18	$n_T = 0.92, n_{INV} = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.27, n_{CHCP_h} = 0.37, n_{CHCP_c} = 0.20$
19	$n_T = 0.92, n_{INV} = 0.93, n_{GF} = 0.76$
20	$n_T = 0.96, n_{INV} = 0.94, n_{HE} = 0.75$
21	$n_T = 0.94, n_{CONV} = 0.95, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.55$
22	$n_{CONV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.30, n_{CHP_h} = 0.42, n_{GF} = 0.65, n_{HE} = 0.69$
23	$n_T = 0.95, n_{CHP_e} = 0.31, n_{CHP_h} = 0.42, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.65, n_{GF} = 0.76$
24	$n_{INV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.30, n_{CHP_h} = 0.42, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.55, n_{HE} = 0.75$
25	$n_T = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.29, n_{CHCP_h} = 0.35, n_{CHCP_c} = 0.24, n_{GF} = 0.80, n_{HE} = 0.73$
26	$n_{CONV} = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.25, n_{CHCP_h} = 0.31, n_{CHCP_c} = 0.29, n_{C_h} = 0.23, n_{C_a} = 0.65, n_{GF} = 0.80$
27	$n_T = 0.93, n_{CHCP_e} = 0.30, n_{CHCP_h} = 0.33, n_{CHCP_c} = 0.26, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.65, n_{HE} = 0.74$
28	$n_T = 0.96, n_{INV} = 0.94, n_{CHP_e} = 0.27, n_{CHP_h} = 0.41, n_{C_h} = 0.28, n_{C_a} = 0.62$
29	$n_T = 0.95, n_{CONV} = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.27, n_{CHCP_h} = 0.37, n_{CHCP_c} = 0.20, n_{C_h} = 0.21, n_{C_a} = 0.59$
30	$n_T = 0.94, n_{INV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.31, n_{CHP_h} = 0.38, n_{GF} = 0.69$
31	$n_T = 0.94, n_{CONV} = 0.94, n_{CHCP_e} = 0.27, n_{CHCP_h} = 0.37, n_{CHCP_c} = 0.20, n_{GF} = 0.73$
32	$n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.92, n_{CHP_e} = 0.26, n_{CHP_h} = 0.40, n_{HE} = 0.70$
33	$n_T = 0.95, n_{INV} = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.30, n_{CHCP_h} = 0.31, n_{CHCP_c} = 0.26, n_{HE} = 0.74$
34	$n_T = 0.92, n_{CONV} = 0.94, n_{INV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.27, n_{CHP_h} = 0.41$
35	$n_T = 0.96, n_{CONV} = 0.93, n_{INV} = 0.92, n_{CHCP_e} = 0.25, n_{CHCP_h} = 0.30, n_{CHCP_c} = 0.30$
36	$n_T = 0.95, n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.95, n_{GF} = 0.75$
37	$n_T = 0.95, n_{CONV} = 0.92, n_{INV} = 0.93, n_{HE} = 0.70$
38	$n_T = 0.93, n_{CONV} = 0.92, n_{INV} = 0.92, n_{C_h} = 0.32, n_{C_a} = 0.53$
39	$n_T = 0.95, n_{CONV} = 0.95, n_{C_h} = 0.28, n_{C_a} = 0.55, n_{GF} = 0.75$
40	$n_T = 0.95, n_{INV} = 0.94, n_{C_h} = 0.23, n_{C_a} = 0.63, n_{HE} = 0.75$

Çizelge 7.3. EH yapılarının verimlilik katsayıları (devam).

Hub No	Verimlilik Katsayıları
41	$n_{CONV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.30, n_{CHP_h} = 0.40, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.65, n_{GF} = 0.65, n_{HE} = 0.74$
42	$n_{INV} = 0.94, n_{CHCP_e} = 0.27, n_{CHCP_h} = 0.37, n_{CHCP_c} = 0.20, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.60, n_{GF} = 0.74, n_{HE} = 0.75$
43	$n_T = 0.95, n_{CONV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.35, n_{CHP_h} = 0.47, n_{C_h} = 0.27, n_{C_a} = 0.57, n_{GF} = 0.76$
44	$n_T = 0.92, n_{INV} = 0.93, n_{CHCP_e} = 0.26, n_{CHCP_h} = 0.32, n_{CHCP_c} = 0.27, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.55, n_{GF} = 0.74$
45	$n_{CONV} = 0.97, n_{INV} = 0.94, n_{CHP_e} = 0.30, n_{CHP_h} = 0.42, n_{GF} = 0.75, n_{HE} = 0.65$
46	$n_T = 0.92, n_{CONV} = 0.93, n_{CHCP_e} = 0.30, n_{CHCP_h} = 0.31, n_{CHCP_c} = 0.30, n_{GF} = 0.78, n_{HR} = 0.74$
47	$n_T = 0.92, n_{INV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.26, n_{CHP_h} = 0.40, n_{C_h} = 0.25, n_{C_a} = 0.65, n_{HE} = 0.80$
48	$n_T = 0.93, n_{CONV} = 0.93, n_{CHCP_e} = 0.30, n_{CHCP_h} = 0.31, n_{CHCP_c} = 0.26, n_{C_h} = 0.21, n_{C_a} = 0.59, n_{HE} = 0.70$
49	$n_{CONV} = 0.92, n_{INV} = 0.95, n_{C_h} = 0.32, n_{C_a} = 0.53, n_{GF} = 0.70, n_{HE} = 0.77$
50	$n_T = 0.92, n_{CONV} = 0.92, n_{INV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.32, n_{CHP_h} = 0.42, n_{GF} = 0.70$
51	$n_T = 0.94, n_{CONV} = 0.93, n_{INV} = 0.93, n_{CHCP_e} = 0.27, n_{CHCP_h} = 0.37, n_{CHCP_c} = 0.20, n_{GF} = 0.74$
52	$n_T = 0.94, n_{CONV} = 0.94, n_{INV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.31, n_{CHP_h} = 0.42, n_{HE} = 0.70$
53	$n_T = 0.95, n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.94, n_{CHCP_e} = 0.31, n_{CHCP_h} = 0.30, n_{CHCP_c} = 0.29, n_{HE} = 0.75$
54	$n_T = 0.94, n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.94, n_{CHP_e} = 0.30, n_{CHP_h} = 0.42, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.62$
55	$n_T = 0.94, n_{CONV} = 0.94, n_{INV} = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.25, n_{CHCP_h} = 0.30, n_{CHCP_c} = 0.30, n_{C_h} = 0.27, n_{C_a} = 0.57$
56	$n_T = 0.97, n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.94, n_{GF} = 0.76, n_{HE} = 0.74$
57	$n_T = 0.95, n_{CONV} = 0.94, n_{INV} = 0.99, n_{C_h} = 0.28, n_{C_a} = 0.55, n_{GF} = 0.80$
58	$n_T = 0.99, n_{CONV} = 0.94, n_{INV} = 0.95, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.60, n_{HE} = 0.75$
59	$n_T = 0.93, n_{CONV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.30, n_{CHP_h} = 0.42, n_{C_h} = 0.23, n_{C_a} = 0.63, n_{GF} = 0.74, n_{HE} = 0.77$
60	$n_T = 0.92, n_{CONV} = 0.93, n_{CHCP_e} = 0.30, n_{CHCP_h} = 0.31, n_{CHCP_c} = 0.29, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.60, n_{GF} = 0.75, n_{HE} = 0.75$
61	$n_T = 0.92, n_{CONV} = 0.94, n_{INV} = 0.95, n_{C_h} = 0.23, n_{C_a} = 0.65, n_{GF} = 0.80, n_{HE} = 0.70$
62	$n_T = 0.94, n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.27, n_{CHP_h} = 0.41, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.60, n_{GF} = 0.76$
63	$n_T = 0.92, n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.27, n_{CHP_h} = 0.41, n_{C_h} = 0.20, n_{C_a} = 0.60, n_{HE} = 0.76$
64	$n_T = 0.95, n_{CONV} = 0.94, n_{INV} = 0.96, n_{CHP_e} = 0.30, n_{CHP_h} = 0.42, n_{GF} = 0.78, n_{HE} = 0.69$
65	$n_T = 0.94, n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.25, n_{CHCP_h} = 0.30, n_{CHCP_c} = 0.30, n_{C_h} = 0.26, n_{C_a} = 0.60, n_{GF} = 0.75$
66	$n_T = 0.97, n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.27, n_{CHCP_h} = 0.37, n_{CHCP_c} = 0.20, n_{C_h} = 0.25, n_{C_a} = 0.55, n_{HE} = 0.73$
67	$n_T = 0.95, n_{CONV} = 0.94, n_{INV} = 0.93, n_{CHCP_e} = 0.30, n_{CHCP_h} = 0.31, n_{CHCP_c} = 0.29, n_{GE} = 0.78, n_{HE} = 0.74$
68	$n_T = 0.94, n_{CONV} = 0.95, n_{INV} = 0.95, n_{CHP_e} = 0.31, n_{CHP_h} = 0.42, n_{C_h} = 0.23, n_{C_a} = 0.65, n_{GF} = 0.65, n_{HE} = 0.59$
69	$n_T = 0.97, n_{CONV} = 0.94, n_{INV} = 0.95, n_{CHCP_e} = 0.30, n_{CHCP_h} = 0.31, n_{CHCP_c} = 0.30, n_{C_h} = 0.28, n_{C_a} = 0.55, n_{GF} = 0.65, n_{HE} = 0.70$

7.4. EK 4: ENERJİ HUB MODELLERİNİN MALİYET KATSAYILARI

Çizelge 7.4. EH yapılarındaki enerji taşıyıcılarının maliyet katsayıları.

Hub No	Giriş Enerjisi	Maliyet Katsayıları							Enerji Üretimlerinin Alt ve Üst Limitleri (pu)	
		a (mu)	b (mu/pu)	c (mu/pu ²)	d (rad/pu)	e (mu)	g _w (mu/pu)	h _s (mu/pu)	E _{min} (pu)	E _{max} (pu)
1	Elektrik	25	200	80	100	4,2	-	-	0,1	0,75
2	Elektrik	120	200	10	180	3,7	-	-	0,4	2,5
	Doğal gaz	65	150	20	-	-	-	-	0,5	3,4
3	Elektrik	120	200	10	180	3,7	-	-	0,4	2,5
	Doğal gaz	90	230	20	-	-	-	-	0,1	1
4	Elektrik	60	180	30	140	4	-	-	0,2	1,25
	Doğal gaz	330	220	29	-	-	-	-	0,2	1
5	Elektrik	25	200	80	100	4,2	-	-	0,1	0,75
	Isı	40	210	30	-	-	-	-	0,1	0,8
6	Elektrik	160	200	30	160	3,2	-	-	0,2	1,6
7	Elektrik	110	150	100	60	4,3	-	-	0,1	3
	Doğal gaz	290	140	50	-	-	-	-	0,2	1,8
8	Elektrik	100	210	12	160	3,8	-	-	0,3	1,75
	Doğal gaz	220	100	31	-	-	-	-	0,1	2,8
	Isı	210	170	12	-	-	-	-	0,1	0,7
9	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	70	110	25	-	-	-	-	0,1	1,4
10	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Doğal gaz	40	100	25	-	-	-	-	0,2	1,9
11	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	185	140	13	-	-	-	-	0,1	3
	Isı	410	120	20	-	-	-	-	0,1	0,9
12	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	100	230	27	-	-	-	-	0,1	1,8
13	Elektrik	25	200	80	100	4,2	-	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	150	170	19	-	-	-	-	0,1	3,2
14	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Isı	40	100	70	-	-	-	-	0,1	0,4
15	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	185	235	34	-	-	-	-	0,1	1
	Isı	380	265	48	-	-	-	-	0,2	1,4
16	Elektrik	490	80	28	100	3,5	-	-	0,1	3
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
17	Elektrik	160	220	10	190	3,6	-	-	0,2	1,1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	85	195	60	-	-	-	-	0,1	3,8
18	Elektrik	100	160	70	130	3,3	-	-	0,2	1,5
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	330	220	29	-	-	-	-	0,2	1
19	Elektrik	100	210	12	160	3,8	-	-	0,3	1,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	330	220	29	-	-	-	-	0,2	1
20	Elektrik	120	200	10	180	3,7	-	-	0,4	2,5
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Isı	100	250	10	-	-	-	-	0,2	0,5
21	Elektrik	120	200	10	180	3,7	-	-	0,4	2,5
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75

Çizelge 7.4. (devam) EH yapılarındaki enerji taşıyıcılarının maliyet katsayıları.

Hub No	Giriş Enerjisi	Maliyet Katsayıları							Enerji Üretimlerinin Alt ve Üst Limitleri (pu)	
		a (mu)	b (mu/pu)	c (mu/pu ²)	d (rad/pu)	e (mu)	g _w (mu/pu)	h _s (mu/pu)	E _{min} (pu)	E _{max} (pu)
22	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	70	200	12	-	-	-	-	0,2	2,7
	Isı	110	200	10	-	-	-	-	0,2	0,5
23	Elektrik	490	80	28	100	3,5	-	-	0,1	3
	Doğal gaz	60	220	10	-	-	-	-	0,1	3,2
24	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	160	170	39	-	-	-	-	0,1	2
	Isı	220	215	20	-	-	-	-	0,2	1,7
25	Elektrik	25	200	80	100	4,2	-	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	330	220	29	-	-	-	-	0,2	1
	Isı	410	120	20	-	-	-	-	0,1	0,9
26	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	60	120	17	-	-	-	-	0,1	1,1
27	Elektrik	25	200	80	100	4,2	-	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	60	120	17	-	-	-	-	0,1	1,1
	Isı	220	215	20	-	-	-	-	0,2	1,7
28	Elektrik	60	180	30	140	4	-	-	0,2	1,25
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	100	230	27	-	-	-	-	0,1	1,8
29	Elektrik	120	200	10	180	3,7	-	-	0,4	2,5
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	85	195	60	-	-	-	-	0,1	3,8
30	Elektrik	60	180	30	140	4	-	-	0,2	1,25
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	290	140	50	-	-	-	-	0,2	1,8
31	Elektrik	120	200	10	180	3,7	-	-	0,4	2,5
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	220	100	31	-	-	-	-	0,1	2,8
32	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	290	140	50	-	-	-	-	0,2	1,8
	Isı	410	120	20	-	-	-	-	0,1	0,9
33	Elektrik	60	180	30	140	4	-	-	0,2	1,25
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	40	100	25	-	-	-	-	0,2	1,9
	Isı	110	200	10	-	-	-	-	0,2	0,5
34	Elektrik	360	175	33	90	4,4	-	-	0,1	2,7
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	330	220	29	-	-	-	-	0,2	1
35	Elektrik	360	175	33	90	4,4	-	-	0,1	2,7
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	70	200	12	-	-	-	-	0,2	2,7
36	Elektrik	110	200	12	120	4,8	-	-	0,3	1,75
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	290	140	50	-	-	-	-	0,2	1,8
37	Elektrik	310	220	70	130	4,6	-	-	0,1	2,1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Isı	380	265	48	-	-	-	-	0,2	1,4

Çizelge 7.4. (devam) EH yapılarındaki enerji taşıyıcılarının maliyet katsayıları.

Hub No	Giriş Enerjisi	Maliyet Katsayıları							Enerji Üretimlerinin Alt ve Üst Limitleri (pu)	
		a (mu)	b (mu/pu)	c (mu/pu ²)	d (rad/pu)	e (mu)	g _w (mu/pu)	h _s (mu/pu)	E _{min} (pu)	E _{max} (pu)
38	Elektrik	300	130	95	90	4,9	-	-	0,2	1,9
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
39	Elektrik	110	150	100	60	4,3	-	-	0,1	3
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	220	100	31	-	-	-	-	0,1	2,8
40	Elektrik	360	175	33	90	4,4	-	-	0,1	2,7
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Isı	40	100	70	-	-	-	-	0,1	0,4
41	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Doğal gaz	90	230	20	-	-	-	-	0,1	1
	Isı	110	135	32	-	-	-	-	0,1	0,5
42	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	90	230	20	-	-	-	-	0,1	1
	Isı	110	220	40	-	-	-	-	0,1	1,5
43	Elektrik	100	210	12	160	3,8	-	-	0,3	1,75
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	65	90	20	-	-	-	-	0,3	3
44	Elektrik	420	280	80	220	3,3	-	-	0,1	1,8
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	55	100	25	-	-	-	-	0,3	3
45	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	220	100	31	-	-	-	-	0,1	2,8
	Isı	110	200	10	-	-	-	-	0,2	0,5
46	Elektrik	160	220	10	190	3,6	-	-	0,2	1,1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Doğal gaz	70	110	25	-	-	-	-	0,1	1,4
	Isı	380	265	48	-	-	-	-	0,2	1,4
47	Elektrik	25	200	80	100	4,2	-	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	185	140	13	-	-	-	-	0,1	3
	Isı	380	265	48	-	-	-	-	0,2	1,4
48	Elektrik	160	220	10	190	3,6	-	-	0,2	1,1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	100	200	20	-	-	-	-	0,2	1,8
	Isı	220	215	20	-	-	-	-	0,2	1,7
49	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	185	235	34	-	-	-	-	0,1	1
	Isı	200	100	10	-	-	-	-	0,1	0,7
50	Elektrik	300	130	95	90	4,9	-	-	0,2	1,9
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	290	140	50	-	-	-	-	0,2	1,8
51	Elektrik	410	230	60	130	3,5	-	-	0,1	1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	185	140	13	-	-	-	-	0,1	3

Çizelge 7.4. (devam) EH yapılarındaki enerji taşıyıcılarının maliyet katsayıları.

Hub No	Giriş Enerjisi	Maliyet Katsayıları							Enerji Üretimlerinin Alt ve Üst Limitleri (pu)	
		a (mu)	b (mu/pu)	c (mu/pu ²)	d (rad/pu)	e (mu)	g _w (mu/pu)	h _s (mu/pu)	E _{min} (pu)	E _{max} (pu)
52	Elektrik	110	150	100	60	4,3	-	-	0,1	3
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	185	235	34	-	-	-	-	0,1	1
	Isı	110	220	40	-	-	-	-	0,1	1,5
53	Elektrik	230	170	90	70	3,9	-	-	0,1	1,75
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	60	220	10	-	-	-	-	0,1	3,2
	Isı	410	120	20	-	-	-	-	0,1	0,9
54	Elektrik	160	200	30	160	3,2	-	-	0,2	1,6
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	70	200	12	-	-	-	-	0,2	2,7
55	Elektrik	220	190	40	190	4	-	-	0,1	2,1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	100	230	27	-	-	-	-	0,1	1,8
56	Elektrik	230	170	90	70	3,9	-	-	0,1	1,75
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	330	220	29	-	-	-	-	0,2	1
	Isı	410	120	20	-	-	-	-	0,1	0,9
57	Elektrik	110	150	100	60	4,3	-	-	0,1	3
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	290	140	50	-	-	-	-	0,2	1,8
58	Elektrik	490	80	28	100	3,5	-	-	0,1	3
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Isı	220	215	20	-	-	-	-	0,2	1,7
59	Elektrik	25	200	80	100	4,2	-	-	0,1	0,75
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Doğal gaz	40	100	25	-	-	-	-	0,2	1,9
	Isı	200	100	10	-	-	-	-	0,1	0,7
60	Elektrik	230	170	90	70	3,9	-	-	0,1	1,75
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Doğal gaz	290	140	50	-	-	-	-	0,2	1,8
	Isı	110	135	32	-	-	-	-	0,1	0,5
61	Elektrik	310	220	70	130	4,6	-	-	0,1	2,1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	185	235	34	-	-	-	-	0,1	1
	Isı	110	135	32	-	-	-	-	0,1	0,5
62	Elektrik	410	230	60	130	3,5	-	-	0,1	1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	330	220	29	-	-	-	-	0,2	1

Çizelge 7.4. (devam) EH yapılarındaki enerji taşıyıcılarının maliyet katsayıları.

Hub No	Giriş Enerjisi	Maliyet Katsayıları							Enerji Üretimlerinin Alt ve Üst Limitleri (pu)	
		a (mu)	b (mu/pu)	c (mu/pu ²)	d (rad/pu)	e (mu)	g _w (mu/pu)	h _s (mu/pu)	E _{min} (pu)	E _{max} (pu)
63	Elektrik	230	170	90	70	3,9	-	-	0,1	1,75
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	150	170	19	-	-	-	-	0,1	3,2
	Isı	40	100	70	-	-	-	-	0,1	0,4
64	Elektrik	220	190	40	190	4	-	-	0,1	2,1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	70	200	12	-	-	-	-	0,2	2,7
	Isı	40	100	70	-	-	-	-	0,1	0,4
65	Elektrik	100	160	70	130	3,3	-	-	0,2	1,5
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	220	100	31	-	-	-	-	0,1	2,8
66	Elektrik	160	200	30	160	3,2	-	-	0,2	1,6
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	90	170	20	-	-	-	-	0,1	1
	Isı	200	150	15	-	-	-	-	0,1	0,9
67	Elektrik	100	160	70	130	3,3	-	-	0,2	1,5
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	60	220	10	-	-	-	-	0,1	3,2
	Isı	200	150	15	-	-	-	-	0,1	0,9
68	Elektrik	410	230	60	130	3,5	-	-	0,1	1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,75	-	0,1	0,75
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	150	170	19	-	-	-	-	0,1	3,2
	Isı	410	120	20	-	-	-	-	0,1	0,9
69	Elektrik	310	220	70	130	4,6	-	-	0,1	2,1
	Rüzgar	-	-	-	-	-	1,6	-	0,1	0,6
	Güneş	-	-	-	-	-	-	1,6	0,1	0,5
	Doğal gaz	100	230	27	-	-	-	-	0,1	1,8
	Isı	220	215	20	-	-	-	-	0,2	1,7

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Burçin ÖZKAYA

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2022
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Süleyman Demirel Üniversitesi	2018
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	2014
Lise		Gebze Anibal Anadolu Lisesi	2009

YAYINLAR

1. B. Özkaya, U. Güvenç ve O. Bingöl, “Fitness Distance Balance based LSHADE algorithm for energy hub economic dispatch problem”, *IEEE Access*, c.10, ss. 66770-66796.
2. U. Guvenç, H. Bakir, S. Duman ve B. Özkaya, “Optimal Power Flow Using Manta Ray Foraging Optimization”. *In the International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering*, Springer, Cham. ss. 136-149.
3. U. Güvenç, O. Bingöl ve B. Özkaya, “Optimal Reaktif Güç Dağıtımı İçin Kır Kurdu Optimizasyon Algoritması”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, c. 8, sayı 5, ss. 1-10, 2020.
4. U. Guvenç, B. Özkaya, H. Bakir, S. Duman ve O. Bingöl, “Energy hub economic dispatch by symbiotic organisms search algorithm”, *In The International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering*, Springer, Cham, 2019, ss. 375-385.

5. O. Bingöl ve B. Özkaya, “A comprehensive overview of soft computing based MPPT techniques for partial shading conditions in PV systems”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, c. 7, sayı 4, ss. 926-939, 2019.
6. B. Özkaya, M. K. Döşoğlu, U. Güvenç ve O. Bingöl, “Static Voltage Stability Improvement using TCSC during Transient State in Power System”, *International Conferences on Engineering Science and Technology*, Prizren, Kosova, 2019, ss. 191.
7. O. Bingöl ve B. Özkaya, “Analysis and comparison of different PV array configurations under partial shading conditions”, *Solar Energy*, c. 160, ss. 336-343, 2018.
8. O. Bingöl, B. Özkaya ve M. Bayram, “Wireless Sensor Network Based Remote Drip Irrigation System”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, c. 6, sayı 4, ss. 554-563, 2018.
9. O. Bingöl, B. Özkaya ve S. Paçacı, “Comparison of fuzzy logic and perturb&observe control in maximum power point tracking for photovoltaic system using buck converter”, *Mugla Journal of Science and Technology*, c. 3, sayı 1, ss. 51-57.