

T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARININ ŞEBEKEYE ETKİSİNİN  
MODELLENMESİ VE YERLEŞİM OPTİMİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Mustafa NURMUHAMMED

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Teoman KARADAĞ

ŞUBAT 2024

T.C  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARININ ŞEBEKEYE ETKİSİNİN  
MODELLENMESİ VE YERLEŞİM OPTİMİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Mustafa NURMUHAMMED  
(36183619002)

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Teoman KARADAĞ  
Eş Danışman: Doç. Dr. Ozan AKDAĞ

ŞUBAT 2024

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Teoman KARADAĞ'a, eş danışman hocam Doç. Dr. Ozan AKDAĞ'a, tez izleme komitesinde yer alan ve bilgi ve tecrübeleriyle her zaman destek olan Prof. Dr. Tahmuraz ABBASOV ve Doç. Dr. Barış Baykant ALAGÖZ'e, ve desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Kadir ARSLAN'a,

Çalışmalarımnda ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince beni her zaman destekleyen aileme,

Tezin uygulama aşamasında vermiş oldukları desteklerden dolayı, İnönü Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederim.

## ONUR SÖZÜ

Doktora veya yüksek lisans tezi olarak sunduğum “*Elektrikli araç şarj istasyonlarının şebekeye etkisinin modellenmesi ve yerleşim optimizasyonu*” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mustafa NURMUHAMMED

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....                                                                        | i         |
| ONUR SÖZÜ .....                                                                                | ii        |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                               | iii       |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                                                         | v         |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                                           | vii       |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR .....                                                                 | ix        |
| ÖZET .....                                                                                     | xi        |
| ABSTRACT .....                                                                                 | xii       |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                          | <b>1</b>  |
| 1.1 Elektrikli Araç Teknolojisi .....                                                          | 1         |
| 1.2 Şarj İstasyonlarının Yerleşimi İle İlgili Yapılan Çalışmalar .....                         | 4         |
| 1.2.1 Şarj istasyonlarının konumlandırılması .....                                             | 5         |
| 1.2.2 Şarj istasyonlarının dağıtım ağına etkisi gözetilerek<br>konumlandırılması .....         | 6         |
| <b>2. TEMEL KAVRAMLAR VE TANIMLAR .....</b>                                                    | <b>16</b> |
| 2.1 Şarj İstasyonları .....                                                                    | 16        |
| 2.1.1 AA şarj istasyonları .....                                                               | 16        |
| 2.1.2 DA şarj istasyonları .....                                                               | 16        |
| 2.2 Güç Kaybı .....                                                                            | 18        |
| 2.3 Gerilim Sapması .....                                                                      | 18        |
| 2.4 Gerilim Kararlılık İndeksi (GKİ-VSI) .....                                                 | 19        |
| <b>3. MATERYAL VE METOT .....</b>                                                              | <b>20</b> |
| 3.1 Tez Kapsamında Kullanılan Yazılımlar .....                                                 | 20        |
| 3.2 Tez Kapsamında Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları .....                                 | 20        |
| 3.2.1 Arşimet optimizasyon algoritması.....                                                    | 21        |
| 3.2.2 Bal porsuğu algoritması.....                                                             | 22        |
| 3.2.3 Altın çakal algoritması .....                                                            | 24        |
| 3.3 Tez Kapsamında Modifiye Edilen Optimizasyon Algoritmaları.....                             | 26        |
| 3.3.1 AOA'nın parametre optimizasyonu ile modifiye edilmesi (MAOA).....                        | 26        |
| 3.3.2 AOA'nın boyut genişleme ve parametre optimizasyonu ile modifiye<br>edilmesi (MDAOA)..... | 29        |
| 3.4 Tez Kapsamında Kullanılan Kıyaslama Fonksiyon ve Problemleri.....                          | 35        |
| 3.4.1 Standart kıyaslama fonksiyonları .....                                                   | 35        |
| 3.4.2 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonları.....                                                    | 36        |
| 3.4.3 Mühendislik tasarım problemleri .....                                                    | 37        |
| Germe/sıkıştırma yayı tasarımı.....                                                            | 37        |
| Basınçlı kap tasarımı .....                                                                    | 38        |
| Kaynaklı giriş tasarım problemi .....                                                          | 39        |
| Hız düşürücü problem .....                                                                     | 40        |
| Üç çubuklu kafes tasarımı .....                                                                | 41        |
| 3.5 Tez Kapsamında Kullanılan Test Dağıtım Ağları .....                                        | 42        |
| 3.5.1 42-baralı örnek dağıtım ağı .....                                                        | 42        |
| 3.5.2 IEEE-33 baralı test dağıtım ağı .....                                                    | 45        |
| 3.5.3 IEEE-69 baralı test dağıtım ağı .....                                                    | 47        |
| 3.5.4 Hatay 10-baralı test dağıtım ağı .....                                                   | 49        |
| 3.6 Tez Kapsamında Önerilen/Kullanılan Şarj İstasyonu Yerleşimi<br>Problemleri .....           | 50        |
| 3.6.1 Problem 1: Örnek 42 baralı dağıtım ağına yerleşim problemi .....                         | 50        |

|                                                                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6.2 Problem 2: Newton Raphson tabanlı geliştirilen yeni bir model ile şarj istasyonu yerleşim problemi ..... | 51         |
| 3.6.3 Problem 3: Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA) ile şarj istasyonu yerleşim problemi .....                       | 54         |
| 3.6.4 Problem 4: Elektrikli otobüsler için şarj istasyonu yerleşim problemi .....                              | 55         |
| 3.7 Tez Kapsamında Kullanılan İstatistiksel Yöntemler .....                                                    | 60         |
| 3.7.1 Shapiro-Wilk (SW) testi .....                                                                            | 60         |
| 3.7.2 Friedman testi .....                                                                                     | 60         |
| 3.7.3 Wilcoxon rank-sum testi .....                                                                            | 60         |
| <b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                                                                           | <b>61</b>  |
| 4.1 Modifiye AOA(MAOA ve MDAOA)'nın Kıyaslama Fonksiyonlarına Uygulanması .....                                | 61         |
| 4.1.1 Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA)'nın standart kıyaslama fonksiyonlarına uygulanması .....                    | 63         |
| 4.1.2 Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA)'nın CEC 2017 kıyaslama fonksiyonlarına uygulanması .....                    | 70         |
| 4.1.3 Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA)'nın mühendislik problemlerine uygulanması .....                             | 74         |
| 4.2 Problem 1: Şarj İstasyonu Yerleşiminin Örnek 42 Baralı Dağıtım Ağına Uygulanması .....                     | 79         |
| 4.3 Problem 2: Newton Raphson Tabanlı Geliştirilen Yeni Bir Model İle Şarj İstasyonu Yerleşimi .....           | 83         |
| 4.4 Problem 3: Şarj İstasyonu Yerleşiminin Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA) İle Uygulanması .....                  | 88         |
| 4.4.1 IEEE-33 baralı test dağıtım ağı .....                                                                    | 88         |
| 4.4.2 IEEE-69 baralı test dağıtım ağı .....                                                                    | 91         |
| 4.4.3 Hatay 10-baralı dağıtım ağı .....                                                                        | 93         |
| 4.5 Problem 4: Elektrikli Otobüsler İçin Şarj İstasyonu Yerleşiminin AÇO İle Uygulanması .....                 | 96         |
| 4.5.1 IEEE-33 baralı test dağıtım ağı .....                                                                    | 97         |
| 4.5.2 IEEE-69 baralı test dağıtım ağı .....                                                                    | 103        |
| 4.6 Sonuçlar ve Tartışma .....                                                                                 | 112        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                                              | <b>113</b> |
| 5.1 Sonuç .....                                                                                                | 113        |
| 5.2 Öneriler .....                                                                                             | 114        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                         | <b>116</b> |
| <b>EKLER .....</b>                                                                                             | <b>136</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                                          | <b>144</b> |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1 : SAE International'ın tanımladığı AA standartları.....                                            | 16 |
| Çizelge 2.2 : SAE International'ın tanımladığı DA standartları.....                                            | 17 |
| Çizelge 2.3 : Şarj türü, gücü ve süreleri. ....                                                                | 18 |
| Çizelge 3.1 : Parametre değerleri için duyarlılık analizi.....                                                 | 27 |
| Çizelge 3.2 : Parametrelerin orijinal değerleri. ....                                                          | 28 |
| Çizelge 3.3 : Standart kıyaslama fonksiyon parametreleri.....                                                  | 35 |
| Çizelge 3.4 : CEC 2017 Test fonksiyonlarının açıklamaları. ....                                                | 36 |
| Çizelge 3.5 : 36 kV'luk kesitine ait yük/üretim verileri.....                                                  | 44 |
| Çizelge 3.6 : 36 kV'luk kesitine ait yük/üretim verileri.....                                                  | 44 |
| Çizelge 3.7 : 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V'luk dağıtım hattına ait veriler (1. Grup hat verileri). ....  | 44 |
| 1. Gruba bağlı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır. (LV-1/LV-2/LV-3).....                            | 44 |
| Çizelge 3.8 : 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V'luk dağıtım hattına ait veriler (2. Grup hat verileri). ....  | 44 |
| 2. Gruba bağlı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır. (LV-4,LV-5,LV-6).....                            | 45 |
| Çizelge 3.9 : 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V'luk dağıtım hattına ait veriler (3. Grup hat verileri). ....  | 45 |
| 3. Gruba bağlı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır. (LV-7,LV-8,LV-9).....                            | 45 |
| Çizelge 3.10 : 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V'luk dağıtım hattına ait veriler (4. Grup hat verileri). .... | 45 |
| 4.Gruba bağlı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır LV-10, LV-11. ....                                 | 45 |
| Çizelge 3.11 : 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V'luk yük verileri (1.ve 2. grup). ....                        | 45 |
| Çizelge 3.12 : 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V'luk yük verileri (3.ve 4. grup). ....                        | 45 |
| Çizelge 3.13 : IEEE-33 baralı test dağıtım ağının hat ve yük verileri. ....                                    | 46 |
| Çizelge 3.14 : IEEE-69 baralı test dağıtım ağının hat ve yük verileri. ....                                    | 47 |
| Çizelge 3.15 : 10 baralı Hatay dağıtım ağının hat verileri. ....                                               | 50 |
| Çizelge 3.16 : MLR Katsayıları. ....                                                                           | 57 |
| Çizelge 3.17 : Model parametreleri.....                                                                        | 57 |
| Çizelge 4.1 : Karşılaştırmada kullanılan algoritmalar için parametreler. ....                                  | 62 |
| Çizelge 4.2 : 13 standart kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları. ....                                      | 66 |
| Çizelge 4.3 : Problem parametreleri. ....                                                                      | 74 |
| Çizelge 4.4 : Mühendislik problemleri için hesaplanan çözümlerin karşılaştırması. ....                         | 77 |
| Çizelge 4.5 : Trafo Elektrikli şarj istasyonları devre değilken bara gerilimleri.....                          | 79 |
| Çizelge 4.6 : Şebekeye ait toplam durum.....                                                                   | 80 |
| Çizelge 4.7 : Trafo yüklenmeleri. ....                                                                         | 80 |
| Çizelge 4.8 : Elektrikli şarj istasyonlarının tamamı devrede iken (kontROLSÜZ şarj) bara gerilimleri. ....     | 80 |
| Çizelge 4.9 : KontROLSÜZ şarj yapılırken toplam durum. ....                                                    | 81 |
| Çizelge 4.10 : Elektrikli Şarj istasyonlarının tamamı devrede (kontROLSÜZ şarj) iken trafo yüklenmeleri. ....  | 81 |
| Çizelge 4.11 : Kontrollü şarj yapılırken bara gerilimleri. ....                                                | 81 |
| Çizelge 4.12 : Kontrollü şarj yapılırken toplam durum. ....                                                    | 81 |
| Çizelge 4.13 : Kontrollü şarj yapılırken trafo yüklenmeleri. ....                                              | 82 |
| Çizelge 4.14 : IEEE-33 baralı test sistemlerinin yük akış analizi sonuçları ....                               | 84 |
| Çizelge 4.15 : IEEE-33 baralı test sisteminin hat yüklenmeleri ....                                            | 84 |
| Çizelge 4.16 : IEEE-33 baralı test dağıtım ağı yük akış analizi sonuçları. ....                                | 85 |
| Çizelge 4.17 : IEEE-33 baralı test sisteminin hat yüklenmeleri. ....                                           | 86 |
| Çizelge 4.18 : IEEE-33 baralı test sisteminin GKİ değerleri. ....                                              | 86 |

|                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Çizelge 4.19 :</b> Elektrikli araç şarj istasyonlarının IEEE-33 baralı test dağıtım ağına yerleştirilmesi için optimizasyon algoritmalarının karşılaştırmalı sonuçları. ....   | 89  |
| <b>Çizelge 4.20 :</b> Elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleşiminden sonra IEEE-33 baralı test dağıtım ağındaki bara gerilimleri. ....                                        | 90  |
| <b>Çizelge 4.21 :</b> Elektrikli araç şarj istasyonlarının IEEE-69 baralı dağıtım sistemine yerleştirilmesi için optimizasyon algoritmalarının sonuçlarının karşılaştırması. .... | 91  |
| <b>Çizelge 4.22 :</b> Elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleştirilmesinden sonra IEEE-69 baralı sistemindeki bara gerilimleri. ....                                           | 92  |
| <b>Çizelge 4.23 :</b> Elektrikli araç şarj istasyonlarının IEEE-69 baralı dağıtım sistemine yerleştirilmesi için optimizasyon algoritmalarının sonuçlarının karşılaştırması. .... | 94  |
| <b>Çizelge 4.24 :</b> Amaç fonksiyonu için optimizasyon algoritmalarının karşılaştırılması. ....                                                                                  | 96  |
| <b>Çizelge 4.25 :</b> Her bölge için rota bilgisi. ....                                                                                                                           | 97  |
| <b>Çizelge 4.26 :</b> Farklı ağırlıklar için şarj istasyonu yerleşimi ve güç kalitesi (300 kW şarj gücü). ....                                                                    | 101 |
| <b>Çizelge 4.27 :</b> Şarj istasyonu gücü 150 kW'a düşürüldüğünde farklı ağırlıklara sahip sonuçlar. ....                                                                         | 102 |
| <b>Çizelge 4.28 :</b> Her bölge için rota bilgisi. ....                                                                                                                           | 104 |
| <b>Çizelge 4.30 :</b> Şarj istasyonu gücü 150 kW'a düşürüldüğünde farklı ağırlıklara sahip sonuçlar. ....                                                                         | 108 |
| <b>Çizelge A.1 :</b> 29 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları. ....                                                                                                  | 137 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 1.3 : Şarj istasyonları ile ilgili araştırma alanları. ....                                                                                                              | 5   |
| Şekil 1.4 : Elektrikli araçların mikro şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynakları<br>üzerinden şarj olma işlemi. ....                                                      | 8   |
| Şekil 1.5 : Literatür çalışmasında birbiriyle ilişkili konular ve anahtar kelimeler arasındaki<br>ilişkiler. ....                                                              | 11  |
| Şekil 3.1 : Önerilen MDAOA'nın akış diyagramı. ....                                                                                                                            | 29  |
| Şekil 3.2 : Önerilen MDAOA'nın akış diyagramı. ....                                                                                                                            | 34  |
| Şekil 3.3 : Germe/sıkıştırma yayı tasarımı problemi. ....                                                                                                                      | 37  |
| Şekil 3.4 : Basınçlı kap tasarım problemi. ....                                                                                                                                | 38  |
| Şekil 3.5 : Kaynaklı giriş tasarım problemi. ....                                                                                                                              | 39  |
| Şekil 3.6 : Hız düşürücü tasarım problemi. ....                                                                                                                                | 40  |
| Şekil 3.7 : Üç çubuklu kafes tasarım problemi. ....                                                                                                                            | 41  |
| Şekil 3.8 : 42 baralı örnek Türkiye dağıtım sisteminin 36 kV'luk yaklaşık modelinin tek<br>hat diyagramı. ....                                                                 | 43  |
| Şekil 3.9 : 42 baralı Örnek Türkiye dağıtım sisteminin 400 V'luk yaklaşık modelinin tek<br>hat diyagramı (LV-1 için). ....                                                     | 43  |
| Şekil 3.10 : IEEE-33 baralı test dağıtım ağı. ....                                                                                                                             | 46  |
| Şekil 3.11 : IEEE-69 baralı dağıtım ağı şeması. ....                                                                                                                           | 47  |
| Şekil 3.12 : Hatay dağıtım ağının 10 baralı sanal modeli. ....                                                                                                                 | 49  |
| Şekil 3.13 : 10 adet şarj ünitesine ait yük modeli. ....                                                                                                                       | 50  |
| Şekil 3.14 : Önerilen metoda ait akış diyagramı. ....                                                                                                                          | 52  |
| Şekil 3.15 : Önerilen yöntemin akış şeması. ....                                                                                                                               | 60  |
| Şekil 4.1 : Standart kıyaslama fonksiyonunun yakınsama eğrisi grafikleri. ....                                                                                                 | 63  |
| Şekil 4.2 : CEC 2017 kıyaslama fonksiyonlarının yakınsama eğrisi grafikleri. ....                                                                                              | 70  |
| Şekil 4.3 : Germe/sıkıştırma yayı tasarımı problemi için yakınsama eğrileri. ....                                                                                              | 75  |
| Şekil 4.4 : Basınçlı kap tasarım problemi için yakınsama eğrileri. ....                                                                                                        | 75  |
| Şekil 4.5 : Kaynaklı giriş tasarım problemi için yakınsama eğrileri. ....                                                                                                      | 75  |
| Şekil 4.6 : Hız düşürücü tasarım problemi için yakınsama eğrileri. ....                                                                                                        | 76  |
| Şekil 4.7 : Üç çubuklu makas tasarım probleminin yakınsama eğrileri. ....                                                                                                      | 76  |
| Şekil 4.8 : IEEE-33 baralı test sistemi ....                                                                                                                                   | 88  |
| Şekil 4.9 : MAOA, MDAOA ve diğer optimizasyon algoritmalarının IEEE-33 baralı<br>dağıtım ağı için uygunluk değerlerini gösteren grafik. ....                                   | 90  |
| Şekil 4.10 : IEEE-69 baralı test sistemi ....                                                                                                                                  | 91  |
| Şekil 4.11 : Elektrikli araç şarj istasyonlarının IEEE-69 baralı test dağıtım ağına<br>yerleştirilmesi için optimizasyon algoritmalarının sonuçlarının karşılaştırılması. .... | 93  |
| Şekil 4.12 : Hatay dağıtım ağının 10 baralı sanal modeli. ....                                                                                                                 | 93  |
| Şekil 4.13 : Hatay dağıtım ağının 10 baralı sanal modeli için optimizasyon algoritmalarının<br>uygunluk değeri yakınsama eğrisi grafikleri karşılaştırması. ....               | 94  |
| Şekil 4.14 : IEEE-33 baralı test sistemi ve üç bölge ....                                                                                                                      | 97  |
| Şekil 4.15 : IEEE-33 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj istasyonu<br>konumlarını gösteren diyagram. ....                                           | 98  |
| Şekil 4.16 : IEEE-33 baralı test sistemi için 3.durumun yakınsama eğrisi. ....                                                                                                 | 98  |
| Şekil 4.17 : IEEE-33 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj<br>istasyonlarını gösteren diyagram (Güç etkisi ağırlıklı). ....                           | 99  |
| Şekil 4.18 : IEEE-33 baralı test sistemi için 2.durumun yakınsama eğrisi. ....                                                                                                 | 99  |
| Şekil 4.19 : IEEE-33 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj<br>istasyonlarını gösteren diyagram (Sosyal ve çevresel etki ağırlıklı). ....              | 100 |

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.20 :</b> IEEE-33 baralı test sistemi için 3.durumun yakınsama eğrisi. ....                                                                                 | 100 |
| <b>Şekil 4.21 :</b> IEEE-33 baralı test sistemi için tüm durumların birleştirilmiş yakınsama grafiği. ....                                                            | 101 |
| <b>Şekil 4.22 :</b> IEEE-33 baralı test dağıtım ağındaki gerilimler – 300 kW. ....                                                                                    | 102 |
| <b>Şekil 4.23 :</b> IEEE-33 baralı test dağıtım ağındaki gerilimler – 150 kW. ....                                                                                    | 103 |
| <b>Şekil 4.24 :</b> IEEE-69 baralı test sistemi ve beş bölge. ....                                                                                                    | 103 |
| <b>Şekil 4.25 :</b> IEEE-69 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj istasyonlarını gösteren diyagram. ....                                     | 104 |
| <b>Şekil 4.26 :</b> IEEE-69 baralı test sistemi için 1.durumun yakınsama eğrisi. ....                                                                                 | 105 |
| <b>Şekil 4.27 :</b> IEEE-69 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj istasyonlarını gösteren diyagram (Güç etkisi ağırlıklı). ....              | 105 |
| <b>Şekil 4.28 :</b> IEEE-69 baralı test sistemi için 2.durumun yakınsama eğrisi. ....                                                                                 | 106 |
| <b>Şekil 4.29 :</b> IEEE-69 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj istasyonlarını gösteren diyagram (Sosyal ve çevresel etki ağırlıklı). .... | 106 |
| <b>Şekil 4.30 :</b> IEEE-69 baralı test sistemi için 3.durumun yakınsama eğrisi. ....                                                                                 | 107 |
| <b>Şekil 4.31 :</b> IEEE-69 baralı test dağıtım ağı için tüm durumların yakınsama grafiği. ....                                                                       | 107 |
| <b>Şekil 4.32 :</b> IEEE-69 baralı test dağıtım ağındaki gerilimler – 300 kW. ....                                                                                    | 108 |
| <b>Şekil 4.33 :</b> IEEE-69 baralı test dağıtım ağındaki gerilimler – 150 kW. ....                                                                                    | 109 |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

|                           |                                                                     |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>GKİ</b>                | : Gerilim kararlılık indeksi                                        |
| <b>EAŞİ</b>               | : Elektrikli araç şarj istasyonu                                    |
| <b>EA</b>                 | : Elektrikli araç                                                   |
| <b>V</b>                  | : Gerilim                                                           |
| <b>V<sub>i</sub></b>      | : i. bara gerilimi                                                  |
| <b>V<sub>min</sub></b>    | : Minimum gerilim                                                   |
| <b>CEC</b>                | : Competitions on Evolutionary Computation                          |
| <b>t</b>                  | : İterasyon                                                         |
| <b>t<sub>max</sub></b>    | : Maksimum iterasyon                                                |
| <b>I<sub>i</sub></b>      | : Hat akımı                                                         |
| <b>n<sub>branch</sub></b> | : Hat sayısı                                                        |
| <b>ρ</b>                  | : Yoğunluk                                                          |
| <b>R<sub>i</sub></b>      | : Hat direnci                                                       |
| <b>SAE</b>                | : Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (Society of Automotive Engineers) |
| <b>AA</b>                 | : Alternatif akım                                                   |
| <b>DA</b>                 | : Doğru akım                                                        |
| <b>Z</b>                  | : Hat impedansı                                                     |
| <b>P<sub>k</sub></b>      | : k. baradaki aktif güç                                             |
| <b>Q<sub>k</sub></b>      | : k. baradaki reaktif güç                                           |
| <b>den</b>                | : Yoğunluk                                                          |
| <b>rand</b>               | : Rastsal sayı                                                      |
| <b>vol</b>                | : Hacim                                                             |
| <b>f</b>                  | : Fonksiyon                                                         |
| <b>kV</b>                 | : Kilovolt                                                          |
| <b>MW</b>                 | : Megawatt                                                          |

|                      |                                                                           |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>p.u.</b>          | : Per unit                                                                |
| <b>w<sub>i</sub></b> | : Ağırlık faktörü                                                         |
| <b>AOA</b>           | : Arşimet Optimizasyon Algoritması                                        |
| <b>BPA</b>           | : Bal Porsuğu Algoritması (HBA)                                           |
| <b>SKA</b>           | : Sinüs Kosinüs Algoritması (SCA)                                         |
| <b>GA</b>            | : Genetik Algoritma                                                       |
| <b>SAA</b>           | : Sosyal Ağ Araması (SNS)                                                 |
| <b>PSO</b>           | : Parçacık Sürü Optimizasyonu                                             |
| <b>KOA</b>           | : Kelebek Optimizasyonu Algoritması (BOA)                                 |
| <b>HPSOKOA</b>       | : Parçacık Sürü Optimizasyonu Kelebek Optimizasyonu Algoritması (HPSOBOA) |
| <b>TSA</b>           | : Tulumlular Sürü Algoritması                                             |
| <b>AÇO</b>           | : Altın Çakal Optimizasyonu (GJO)                                         |
| <b>BOA</b>           | : Balina Optimizasyon Algoritması (WOA)                                   |
| <b>KAO</b>           | : Karınca Aslanı Optimizasyonu (ALO)                                      |
| <b>SSA</b>           | : Salp Sürü Algoritması                                                   |
| <b>AYAA</b>          | : Atomik Yörünge Arama Algoritması (AOS)                                  |
| <b>GAO</b>           | : Güve Alevi Optimizasyonu (MFO)                                          |
| <b>DO</b>            | : Denge Optimizasyonu (EO)                                                |
| <b>KOO</b>           | : Kaos Oyunu Optimizasyonu (CGO)                                          |
| <b>IAOA</b>          | : İyileştirilmiş Arşimet Optimizasyon Algoritması (IAOA)                  |

## ÖZET

Doktora Tezi

### ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARININ ŞEBEKEYE ETKİSİNİN MODELLENMESİ VE YERLEŞİM OPTİMİZASYONU

Mustafa NURMUHAMMED

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

146+XII sayfa

2024

Danışman: Doç. Dr. Teoman KARADAĞ

Doktora tez çalışmasında, elektrikli araç şarj istasyonlarının dağıtım ağlarına optimum entegrasyon için istasyonlarının dağıtım ağı üzerinde elektriksel, sosyal ve çevresel parametreler dikkate alınarak en uygun şekilde yerleştirilmesini sağlayan bir yöntem önerilmektedir. Bu amaç doğrultusunda, istasyonların en uygun şekilde yerleştirilmesi için iki adet yeni modifiye Arşimet optimizasyon algoritması (MAOA ve MDAOA) önerilmiştir. Modifiye algoritmalar ile klasik AOA'nın erken yakınsamasını önlemek ve keşif ile sömürü arasındaki dengeyi geliştirmek hedeflenmiştir. Önerilen modifiye algoritmaların performansı, 13 standart kıyaslama fonksiyonu, 29 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonu, beş gerçek hayat mühendislik problemi ve elektrikli araç şarj istasyonlarının test dağıtım ağlarına en uygun şekilde yerleştirilmesi problemi üzerinde test edilmiştir. Ayrıca önerilen modifiye algoritmaların etkinliği, modern ve rekabetçi algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen modifiye algoritmaların test fonksiyonlarının çoğunda düşük standart sapma değerlerini koruyarak diğer algoritmalarından daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Önerilen modifiye algoritmalarından MDAOA, 13 standart karşılaştırmanın 12'sinde, 29 CEC 2017 test fonksiyonu ve beş gerçek hayat mühendislik problemlerinin tamamında en iyi sonuçları vermiştir. MDAOA toplamda 47 problemin 46'sında en iyi sonucu sağlamıştır (genel başarı oranı %97.87). Önerilen algoritma daha sonra IEEE 33, 69 ve 10-baralı Hatay dağıtım ağlarında test edilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin elektrikli araç şarj istasyonlarının dağıtım ağlarına entegrasyonunda da etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışmada, elektrikli otobüslerin şarj istasyonlarının dağıtım ağı üzerinde elektriksel, sosyal ve çevresel özelliklere göre en uygun şekilde yerleştirilmesini sağlayan bir yöntem önerilmiştir. Yöntemde güç kaybı, voltaj sapması, gerilim kararlılık indeksi, nüfus yoğunluğu, trafik yoğunluğu, ilgi çekici noktalara yakınlık ve konum maliyeti parametreleri kullanılmıştır. Elektrikli otobüslerin enerji tüketimi on parametre kullanılarak doğrusal modelleme yöntemiyle hesaplanmış ve bu veri elektrikli otobüsün duraklar arasında bataryasının bitmesi ihtimalini ortadan kaldırmak için kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dağıtım sistemleri, Elektrikli araç şarj istasyonları, Elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleştirilmesi, Elektrikli otobüsler, Modifiye Arşimet optimizasyon algoritması, Şarj istasyonlarının dağıtım ağında konumlandırılması

## ABSTRACT

Phd. Thesis

### MODELING THE EFFECT OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS ON THE GRID AND PLACEMENT OPTIMIZATION

Mustafa NURMUHAMMED

Inonu University  
Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Department of Computer Engineering

146+XII pages

2024

Supervisor: Associate Prof. Teoman KARADAĞ

In this doctoral thesis, a method that ensures the optimal placement of electric vehicle charging stations on the distribution network is proposed, taking into account electrical, social and environmental parameters, for optimum integration into distribution networks. For this purpose, two new modified Archimedes optimization algorithms (MAOA and MDAOA) have been proposed for the optimal placement of charging stations. With modified algorithms prevention of premature convergence of classical AOA and improvement of the balance between exploration and exploitation are aimed. The performance of the proposed modified algorithms were tested on 13 standard benchmark functions, 29 CEC 2017 benchmark functions, five real-life engineering problems, and the problem of optimal placement of electric vehicle charging stations in test distribution networks. Additionally, the effectiveness of the proposed modified algorithms is compared with modern and competitive algorithms. Experimental results show that the proposed modified algorithms outperform other algorithms by maintaining low standard deviation values in most of the test functions. MDAOA of the proposed modified algorithms gave the best results on 12 of 13 standard benchmark functions, all 29 CEC 2017 test functions and five real-life engineering problems. In total, MDAOA provided the best results in 46 of 47 problems (overall success rate 97.87%). Next, the proposed algorithm was tested on IEEE 33, 69 and 10-bus Hatay distribution networks. The results show that the proposed method is also effective in integrating electric vehicle charging stations into distribution networks. In addition, a method is proposed in the study that ensures the optimal placement of charging stations of electric buses on the distribution network according to electrical, social and environmental characteristics. Power loss, voltage deviation, voltage stability index, population density, traffic density, proximity to points of interest and location cost parameters were used in the method. The energy consumption of electric buses was calculated by linear modeling method using ten parameters, and this data was used to eliminate the possibility of the electric buses running out of battery between stops.

**Keywords:** Distribution systems, Electric vehicle charging stations, Placement of electric vehicle charging stations, Electric buses, Modified Archimedes optimization algorithm, Placement of charging stations in the distribution network

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Elektrikli Araç Teknolojisi

Elektrikli araçlar 19. yüzyılın sonunda tanıtıldı ve o dönemde olumlu bir satış hacmine ulaşmıştır. Sonraki yıllarda, içten yanmalı motor teknolojisindeki gelişmeler, firmaların seri üretim süreçleri ve petrolün ucuzlayıp yaygınlaşması, içten yanmalı araçları daha cazip hale getirmiş ve elektrikli araçlara olan ilgiyi azaltmıştır [1]. Ayrıca, şehirlerarasında yeni yollar inşa edilip insanların uzun mesafeleri arabalarıyla gitmek istemeleri elektrikli araçların tercih edilememesi sebeplerinden biri olmuştur. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi geçici olarak elektrikli araçları tekrar gündeme getirmiş ve bilinirlikleri artmıştır. 1970'lerden 2000'li yıllara kadar çok az elektrikli araç modeli piyasaya sunulmuştur. Bu nedenlerden dolayı çok az elektrikli araç satılmış ve genel olarak kullanıcıların bu teknolojiyi benimsenmesi çok sınırlı kalmıştır. Fakat 2008'den sonra elektrikli araç teknolojisi hızla gelişti. Özellikle pil teknolojilerinde yaşanan gelişmeler bu teknolojinin geniş kitlelere ulaşmasının önünü açtı. 2014 ile 2019 arasında dünya çapında elektrikli araç satışlarında %69'a varan büyüme oranları görülmüştür [2]. Sonrasında da elektrikli araç satışları önlenemeyen bir artış göstermiştir. Avrupa'da 2020 yılının ilk üç çeyreğinde toplamda şarj edilebilir araç satışlarında %103 artış olmuştur [3]. Elektrikli araç satışlarındaki yaşanan artış beraberinde sektörün büyümesine de sebep olmuştur. Bu kapsamda yeni modeller tanıtılmış, firmalar tarafından çok büyük yatırımlar yapılmış ve bu sektörde insan gücü yetişmiştir. Yapılan bir çalışmada şarj istasyonları altyapısı, sürüş menzili, şarj süresi, araç performansı, marka çeşitliliği, bakım-onarım maliyeti ve elektrikli araç satın alma maliyetinin elektrikli araçların tercih edilmesinde etkili olduğu gözlenmiştir [4]. Başka bir çalışmada Çin'de devlet teşviklerinin, fiyat uygunluğunun, hava kirliliğinin ve araç performansının da araçların satış rakamlarının büyümesinde önemli rol oynadığı saptanmıştır [5].

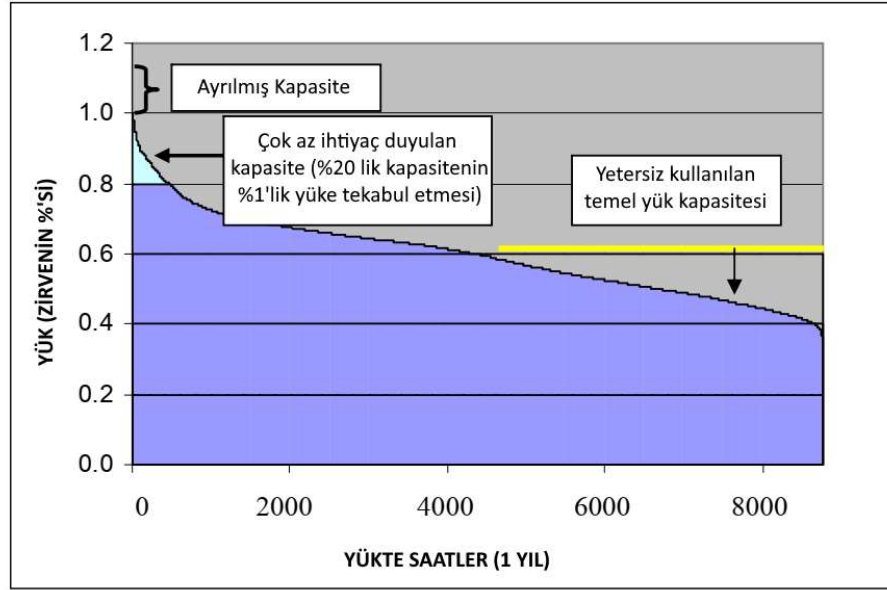
Burada bahsedilen etkenlerden biri olan şarj istasyonları, elektrikli araçların yaygınlaşmasında büyük öneme sahiptir. Evde bir elektrikli aracın şarj olması bataryanın kapasitesine bağlı olarak 18 ile 36 saat arasında sürmektedir. Hızlı şarj istasyonlarının aynı

miktarda enerjiyi sadece 30 dakikada sunuyor olması kullanıcılar için çok büyük kolaylık sağlamakta ve uzun yol seyahatlerinin elektrikli araçlarla yapılmasının önünü açmaktadır.

Elektrikli araçlar en hızlı doğru akım (DA) şarj istasyonları ile şarj edilebilirler. Dünya çapında elektrikli araçların daha hızlı şarj olmalarını sağlamak adına 350 kW-400 kW gibi yüksek güç sağlayan şarj istasyonlarının sayısı her geçen gün artmaktadır. Genellikle DA şarj istasyonlarında birden fazla aracı şarj etmek için ikinci bir soket mevcuttur. Birçok DA şarj istasyonu otoyollarda dinlenme tesislerinde veya kullanıcıların daha çok tercih ettikleri merkezi lokasyonlarda birden fazla sayıda olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu lokasyonlarda onlarca elektrikli aracın aynı anda şarj edilmesi, dağıtım ağı açısından ciddi sorunlar oluşturma potansiyeline sahiptir.

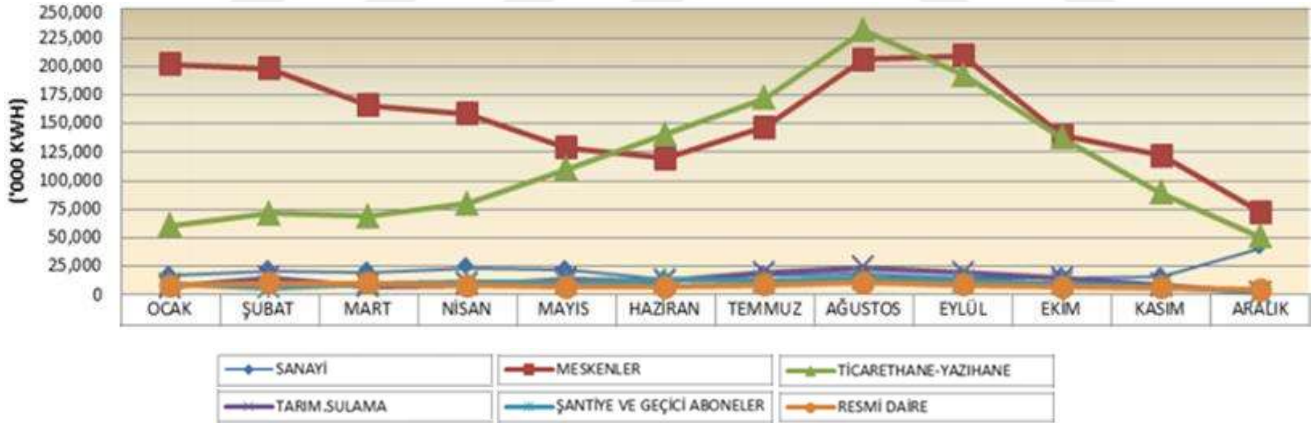
Bu sorunlardan bir tanesi dağıtım ağına oluşan yük talebinin ciddi oranda artmasıdır. Günümüzde 250 kW ve üzerinde şarj gücünü destekleyen yüzbinlerce araç vardır. Sadece dört araç bu güç ile aynı anda şarj olduğunda anlık 1 MW'lık enerji ihtiyacı oluşmaktadır. TEİAŞ'ın tüketim verilerine bu enerji ile yaklaşık 120 konutun bir aylık enerjisi sağlanabilir [6]. Bir aracın 250 kW ile şarj olması durumunda, kurulu gücü 20 MW olan bir hidroelektrik santrali sadece 80 aracın enerji ihtiyacını karşılayabilecektir. Dünya çapında satılan elektrikli araçların her yıl artmasıyla, yakında bu araçların şarj olması dağıtım ağına ek yükler getirecek ve trafolarla yoğunluk artacaktır [7]. Bu veriler elektrikli otomobiller düşünülerek oluşturulmuş olsa da sektörde her geçen yıl sayısı artan elektrikli otobüs ve kamyon gibi ağır araçlar daha fazla enerji ihtiyacı doğuracaktır. 2009-2019 yılları arasında ABD'de enerji talebinde düşüş meydana gelmiş ve enerji üretimindeki artış düşük seviyelerde seyretmiştir, fakat elektrikli araçlar bu trendi değiştirebilir [8].

Plansızca yapılan elektrikli araç şarj işlemleri enerji tüketiminin yüksek olduğu saatlerde trafolardaki yükün artmasına sebep olur. Bu durum enerji arzının dengelenmesinde sorunlara yol açabilir. Bir çalışmada trafodaki yük artışını gözlemlemek için beş evde aynı marka ve model iki araç yoğun ve yoğun olmayan saatlerde şarj işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmaya göre kışın elde edilen sonuçlara göre yoğun saatlerde trafoda %68, yoğun olmayan saatlerde ise %58'lik bir yük artışı gerçekleşmiştir [9]. Yük artışı gün içerisinde farklılık gösterdiği gibi mevsimsel olarak da farklılık gösterebilir. Bir güç santralinin yıl içerisindeki grafiği Şekil1.1'deki gibi gösterilebilir [10].



**Şekil 1.1 : Enerji santrali güç kullanım grafiği**

Şekil 1.1'e göre kullanımda zirve %5'ten daha az bir zaman aralığında gerçekleşmektedir fakat bunun için %20'den fazla bir yük kapasitesine ihtiyaç duyulmaktadır. Mevsimsel olarak düşünüldüğünde, özellikle turizm bölgelerinde yaz ve kış aylarında tüketilen enerji büyük oranda farklılık göstermektedir. Aşağıda Şekil 1.2'de ülkemizin önemli turizm merkezlerinden Antalya'ya ait tüketim grafiği sunulmuştur [11].



**Şekil 1.2 : Antalya ili elektrik tüketiminin kullanım alanlarına göre dağılımı Ocak-Aralık (x 1000 kWh)**

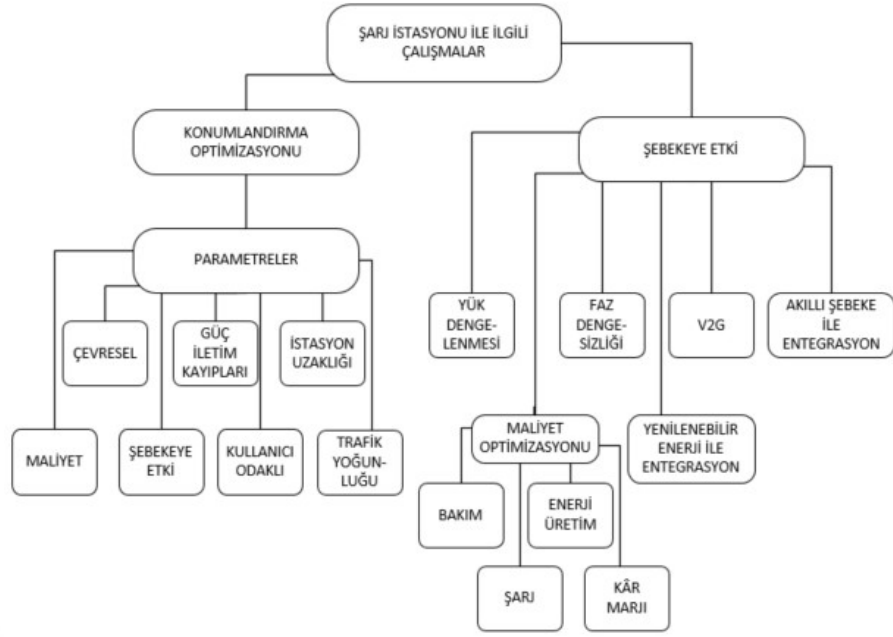
Şekil 1.2'deki grafiğe göre ticarethane-yazıhane tüketimi Nisan ayından itibaren artmaya başlamış ve Ağustos ayında en yüksek seviyeye gelmiştir. Kültür ve Turizm Bakanlığı'na göre 2019'da ülkemize Almanya, İngiltere ve Rusya'dan 12 milyondan fazla ziyaretçi gelmiştir [12]. Bu ülkelerdeki elektrikli araç satışları incelendiğinde, 2019'da İngiltere'de 50 bin ve Almanya'da 109 binden fazla elektrikli araç satıldığı görülmüştür [13]. Türkiye'de ise 2019 yılında 222 ve 2020 yılında 844 adet elektrikli araç satılmıştır [14,15]. Türkiye'de

elektrikli araçlar yeteri kadar yaygınlaşmadığından araçların şarj olmasının dağıtım ağına olumsuz etkisi henüz görülmemiştir. Ancak, ülkemize gelen ziyaretçilerin geldikleri ülkeler incelendiğinde, elektrikli araç satışının ve kullanımının hızla arttığı görülmektedir. 2019 yılında, Almanya’da elektrikli araç satışları, bir önceki yıla göre %61 oranında artmıştır [13]. Bu sebeple ülkemizde de elektrikli araçların yaygın olarak kullanılmaya başlamasıyla ziyaretçilerin ülkelerinden getirecekleri veya ziyaret ettikleri yerlerde elektrikli araç kiralama ihtimalleri gün geçtikçe artacaktır.

Elektrikli araçların şarj olurken, dağıtım ağında yüklü miktarda enerji ihtiyacı oluşturması, dolaylı olarak turizm ile enerji talebi artışına neden olacaktır. Elektrikli araç kullanıcılarının şarj etme alışkanlıklarına göre, araçların eş zamanlı şarj olması, enerji yükünde oluşabilecek sezonluk talep değişiklikleri ve dağıtım ağında enerji arzı güvenliği gibi sorunlara neden olacaktır [16]. Mevcut güç sistemi bileşenleri, beklenmedik enerji talebi artışlarının getirdiği yüklere uzun süre dayanabilecek şekilde tasarlanmamıştır. Bu durumda dağıtım ağı bileşenlerinde aşırı yüklenme veya trafolarla olumsuzluklar yaşanabilir. Ayrıca dağıtım ağındaki voltaj ve faz dengesizliği de oluşabilecek önemli sorunlardandır. Çok sayıda elektrikli aracın aynı anda şarj olması, şarj cihazı bağlantı noktalarında gerilim düşüşü ve sapsmalara yol açabilir [17–19].

## **1.2 Şarj İstasyonlarının Yerleşimi İle İlgili Yapılan Çalışmalar**

Literatürde şarj istasyonlarıyla ilgili çalışmalar genellikle şarj istasyonlarının en uygun konuma yerleştirilmesi ve istasyonların dağıtım ağına etkileri olarak iki ana başlık altında ele alındığı görülmüştür. Şekil 1.3’te istasyonların konumlandırılması ve dağıtım ağına etkisi başlıklarının alt çalışma alanları listelenmiştir [20].



**Şekil 1.3 : Şarj istasyonları ile ilgili araştırma alanları.**

### 1.2.1 Şarj istasyonlarının konumlandırılması

Şarj istasyonları hem donanım hem de kurulum açısından yüksek maliyetlere sahiptir. Bu nedenle, maliyet birçok araştırmada parametre olarak kullanılmış ve şarj istasyonlarının konumlandırılması, bu parametre düşünülerek yapılmıştır [21–25]. Örneğin bir çalışmada yazarlar yıllık güç kayıpları, araçların şarj istasyonlarına ulaşım maliyetlerini, şarj istasyonu yatırım maliyetini ve gereken bakım maliyetlerini optimize ederek en uygun istasyon yerleşimi yapmayı amaçlamışlardır [22].

Elektrikli araçlardaki elektrikli motorların enerji tüketimi, coğrafi koşullardan doğrudan etkilenmektedir. Örneğin yükseklik farkının olduğu iki nokta arasında tüketim, gidiş ve geliş yönlerinde farklı olacaktır. Bu sebeple bazı çalışmalar coğrafi koşulları da dikkate almış ve şarj istasyonları için en uygun lokasyonları önermiştir [21,26].

Çevresel faktörlerin parametre olarak kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır [23,27–29] [30]. İstasyonlar konumlandırılırken çevre bilinci ile yerleşim yapılması ve şarj istasyonları kurarak dolaylı olarak sıfır emisyonlu çevreci araçların yaygınlaşmasına katkı sağlandığı düşünülmüştür [27]. Çevreci olarak nitelendirilen elektrikli araçların şarj işlemi için kullanılan elektriğin elde edildiği kaynak, karbon ayak izinin takibinde büyük önem teşkil etmektedir. Eğer, elektrikli bir araç yakıtı kömür olan bir termik santralden elde edilen enerji ile şarj oluyorsa, aracın çevreci olma özelliği arka planda kalarak karbon ayak izinin artmış olduğu bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şarj istasyonları kullanıcılara uzak yerlerde olduğunda kullanıcılar daha fazla yol gidecek ve ulaşım maliyetleri artacaktır. Bu yüzden yapılan bazı çalışmalarda bu mesafe düşünülerek yöntemler önerilmiştir [22]. Araçların şarj olması için istasyona gitmesine alternatif olarak araçlar otoparklarda park halindeyken şarj olmalarını sağlayan yöntemleri öneren çalışmalar da yapılmıştır [31,32].

Şarj istasyonlarının hem donanım maliyeti hem de işletme maliyeti yüksek olduğundan bu istasyonların kullanım oranlarının artırılması gerekmektedir. Bu yüzden yerleşim yapılırken trafik yoğunluğunun daha fazla olduğu yerler seçildiğinde bu cihazların kullanım oranları yükselecek ve istasyonu işleten operatör, yatırımın karşılığını daha kısa sürede alacaktır. Bu yüzden şarj istasyonlarının konumlandırılmasında trafik yoğunluğu parametresi büyük öneme sahiptir [21,33,34]. Trafik yoğunluğu ile birlikte nüfus yoğunluğu da elektrikli araçlar için şarj istasyonlarının daha doğru yerlerde konumlandırılması açısından faydalı olacaktır. Bu nedenle nüfus yoğunluğu parametresi şarj istasyonlarının yerleşimlerinde kullanılan önemli parametrelerdendir [31–33].

Bazı çalışmalarda önerilen yöntemler gerçek hayat şartlarına uygulanmıştır. Örneğin, bir çalışmada, Portekiz'in Lizbon şehrinde elektrikli araç kullanıcılarının talepleri değerlendirilerek şarj istasyonu yerleştirmesi yapılmıştır [31]. Benzer çalışmalar Shenzhen, Çin [35], Tientsin, Çin [22], Pekin, Çin [27–29], Penghu, Tayvan [24], Seattle, ABD [32], Hong Kong [36], Dublin, İrlanda [37], Angra do Heroismo, Portekiz [26], İspanya [33] ve Ankara, Türkiye [38] gibi dünyanın farklı kentleri için uygulanmıştır.

Bazı çalışmalarda parametrelerin önem dereceleri veya önerilen yöntemdeki ağırlıkları belirlenirken, uzman görüşleri alınmış veya oylama yöntemi uygulanmıştır [21,29], [38].

### **1.2.2 Şarj istasyonlarının dağıtım ağına etkisi gözetilerek konumlandırılması**

#### **Harmonikler**

Elektrikli araçlar şarj olurken meydana gelen harmonikleri konu alan çalışmalar yapılmıştır [39–45]. Bazı çalışmalarda harmoniklerin oluşumunun kanıtlanması, bazılarında ise harmoniklerin tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Elektrikli araçların şarj edilmesi, meydana gelebilecek aşırı harmoniklere sahip güç sistemlerinde potansiyel bir sorun teşkil etmektedir [39]. Şarj sistemlerinin aşırı harmonikleri akım bozulmasına, sekonder dağıtım hattı ve trafo değerinin düşmesine veya verilen hizmetin kalitesi ile ilgili problemlere neden olabilmektedir [45].

### **Akıllı Şebeke (Smart Grid)**

Akıllı Şebeke genel olarak, sürdürülebilir, gözlemlenebilir, verimli, otomatik sistemlere sahip, ekonomik ve güvenli enerji sağlama maksadıyla teknolojinin kullanıldığı elektrik ağlarıdır. Akıllı şebekelerin sahip olduğu üstün özelliklerden biri araçtan şebekeye (Vehicle to Grid – V2G) sistemidir. Bu sistemde elektrikli araçların dağıtım ağından enerji alabildiği gibi dağıtım ağına enerjiyi geri vererek dağıtım ağındaki yükün hafiflemesine destek olan bir sistemdir. Bu sistemde elektrikli araç bataryaları, dağıtım ağının özellikle tüketicinin zirve yaptığı saat dilimleri gibi enerji ihtiyacının kritik olduğu durumlarda kullanılabileceği yedek enerji depolama birimi olarak düşünülebilir. V2G sisteminin getirdiği faydalar bazı çalışmalarda detaylı olarak belirtilmiştir [30,46–50]. Bir çalışmada dağıtım ağı operatörünün elektrikli araçlardan enerji alarak dağıtım ağında kullanmak için şarj istasyonu yerleşimi optimizasyonu yaparak gerilim profilini iyileştiren ve maksimum kâr oranı sunan bir yöntem önerilmiştir [46]. [51] nolu çalışmada elektrikli araçların akıllı bir şebekede yapay zekâ ile yönetilmesi önerilmiştir. Akıllı şebekelerde elektrikli araçların aktif olarak kullanılması ve dağıtım ağına entegrasyonu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [48,52–57]. V2G'nin önemli bir parçası olan elektrikli araç sahiplerinin araçlarındaki enerjiyi sisteme satmaları için cazip bir senaryo gerekmektedir [47]. Aksi halde bataryanın düşük seviyelerde de olsa maruz kaldığı yıpranmalar nedeniyle araç sahipleri bu sisteme katılmak istemeyebilirler.

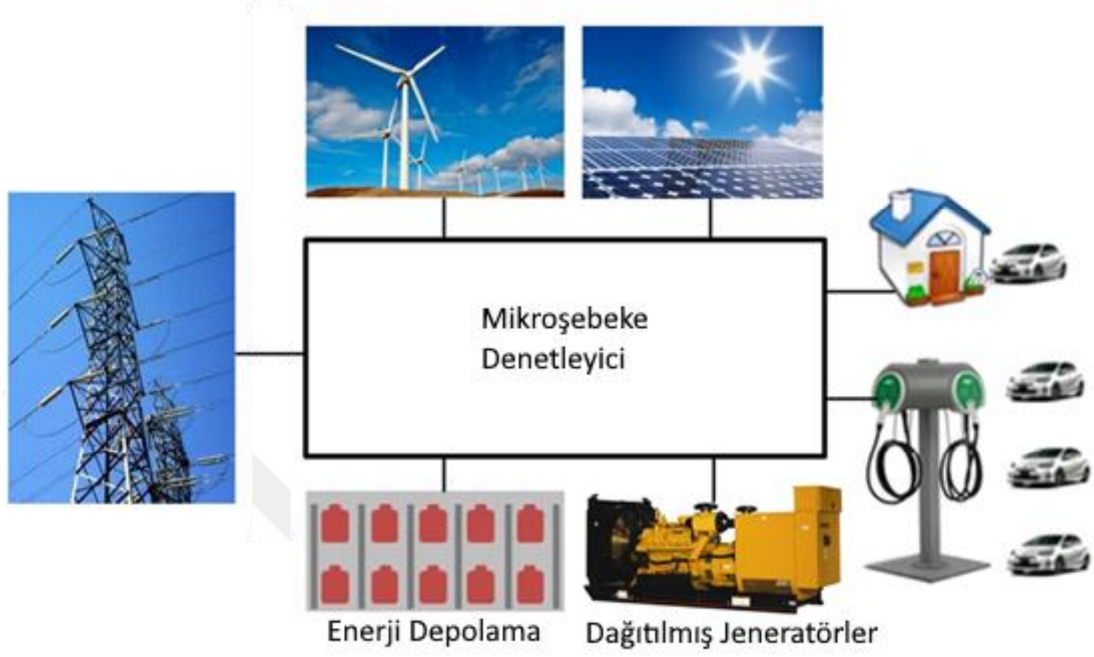
### **Yük tahmini**

Bu alandaki literatür çalışmaları detaylı olarak incelendiğinde elektrikli araçların dağıtım ağına entegrasyonuna yönelik birçok çalışmanın farklı yönleriyle ele alındığı görülmektedir. Bazı çalışmalar dağıtım ağındaki yük tahmini ile ilgilidir [58–61]. Örneğin, [58] nolu çalışmada elektrikli araçların şarj işleminin dağıtım ağına etkisi araştırılmış ve gelecek öngörüsü önerilmiştir. Bazı çalışmalarda dağıtım ağına etki eden yükün tahmini yerine belli bir değer belirlenerek varsayımlar üzerinden hesaplama yapılmıştır [22] [62]. [61] nolu çalışmada gelecek senaryoları oluşturulmuş ve şarj istasyonlarının dağıtım ağlarının güvenilirlik indislerine olan etkileri sunulmuştur [61]. [63] nolu referansta, elektrikli araç şarj istasyonlarının planlanması, şarj talebi tahmini, maliyet minimizasyonu ve dağıtım ağının yük değişiminden faydalanarak gerçekleştirilmiştir.

### **Yenilenebilir enerji**

Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu enerji üretimi sağlamaktadır. Fakat bu kaynakların hava koşullarına bağlı olarak belli aralıklarla ve süreksiz olarak enerji üretmeleri, şebekede operasyon, planlama ve kontrol alanlarında sorunlara yol açabilmektedir [53]. Elektrikli araçların şarj edilmesi bu soruna bir çözüm

olarak kullanılabilir. Örneğin Nissan, Leaf modelini SunPower firmasının, Tesla ise elektrikli aracını SolarCity firmasının sağladığı güneş enerjisi ile şarj ederek bu modele örnek olmuşlardır [64,65].



**Şekil 1.4 :** Elektrikli araçların mikro şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynakları üzerinden şarj olma işlemi.

Elektrik dağıtım ağında uygulanacak sistem ve yönetim iyileştirmeleri ile üretim ve tüketim optimizasyonları elde edilebilir. Şekil 1.4’te elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji kaynakları ile beslenen bir mikro şebeke üzerinden şarj olmaktadır [66]. Ayrıca, enerji depolama, konut enerji tesisatı ve ihtiyaç olduğunda kullanılan jeneratör ile mikro şebeke denetleyicisi enerji yönetimini yerine getirmektedir. Yüksek kurulu güce sahip yenilenebilir enerji santrallerinin dağıtım ağına kademeli ve sorunsuzca entegrasyonu için çok büyük kapasiteye sahip enerji depolama ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır [54]. Bu gibi durumlarda elektrikli araçlar dağıtım ağına bağlandıklarında enerjinin depolanmasında kullanılabilirler. Örneğin, bazı çalışmalarda rüzgâr enerjisi santrallerinde üretilen enerjide yaşanan dalgalanmalara karşı elektrikli araç bataryalarının dağıtık depolama birimi şeklinde kullanılması ve bu gibi yöntemler ile elde edilen avantajlar sıralanmıştır [55,67,68]. Şarj istasyonlarının iş merkezlerinin enerji tüketimine etkisi araştırılmış ve solar enerji ile etkilerin azaltılması üzerine araştırmalar yapılmıştır [69,70]. [71] nolu referansta, elektrikli araç şarj istasyonlarında yenilenebilir enerji kaynaklarının (RES) kullanılmasıyla birlikte yük belirsizliği dokuz senaryoda incelenmiştir. Çalışmaya göre, elektrikli araç şarj

istasyonlarının yeri belirlenmeden önce, istasyon kurulum maliyetini ve ağıdaki güç istikrarsızlığını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynakları ve şarja olan talebin araştırılması gerekiyor.

### **Güç kayıpları**

Elektrikli araçlar, şarj sırasında dağıtım ağından yüksek güç talebi ile aktif güç tüketimine neden olur ve bu da dağıtım sisteminde güç kaybına neden olur. Şarj istasyonları dağıtım ağına etkileri açısından daha uygun noktalara konumlandırılarak ve doğru güç kapasitesi seçilerek, sistemdeki güç kaybı en aza indirilebilir. Bu yüzden, şarj istasyonlarının dağıtım ağına olası etkileri ve bu etkileri azaltmayı öneren birçok çalışma yapılmıştır. Bir çalışmada elektrikli araçların DA hızlı şarj istasyonlarında şarj olmasının dağıtım ağına güç akışı, kısa devre ve koruma açısından etkisi araştırılmıştır [72]. Öte yandan çok sayıda çalışmada güç kaybı ve gerilim profili gibi güçle ilgili parametreler kullanılmıştır. Örneğin, [73] nolu araştırma çalışmasında elektrikli araç şarj istasyonları yerleştirmede güç kaybı, şarj gücü ve maliyet parametreleri kullanılmıştır. Başka bir çalışmada, elektrikli araç şarj istasyonlarını optimum şekilde konumlandırmak için erişilebilirliğin yanı sıra voltaj kararlılığı, güç kaybı, maliyet ve güvenilirlik kullanılmıştır [74]. Potansiyel yerleşim noktalarını optimal, orta veya uygunsuz olarak sıralamak için [75]'de voltaj sapması, işletme maliyeti ve güç kaybı parametreleri kullanılmıştır.

Güç kaybı ve voltaj saptmalarını azaltmak ve şebekenin güvenilirliğini artırmak amacıyla bazı çalışmalarda şarj/deşarj programları ve enerji yönetimi şemalarından da yararlanılmıştır [76–79]. [80]'de güneş enerjili elektrikli araç şarj istasyonları, geliştirilmiş Tavuk sürüsü optimizasyon algoritması kullanılarak güç kaybının da içinde olduğu parametreler dikkate alınarak en uygun şekilde yerleştirilmiştir. [81] nolu referansta, olasılıksal yük modellemesi (PLM) kullanılarak hem elektrikli araç hem de dağıtım sistemi için güç kaybını en aza indirecek bir yöntem önerilmektedir. Yöntemi test etmek için IEEE 33 baralı test sistemi kullanılmıştır. [82]'de, elektrikli araç şarj istasyonu yerleşim probleminin formülasyonunda dağıtım sistemi parametreleri kullanılmış ve problem çözümü için yeni bir metasezgisel algoritma, Levy İyileştirilmiş Zıtlık ve Gradyan Tabanlı Optimizasyon Algoritması (LİZGTOA) önerilmiştir. Referans [83]'te, Gradyan Tabanlı Optimizasyon Algoritması (GTOA) tarafından çözülen amaç fonksiyonuna bir güvenilirlik indeksi ve gerilim sapması dâhil edilmiştir. Referans [84]'te elektrikli araç şarj istasyonları, güç kaybı minimizasyonu ve GKİ kullanılarak konumlandırılmıştır. [85]'de yazarlar beş optimizasyon algoritmasını karşılaştırarak elektrikli araç şarj istasyonları için iki dağıtım sistemindeki en uygun konumu belirlemek için GKİ ile birlikte güç kayıplarını azaltmayı hedeflemişlerdir. Bir çalışmada

yazarlar, dağıtım ağında gerilim sapmasını ve aktif güç kaybını amaç fonksiyonuna dâhil etmiş ve problemi Gri Kurt Optimizasyon algoritması ile Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasını içeren hibrit metodoloji kullanarak çözmüştür [86]. Başka bir çalışmada yazarlar, güç kaybını azaltmak için amaç fonksiyonu belirlemiş ve sonuç olarak maliyetler azalarak sistemin güvenilirliği artmıştır [87].

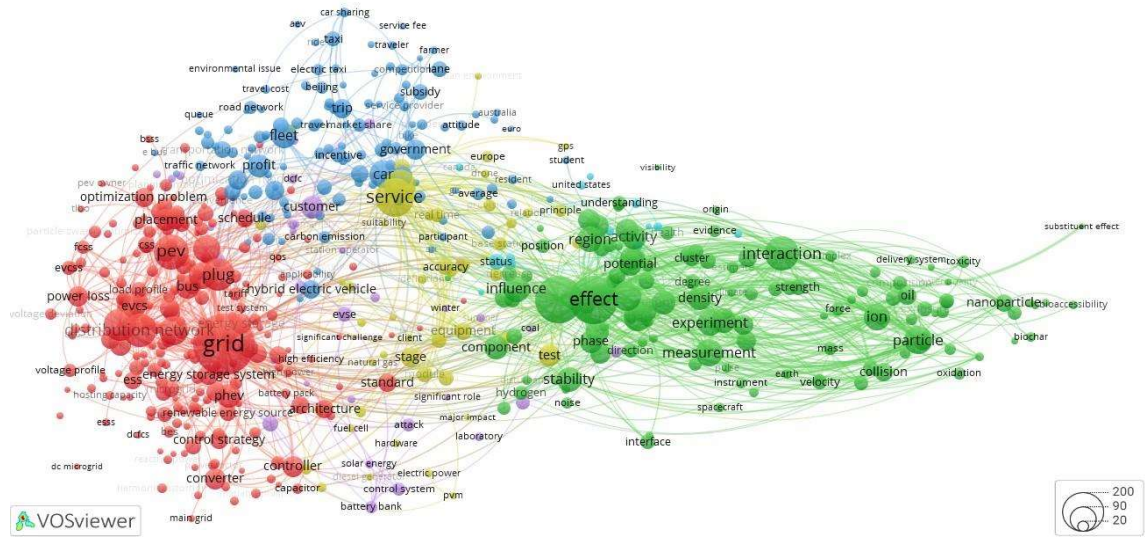
Ayrıca, [17,41,45,88–95] nolu referanslardaki çalışmalar gibi elektrikli araçların şarj edilmesinin dağıtım ağı üzerindeki etkisine odaklanan başka çalışmalar da vardır

### **EAŞİ yerleşiminde kullanılan algoritmalar**

Elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleşimi problemi uzun zamandır çalışılan bir konu olup, problemin çözümü için deterministik yöntemler kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, şarj istasyonu yerleştirme problemi lineer programlama [25,96,97], deterministik olmayan bir polinom (NP) modeli [98], simülasyon tabanlı optimizasyon [99], dinamik programlama [100] ve bulanık yöntemler [27,29,101] gibi analitik yaklaşımlar kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır. Son on yılda, modern ve daha etkili yöntemler kullanılarak daha fazla çalışma yayınlanmıştır. Sezgisel optimizasyon algoritmaları çok sayıda çalışmada kullanılmıştır. Sezgisel algoritmalar, tanımlanmış bir probleme mümkün olan en hızlı şekilde en iyi çözümü bulmaya çalışır. Arama işlemi belirli bir etki alanında gerçekleşir ve bu alan ne kadar küçükse çözüme o kadar hızlı ulaşılabilir.

Özellikle elektrikli araç şarj istasyonları, pil değişim istasyonları ve kapasitör bankalarının yerleştirilmesi gibi problemlerde doğadan ilham alan optimizasyon algoritmaları sıklıkla kullanılmaktadır [102–105]. [102] nolu çalışmada, Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Ateşböceği Algoritması (AA) gibi algoritmalar kullanılarak elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleştirilmesi ile ilgili yayınlar incelenmiştir. Birçok çalışmada, bu optimizasyon algoritmalarının ilgili amaç fonksiyonlarında güç kaybı, gerilim kalitesi ve maliyetler kullanılmıştır. Örneğin, [106]'de, güç kaybı, gerilim düşümü, enerji satış maliyeti ve toplam şarj maliyeti, GA, Genetik Parçacık Sürü Optimizasyonu (GPSO) ve Genetik Emperyalist Rekabet Algoritması (GERA) kullanılarak problem çözülmeye çalışılmıştır. Başka bir araştırmada toplam şarj maliyeti, istasyon maliyetleri, aktif güç kaybı ve GKİ amaç fonksiyonu olarak kullanılmış ve İkili Genetik Algoritma (İGA) kullanılarak çözülmüştür [107]. Hibrit algoritmalar elektrikli araç şarj istasyonları yerleştirme problemlerinde de kullanılmaktadır. Örneğin, Öğretme Temelli Algoritma (ÖTA) ile birlikte hibrit Tavuk Sürü Optimizasyonu (TSO) maliyet, gerilim kararlılığı, güvenilirlik, güç kaybı ve erişilebilirlikten oluşan amaç fonksiyonunu çözmek için kullanılmıştır [74]. Başka bir

çalışmada, hem Kaya Kartalı Optimizasyonu (KKO) hem de Radyal Temel Fonksiyonlu Sınır Ağları (RTFSA) kombinasyonu ile hizmet kalitesi iyileştirilmeye ve maliyet düşürülmeye çalışılmıştır [108]. Bazı çalışmalarda, sistemi daha kararlı ve kendi kendine yeterli hale getirmek için güneş veya rüzgâr enerjisi gibi dağıtık güç (DG) üreten sistemler eklenmiştir [109–112]. Örneğin, DG'leri de içeren dengede olmayan bir radyal dağıtım sisteminde her bir bara için güç kayıpları hesaplanmış ve kayıplar PSO kullanılarak en aza indirilmiştir [113]. Sunulan çalışma ile ilgili 2300'den fazla literatür çalışmasında birbiriyle ilişkili konular ve anahtar kelimeler arasındaki ilişkiler çıkarılmış ve Şekil 1.5'te gösterilmiştir [114].



**Şekil 1.5 :** Literatür çalışmasında birbiriyle ilişkili konular ve anahtar kelimeler arasındaki ilişkiler.

Özellikle 90'lı yıllarda metasezgisel algoritmalar alanında yayınlanan makaleler, günümüzde birçok yayına ve yüzlerce optimizasyon algoritmasına öncülük etmiştir. Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Tabu Arama en iyi bilinen algoritmalar arasındadır [115–117]. Bu alanda birçok çalışma yapılmış ve algorithmadan esinlenilen alanlara göre gruplandırılmıştır. Bunlar evrimsel, fizik tabanlı, sürü tabanlı ve insan tabanlı algoritmalar olarak sınıflandırılabilir [118]. Evrimsel algoritmalar evrim olgusundan ilham alır. Gelecek nesil olası çözümleri oluşturmak için daha iyi aday çözümler bir araya toplanır. Sonuç olarak yeni nesil çözüm setleri eskilerine göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Genetik algoritma, bu kategoriye giren iyi bilinen bir optimizasyon algoritmasıdır. Genetik algoritma, kromozomlar, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik öğeleri ve olayları içerir. Fizik tabanlı algoritmalar, Arşimet Prensipli simüle ederek geliştirilen AOA [119] gibi fizik kurallarından ilham almaktadır. İnsan tabanlı algoritmalar insan davranışlarından ilham alır.

Anne Optimizasyon Algoritması, bir annenin çocukları ile etkileşimine dayanan bir algoritmadır [120]. Sürü tabanlı algoritmalar, karmaşık sorunları çözmek için çeşitli hayvanların biyolojik ve sosyal davranışlarından ilham alır. Bu algoritmalar, hesaplamalı bir optimizasyon yönteminde sürü tabanlı hayvanların av arama ve bulduklarında ava ulaşma davranışlarını taklit eder. PSO, Salp Sürü Algoritması (SSA) ve Balina Optimizasyon Algoritması (BOA), sürü tabanlı algoritmaların örneklerindendir [118,121].

Son on yılda optimizasyon algoritmaları gelişmiş ve sezgisel çözüm yaklaşımları ve sorunlara daha iyi çözümler sağlayan yeni algoritmalar önerilmiştir. Örneğin, Bal Porsuğu Algoritması (BPA), bal porsuğunun davranışlarından ilham alan popülasyon bazlı bir optimizasyon algoritmasıdır [122]. Sinüs Kosinüs Algoritması (SKA), sinüs ve kosinüs fonksiyonlarını kullanarak en iyi çözümü bulmaya çalışır [123]. [124] nolu çalışmada Kelebek Optimizasyon Algoritması (KOA) tanıtılmıştır. Bu algoritma, kelebeklerin üreme ve yiyecek arama davranışlarını taklit eder. [125] nolu çalışmada, Altın Çakal Optimizasyonu (AÇO) adı verilen, doğadan ilham alan bir optimizasyon önerilmektedir. AÇO, özellikle altın çakalların esas olarak avı arayan, çevreleyen ve yakalayan kolektif avlanma alışkanlıklarından esinlenmiştir. BOA, balinaların avlanma yönteminden ilham alınarak geliştirilmiştir. Rezene Tilkisi Optimizasyonu (RTO), rezene tilkisinin kazma ve kaçma davranışından ilham almıştır [126]. [127]'de, başlangıç rastgele çözümlerinin mutasyona uğramış bir lider tarafından güncellendiği Mutasyona Uğramış Lider Algoritması (MLA) önerilmiştir. İki Aşamalı Optimizasyon (TSO), popülasyonun iyi üyelerine göre popülasyon üyelerini güncelleyen bir algoritmadır [128]. Algoritmada popülasyondaki çeşitliliği sağlamak için rastgele yürüyüş gibi aktiviteler kullanılmaktadır. Salp Sürü Algoritması (SSA), [121]'de önerilen sürü tabanlı bir algoritmadır. Bu algoritma, salplerin yön bulma ve avlanma davranışlarından esinlenmiştir. Atomik Yörünge Arama Algoritması (AYAA), kuantum tabanlı atom teorisinin yasalarını kullanan fizik tabanlı bir algoritmadır [129].

Bir teoreme göre (No Free Lunch), belirli bir optimizasyon algoritması bir dizi sorun üzerinde en iyi sonuçları sağlayamaz [130]. Bu nedenle son yıllarda çok sayıda yeni optimizasyon algoritması yayınlanmış ve daha iyi sonuçlar elde etmek için hibrit veya modifiye algoritmalar önerilmiştir. Problemlere hibrit çözüm sağlamaya yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır. Örneğin PSO, AOAPSO [131] adı verilen yeni bir hibrit algoritma geliştirmek için Arayıcı Optimizasyon Algoritması ile birlikte kullanılmıştır. Çeşitli kıyaslama fonksiyonlarında test edilmiştir. Bir çalışmada, BOA ve Modifiye Diferansiyel Evrim (MDE) ile hibrit bir optimizasyon algoritması oluşturulmuştur [132]. Çalışma,

BOA'nın yerel optimum alanlarını, popülasyon çeşitliliğini ve erken yakınsamasını geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bir başka hibrit algoritma ise PSO'yu KOA ile birleştiren HPSOKOA'dır [133]. Bu yaklaşım daha iyi sonuçlar elde etmek için her iki algoritmayı da kullanır.

[134] nolu referansta yazarlar, orijinal AOA yönteminin sömürü aşamasını geliştirmek için trigonometrik operatörleri kullanan yeni bir yaklaşım tanıtmıştır. Yerel optimumlardan kaçınmak için sinüs ve kosinüs fonksiyonları kullanılmıştır. [135,136] nolu çalışmalarda TLBO, çözümleri iyileştirmek ve yakınsama hızını hızlandırmak için değiştirilmiştir. İlk çalışmada tek bir çözümün güncelleme mekanizması değiştirilerek modifikasyon yapılmıştır. İkinci çalışmada popülasyon bireylerinin grup mekanizmaları aşamalar halinde sunulmuştur. Ayrıca başka bir çalışmada Harris Şahini Optimizasyon Algoritması (HŞOA) modifiye edilmiştir [137]. Ortaya çıkan yeni modifiye versiyonda çeşitli güncelleme stratejileri tanıtılmıştır. Başka bir çalışmada, Güve Alevi Optimizasyonu (GAO) algoritması, yerel optimum ve erken yakınsama durumlarını önlemek için değiştirilmiştir [138]. Modifikasyon, yarı-karşıt bir sayı belirleyerek daha iyi bir çözüm bulmayı amaçlayan değiştirilmiş bir dinamik zıt öğrenme (DOL) stratejisi kullanılarak yapılmıştır. KOA'nın modifiye bir versiyonu [139] nolu referansta önerilmiştir. Anahtarlama olasılığı, üssün gücü (a), uyarıcı yoğunluğu (I) ve sensör yöntemi (c) gibi algoritma parametreleri, KOA'nın daha iyi çalışma verimliliği sağlaması için modifiye edilmiştir. Aritmetik Optimizasyon Algoritması, aritmetik operatörlerden ilham alınarak önerilen bir çalışmadır [140]. Bu algoritma, karşıtlık tabanlı öğrenme (OBL) için bir operatör ve sabit bir parametrenin dâhil edilmesiyle değiştirilmiştir [141]. Benzer şekilde, [142–149] çalışmalarda, optimal güç akışı, mobil robot yol planlaması ve santrifüj pompa optimizasyonu gibi çeşitli çalışma alanlarında daha iyi sonuçlar elde etmek amacıyla algoritmalar hibritlenmekte veya iyileştirilmektedir.

Modifikasyon işlemi, algoritmadaki katsayıların ayarlanmasıyla ya da algoritmanın yapısının bölümlerinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilebilir. Modifikasyon, algoritmanın performansını göz önünde bulundurarak daha iyi sonuçlar elde etmeye odaklanır. Optimizasyon algoritmalarının iyileştirilmesine yönelik birçok çalışma olmasına rağmen problem odaklı iyileştirmelerin yapılabileceği öngörülmektedir. Belirli bir problem etrafında algoritmanın değiştirilmesine yönelik çalışmalar yürütülmekte ve nispeten daha iyi sonuçlar elde edilmektedir [75,150–152].

## **Elektrikli otobüsler için şarj istasyonu yerleşimi**

Şarj istasyonlarının yerleşim problemini konu alan pek çok çalışmada, elektrikli araçlar için şarj istasyonu yerleşimi önerilmekte ve araba modelleri üzerinde varsayımlar yapılmaktadır. Normal araçlardan farklı olarak, elektrikli otobüsler çok daha büyük bir bataryaya ve ağırlığa sahiptir. Ayrıca, operasyonel gereksinimler elektrikli otobüsler için çok farklıdır ve hizmetlerin sürekliliği için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle literatür taramasında elektrikli otobüsler ile ilgili çalışmalar ayrıca incelenmiştir. Çoğu çalışma, toplam maliyet analizi, tüketim modellemesi, çizelgeleme, ekipman ve yer seçimi konularına odaklanmıştır. Birçok çalışmada yer seçimi, sosyo-ekonomik, toplu taşıma ve elektrik dağıtım sistemi parametreleri dikkate alınarak yapılmaktadır. [153] nolu çalışmada, karışık tamsayılı doğrusal optimizasyon modeli (KTDO) kullanılarak otobüs güzergâhına kurulabilecek minimum şarj istasyonu sayısı ve otobüsler için pil kapasitesi hesaplanmıştır. Bu çalışmada güzergâh, otobüs tipi, trafik ve diğer faktörlere göre otobüsün enerji tüketimi hesaplanmıştır. Referans [154]'te, şarj istasyonlarının yeri ve kapasitesi ile toplam işletme maliyetleri en aza indirilmiştir. Tüketimin gidilen mesafe ile doğru orantılı olduğu varsayılmıştır. Başka bir çalışmada, toplam maliyeti azaltmak için elektrikli otobüsler için şarj istasyonu sayısı KTDO kullanılarak hesaplanmıştır [155]. [156] referans nolu çalışmada elektrikli otobüs içeren bir filoda otobüslerin nerede şarj edileceğini hesaplayan toplam maliyetler düşürülmüştür. Wang et al.'ın yürüttüğü çalışmada, tüm güzergâhlardaki durakları dolaşacak güç ile şarj istasyonlarının hangi otobüs duraklarına kurulması gerektiği hesaplanmakta ve kurulum maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmıştır [157]. Bu konuda başka çalışmalar da mevcuttur [158–161]. Bu çalışmalar lokasyon ve maliyeti düşürmeye odaklanmış olup, şarj istasyonlarının dağıtım sistemi üzerindeki etkileri çalışmalarda dikkate alınmamıştır.

Elektrikli otobüs şarj istasyonlarının konumlandırılmasının dağıtım ağı üzerindeki muhtemel etkilerini araştıran çalışma sayısı diğer çalışmalara göre daha azdır. Bu çalışmalarda, yazarlar dağıtım ağının kararlılığını sürdürmesine, sağlanan gerilim ve gücün belirli sınırların altına düşmemesine ve transformatörlerin etkin bir şekilde kullanılmasına yardımcı olacak yöntemler önermeye çalışırlar. Örneğin [162] nolu çalışmada, şarj istasyonları ve trafolar için yerler, şarj istasyonlarının trafolar ve elektrikli otobüslerin rotalara atanması gibi kriterler kullanılarak PSO ile maliyetler en aza indirilmiştir. Başka bir çalışmada, elektrikli otobüslerin şarj istasyonu yerleşimi için altyapı, trafik sıklığı ve şarj maliyetleri, güç kayıpları ve gerilim saptması parametreleri kullanılmıştır [163]. Çalışmada tanımlanan çok amaçlı problemin çözümünde basılgın olmayan sıralı genetik algoritma

(NSGA-II) algoritması kullanılmıştır. [164] nolu referansta Wu et al. otobüs işletmesi ile ilgili parametreleri ve dağıtım sistemi parametrelerini birlikte kullanmıştır. Çalışmada şarj istasyonlarının konumlarını ve kapasitelerini optimize etmek için İkili PSO algoritması kullanılmıştır. Yük ve gerilim kısıtlamaları kullanılmış ve şarj istasyonu entegrasyonundan sonraki güç kaybı maliyetleri, toplam maliyet fonksiyonunda kullanılmıştır. Ayrıca maliyet fonksiyonu, yeni dağıtım sistemlerinin kurulmasını da içermektedir.

Clairand et al. elektrikli otobüslerin otobüs durağında şarj edilmesinin etkisini incelemiştir [165]. Çalışmada dağıtım ağı gereksinimleri karşılanırken enerji maliyetlerinin azaltılması da dikkate alınmış ve şarj istasyonlarının sayısını belirlemek için planlama analizi önerilmiştir. Lin et al. şarj istasyonlarının konumunu ve boyutlarını belirlemek için farklı aşamalarda mekânsal-zamansal bir model önermiştir [35]. Hem ulaşım hem de güç sistemleriyle ilgili maliyetler en aza indirilmiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar incelendiğinde EAŞİ'lerinin, dağıtım ağına olası etkilerini azaltmak için bu istasyonların dağıtım ağı üzerinde doğru noktalarda konumlandırılmasının önemi ve gerekliliği daha da artmaktadır.

## 2. TEMEL KAVRAMLAR VE TANIMLAR

### 2.1 Şarj İstasyonları

Elektrikli araçların şarj işlemi alternatif akım (AA) ve doğru akım (DA) ile şarj olarak ikiye ayrılır.

#### 2.1.1 AA şarj istasyonları

Alternatif akım şarjı, güç dağıtım ağındaki elektriğin varsayılan biçimidir. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketleri doğaları gereği doğru akım esasına göre çalışır. Bu yüzden araçtaki batarya paketini şarj etmek için AA şarjının DA'ye dönüştürülmesi gerekir. Bu işlem, araçlardaki yerleşik şarj cihazı ile gerçekleştirilir. Bu şarj cihazları nispeten küçük olup, güç kayıpları ve termal yönetim nedeniyle orta düzeyde dönüşüm sağlar. AA şarj evde veya halka açık şarj istasyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 2.1'de SAE International'ın tanımladığı AA şarj değerleri gösterilmektedir.

**Çizelge 2.1 : SAE International'ın tanımladığı AA standartları.**

| Şarj Yöntemi | Gerilim<br>(AA - V) | Faz   | Maksimum Akım (A) | Maksimum Güç (kW) |
|--------------|---------------------|-------|-------------------|-------------------|
| AA Seviye 1  | 120                 | 1-faz | 12                | 1.44              |
|              |                     |       | 16                | 1.92              |
| AA Seviye 2  | 208 - 240           | 1-faz | $\leq 80$         | <19.2             |

SAE tarafından daha önce AA Seviye 3 için 20 kW üzeri güç, 1-faz veya 3-faz olarak 2011 yılında standart önerilmiş fakat sonlandırılmamıştır [166].

#### 2.1.2 DA şarj istasyonları

DA şarj, AA'dan DA'ya dönüşümün aracın dışında, yani istasyonda gerçekleştirildiği ve akülere doğrudan DA gücünün sağlandığı bir şarj yöntemidir. Bu şarj şekli aracın dışında çok daha büyük DA gücü elde edilebilmesinden dolayı AA şarja göre çok daha hızlıdır ve AA'yı DA'ya dönüştürürken meydana gelen güç kayıpları açısından daha avantajlıdır. Şarj gücüne ve aracın şarj olma hızına bağlı olarak, bir DA şarj istasyonu bir elektrikli aracı yaklaşık 30 dakikada yüzde 0'dan yüzde 80'e kadar şarj edebilir. Hızlı şarj özelliği, EA sürücülerinin uzun mesafeler kat etmesine olanak tanımaktadır. Şarj olma süresini hızlandırmak için birçok ülke 350 kW ve üzeri güç sağlayabilen şarj istasyonlarına yatırım

yapmaktadır. Yüksek hızlı DA şarj istasyonları, şarj esnasında bekleyerek geçirilen süreyi büyük ölçüde azaltır. Dolayısıyla bu şarj yöntemi diğer tüm şarj seçenekleri arasında öne çıkmaktadır.

Elektrikli araç satışlarının her yıl önemli ölçüde arttığı düşünüldüğünde, DA şarj istasyonları sayısının da aynı oranda artacağı öngörülmektedir. Şarj altyapısının yaygınlaşması ve gelişmesi, elektrikli araçların hızla yaygınlaşmasındaki önemli sebeplerden biri olarak gösterilebilir [167]. Çizelge 2.2’de SAE’nin DA şarj istasyonları için tanımladığı DA çıkış gerilimi, maksimum akım ve maksimum güç bilgileri sunulmuştur [168].

**Çizelge 2.2 : SAE International'ın tanımladığı DA standartları.**

| Şarj Yöntemi | DA Çıkış Gerilimi(DA V) | Maksimum Akım (A) | Maksimum Güç (kW) |
|--------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| DA Seviye 1  | 50 - 1000               | 80                | 80                |
| DA Seviye 2  | 50 - 1000               | 400               | 400               |

Elektrikli araçların herhangi bir şarj yöntemi ile şarj olma süreleri bataryanın kapasitesi ve şarj cihazının sağladığı güç ile birebir ilişkilidir. Elektrikli araç üreticileri, tasarladıkları araçların AA ve DA ile şarj olma hızlarını farklı iklim koşullarında sorunsuz çalışacak şekilde belirler.

Dünyada DA şarj istasyonlarına sürekli olarak yatırımlar yapılmaktadır. Buna rağmen, Avrupa’nın birçok noktasında DA şarj istasyonu ihtiyacı bulunmaktadır. İhtiyaçları karşılamak için planlanan yatırımların maliyetinin, 11 yılda 20 Milyar Euro’ya ulaşması tahmin edilmektedir. Bu tutar yaklaşık yıllık 1.8 Milyar Euro’ya denk gelmektedir. Toplam maliyet, Avrupa Birliği’nin yol altyapısı için harcadığı bütçenin %3’üne eşittir [169].

Tesla, “Supercharger” adında şarj ağına sahiptir. 2019 yılında üçüncü versiyon ile şarj hızı 250 kW’a yükselmiştir. Bu versiyonda şarj için sağlanan enerji, başka araçlarla paylaşılmadan, 250 kW şarj gücünde şarj etmektedir. Aralık 2023 itibariyle dünya çapında 50 binden fazla Supercharger kullanıcıların hizmetine sunulmuştur [170].

Günümüzde farklı güç sağlayan DA şarj istasyonları mevcuttur. İstasyonların sağladığı güce göre şarj süresi farklılık göstermektedir. Örneğin, 40 kWh’lik batarya kapasitesine sahip bir elektrik araç için %0’dan %80’e kadar şarj olması için gereken süre aşağıda Çizelge 2.3’te verilmiştir [171].

**Çizelge 2.3 : Şarj türü, gücü ve süreleri.**

| Şarj Türü        | Şarj Gücü       | Süre        |
|------------------|-----------------|-------------|
| Standart Şarj    | 2.3 kW – 7.4 kW | 4-14 saat   |
| Yarı Hızlı Şarj  | 22 kW           | 1.5 saat    |
| Hızlı Şarj       | 40-50 kW        | 30 dakika   |
| Süper Hızlı Şarj | 100-150 kW      | 15 dakika   |
| Ultra Hızlı Şarj | 175-400 kW      | 5-10 dakika |

Elektrikli araçların şarj olma hızları ve süreleri bataryaların ne kadar hızlı doldurulabildiği ile alakalıdır. Son yıllarda batarya teknolojisinde çok büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu sayede çok kısa zamanda çok hızlı şarj olabilen bataryalar geliştirilmiş ve ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Dünya çapında bataryalara verilen ortalama verimlilik garanti süresi yaklaşık sekiz ile on yıl arasındadır. Devam eden batarya çalışmaları, daha yüksek akıma dayanıklı pil kimyaları ile şarj hızını arttırmak konusunda umut vaat etmektedir.

## 2.2 Güç Kaybı

Aktif güç kaybı, elektrikli araç şarj istasyonları dağıtım ağındaki optimum yeri belirlemede en önemli kriterlerden biridir. Her bir hattaki aktif ve toplam güç kaybı Denklem 2.1’de gösterildiği gibi hesaplanabilir:

$$\text{Toplam Güç Kaybı} = \left\{ \sum_{i=1}^{n_{branch}} I_i^2 R_i \right\} \quad (2.1)$$

$I_i$  hat akımı,  $n_{branch}$  hat sayısıdır,  $R_i$  hat direncidir.

## 2.3 Gerilim Sapması

Elektrikli araç şarj istasyonlarının plansız yapılan yerleşimlerinde ciddi boyutlarda gerilim sapsmaları veya düşmeleri yaşanabilir. Bu tür etkileri azaltmak için, problem formülasyonunda bir indeks değeri olarak gerilim sapsmasının dâhil edilmesi, genel güç sisteminin gerilim kalitesini artıracaktır. Böylece gerilim sapsmalarının azaltılması elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleşim problemlerinde olumlu etki oluşturacaktır. Gerilim sapsması Denklem 2.2’deki formül kullanılarak hesaplanabilir. Sonuç yüzde olarak sapsmayı verir;

$$\text{Gerilim Sapsması} = \sum_{i=1}^{n_{bus}} (1 - V_i)^2 \times 100 \quad (2.2)$$

$V_i$  bara gerilimi,  $n_{bus}$  bara sayısıdır.

## 2.4 Gerilim Kararlılık İndeksi (GKİ-VSI)

Şarj istasyonlarının dağıtım ağlarına yerleştirilmesi, gerilim kararlılığını önemli ölçüde etkiler. GKİ, bir sistemin nominal çalışma koşullarını sürdürme ve gerilim dengesizliğine ve kontrol edilemeyen bir gerilim düşüşüne neden olabilecek bir bozulmadan sonra orijinal durumuna geri dönme kararlılığını ifade eder. GKİ, zayıf baraların tespit edilmesine yardımcı olur. GKİ, aktif ve reaktif güç denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. GKİ değerlerinin hesaplanması için [172] nolu referanstaki aşağıda belirtilen 2.3 nolu denklem kullanılmıştır.

$$VSI_{k+1} = |V_k|^4 - 4(P_{k+1}X_k - Q_{k+1}R_k)^2 - 4(P_{k+1}R_k + Q_{k+1}X_k)^2|V_k|^2 \quad (2.3)$$

Bu denklemde  $V_k$  ve  $V_{k+1}$ , k'inci ve k+1'inci bara gerilim değerlerini,  $P_{k+1}$  k+1'inci aktif bara gücünü ve  $Q_{k+1}$  k+1'inci reaktif gücü temsil eder.

### **3. MATERYAL VE METOT**

#### **3.1 Tez Kapsamında Kullanılan Yazılımlar**

DigSILENT PowerFactory yazılımı, dengeli veya dengesiz sistemler için Newton-Raphson tekniği ve doğrusal DA yöntemi gibi yük akışı hesaplama yöntemleri sunan güçlü bir hesaplama programıdır [173]. Tez kapsamında DigSilent yazılımı dağıtım sistemine yük akış analizi uygulamalarında kullanılmıştır. Dengeli ve dengesiz yük akışının yanı sıra yazılım ile güç kayıpları, gerilim kararlılık indeksleri, gerilim düşümü, trafo, hat yüklenmeleri ve sistem simülasyonları gibi birçok hesaplama yapılabilmektedir. Ayrıca, program gelişmiş görselleştirme özellikleri, dağıtım analiz araçları, ağ analizi ve optimizasyon teknikleri barındırmaktadır.

Tez çalışmasında şarj istasyonlarının yerleşiminde optimizasyon algoritmalarının çalıştırılması ve modifiye edilmesi aşamalarında Matlab yazılımı kullanılmıştır. MatLab, mühendislik ve bilim alanlarında sistem ve ürün analizi ve tasarımları için özel olarak tasarlanmış bir programlama platformudur [174]. MatLab hesaplamalı matematiksel ifadelerle izin veren matris tabanlı bir dil olan MATLAB dilini kullanır. Tez çalışmasında, elektriksel etkiyi temsilen yük akış analizi, gerilim kararlılık indeksi, gerilim sapsması ve çevresel ve sosyal etkiyi temsilen nüfus, trafik verileri, çevredeki cazibe noktası sayısı ve arazi maliyeti gibi parametrelerden oluşan indeks ile yerleşim sağlamak için MatLab yazılım dili kullanılmıştır.

Yazılımda optimizasyon algoritmaları parametrelere göre Windows 10 Pro işletim sistemi, Intel Core i5-6400T işlemci ve 8 GB belleğe sahip bir bilgisayar kullanılarak optimize edilmiştir.

#### **3.2 Tez Kapsamında Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları**

Bu tez çalışmasında elektrikli araç şarj istasyonları yerleşim problemi ve mühendislik problemlerinde kullanılmak üzere farklı test sistemlerinde probleme özgü optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Aşağıdaki bölümlerde tez kapsamında kullanılan optimizasyon algoritmaları yer almaktadır.

### 3.2.1 Arşimet optimizasyon algoritması

AOA, Arşimet prensibinden ilham alan bir optimizasyon algoritmasıdır. Bir nesne bir sıvıya daldırılır ve kaldırma kuvveti tarafından yukarı itilir. Bu kuvvet, yer değiştiren sıvının kütlesine eşittir. Bu yaklaşıma göre, sıvıya daldırılan her cisim denge durumunda olmaya çalışır. Bu durumda cismin kaldırma kuvveti ve ağırlığı eşittir. Bu durum Denklem 3.1'de sunulmuştur. 3.1-3.13 nolu denklemler [119] nolu referanstan alınmıştır.

$$F_b = W_o, \quad p_b v_b a_b = p_o v_o a_o \quad (3.1)$$

Burada  $F_b$  kaldırma kuvveti,  $W_o$  cismin ağırlığı,  $v$  hacim,  $p$  yoğunluk,  $b$  sıvıyı,  $o$  daldırılan nesneyi ve  $a$  ivmeyi veya yerçekimini göstermektedir.

AOA'da, batık nesneler bir popülasyon oluşturur. İlk arama, çoğu optimizasyon algoritmasında yaygın bir uygulama olan rastgele değerlerle gerçekleştirilir. Her iterasyon için yoğunluk ve hacim değerleri, algoritmanın bitiş kriterleri karşılanana kadar güncellenir. AOA'da uygulanan dört adım şu şekilde sıralanabilir:

Adım 1: Denklem 3.2'deki gibi nesnelerin değerleri rastgele atanır.

$$O_i = lb_i \times rand \times (ub_i - lb_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.2)$$

Burada  $N$  popülasyon,  $O_i$   $N$ 'deki  $i$ . nesne,  $lb_i$  alt sınır ve  $ub_i$  üst sınırdır. Hacim ( $vol$ ) ve yoğunluk ( $den$ ) değerleri, Denklem 3.3'teki gibi rastgele başlatılır. Hızlanma ( $acc_i$ ) Denklem 3.4'teki gibi başlatılır. [119].

$$den_i = rand; \quad vol_i = rand \quad (3.3)$$

$$acc_i = lb_i + rand \times (ub_i - lb_i) \quad (3.4)$$

Adım 2: Yoğunluk ve hacim Denklem 3.5 ile güncellenir.

$$den_i^{t+1} = den_i^t + rand \times (den_{best} - den_i^t); \quad vol_i^{t+1} = vol_i^t + rand \times (vol_{best} - vol_i^t) \quad (3.5)$$

burada  $den_{best}$  ve  $vol_{best}$  en iyi hacim ve yoğunluk değerleridir.

Adım 3: Transfer operatörü ( $TF$ ) artırılırken yoğunluk faktörü azaltılır. Bu, çarpışmalardan sonra denge durumu ile fazlar (keşif-sömürü) arasında geçişi sağlar. Bu, Denklem 3.6 ile gerçekleştirilir.

$$TF = \exp\left(\frac{t - t_{max}}{t_{max}}\right) \quad (3.6)$$

Burada  $t$  iterasyon sayısını gösterir.  $t_{max}$  maksimum iterasyon sayısıdır. Yoğunluk azaltan faktör  $d$ , Denklem 3.7 kullanılarak zamanla azalır.

$$d^{t+1} = \exp\left(\frac{t_{max}-t}{t_{max}}\right) - \left(\frac{t}{t_{max}}\right) \quad (3.7)$$

Adım 4: Keşif aşaması: Bu adımda  $TF$  değerine göre çarpışmalar meydana gelir. Nesnenin ivmesi ( $acc_i$ ), Denklem 3.8 ile güncellenir.

$$acc_i^{t+1} = \frac{den_{mr} + vol_{mr} \times acc_{mr}}{den_i^{t+1} \times vol_i^{t+1}} \quad (3.8)$$

$den_i$  yoğunluğu ve  $vol_i$  hacmi temsil eder.  $acc_i$ ,  $i$  nesnesinin ivmesini,  $mr$  ise rastgele değerleri gösterir.

Adım 5: Sömürü aşaması:  $TF$  değerine bağlı olarak çarpışma gerçekleşmez. Bu durumda, cismin ivmesi Denklem 3.9 ile güncellenir.

$$acc_i^{t+1} = \frac{den_{best} + vol_{best} \times acc_{best}}{den_i^{t+1} \times vol_i^{t+1}} \quad (3.9)$$

Burada  $acc_{best}$  en iyi hızlanma değeridir.

Adım 6. İvmenin normalleştirilmesi adımı: Bu adımda, çözümün global minimumdan uzak olduğu durumlarda ivme çok fazladır ve diğer durumlarda ise zamanla azalır. Bu nedenle,  $acc_{i,norm}^{t+1}$  her nesne için adım boyutunun değişimini ayarlar. Bunun için Denk. 3.10 kullanılır.

$$acc_{i-nor}^{t+1} = u \times \frac{acc_i^{t+1} - \min(acc)}{\max(acc) - \min(acc)} + l \quad (3.10)$$

Burada  $u$  ve  $l$  üst ve alt değerlerdir.

Adım 7: Güncelleme adımı. Bu adımda pozisyonlar güncellenir.

Eğer  $TF$  0.5'ten küçük veya eşitse (keşif aşaması) Denklem 3.11 kullanılır.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + C_1 \times rand \times acc_{i-norm}^{t+1} \times d \times (x_{rand} - x_i^t) \quad (3.11)$$

Burada  $C_1$ , 2'ye eşittir.  $TF$ , 0.5'ten büyükse, sömürü aşaması çalıştırılır. Nesne konumları Denklem 3.12 kullanılarak güncellenir.

$$x_i^{t+1} = x_{best}^t \times F \times C_2 \times rand \times acc_{i-norm}^{t+1} \times d \times (T \times x_{best} - x_i^t) \quad (3.12)$$

Burada  $C_2=6$ .  $T = C_3 \times TF$ .  $T$  zamanla  $[C_3 \times 0.3, 1]$  aralığında artar.  $F$ , Denklem 3.13'ün yönünü değiştirmek için kullanılan bayrak parametresini gösterir.

$$F = \begin{cases} +1 & \text{if } P < 0.5 \\ -1 & \text{if } P > 0.5 \end{cases} \quad (3.13)$$

Adım 8: Değerlendirme adımı. Bu adımda uygunluk fonksiyonu değerlendirilir. Daha iyi bir sonuç bulunursa hatırlanır.

### 3.2.2 Bal porsuğu algoritması

AOA'daki beş sabit değer optimizasyonu için Bal Porsuğu Algoritması (BPA) kullanılır. Bu algoritmanın etkinliği, CEC 2017 test paketi ve standart kıyaslama işlevleri üzerinde test edilmiştir. Ayrıca BPA, mühendislik problemlerinde test edilmiş ve test sonuçları, BPA

algoritmasının karmaşık problemlerin çözümünde etkili olabileceğini göstermektedir. Buna ek olarak, yakınsama hızı ve keşif ile işletme aşamaları arasındaki denge açısından BPA iyi bir performans sergilemektedir. Bu nedenle, AOA'nın parametrelerini bulmak için BPA'dan yararlanılmıştır.

Bu algoritma popülasyon tabanlıdır ve bal porsuğunun akıllı yiyecek arama davranışından ilham almıştır [35]. Besin kaynağını, koklayarak ve kazarak ya da onları bala yönlendiren bir kuşu takip ederek bulur. Yazarlar ilk aşamayı kazma aşaması olarak tanımlamaktadır. Bu aşamada koku alma yoluyla avın yaklaşık konumu belirlenir ve kazı yapmak ve ava ulaşmak için uygun bir yer seçilir. İkinci aşama bal modudur ve bu aşamada balın kaynağını bulmak için rehber kuş takip edilir. Matematiksel ifade aşağıda açıklanmıştır:

Popülasyon, aşağıdaki Denklem 3.14 ve 3.15'teki matriste temsil edilen bal porsuklarından oluşur.

$$\text{Aday çözüm kümesi} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nd} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\text{Bal porsuğunun } i. \text{ lokasyonu } x_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^d] \quad (3.15)$$

Algoritmanın adımları aşağıdaki gibidir. 3.14-3.21 nolu Denklemler referans [122]'den alınmıştır.

Adım 1: Başlatma. Uygunluk değerlendirme sonuçları Denklem 3.16 kullanılarak matrise kaydedilir.

$$x_i = lb_i + rand \times (ub_i - lb_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.16)$$

$N$  popülasyonu,  $x_i$  ise  $i$ . bal porsuğudur.

Adım 2: Yoğunluğun tanımlanması.  $I_i$  koku yoğunluğunu gösterir. Daha yüksek yoğunluk, daha hızlı harekete yol açar.  $I_i$  Denklem 3.17 ile tanımlanır.

$$I_i = rand \times \frac{S}{4 \pi d_i^2} \quad (3.17)$$

$$S = (x_i - x_{i+1})^2 \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$d_i = x_{prey} - x_i$$

Burada  $d_i$ ,  $i$ . bal porsuğu ile av arasındaki mesafedir.  $S$ , kaynağın gücüdür.

Adım 3: Yoğunluk faktörünün güncellenmesi. Azalan faktör  $\alpha$  Denklem 3.18 ile güncellenir.

$$\alpha = C \times \exp\left(\frac{-t}{t_{max}}\right) \quad (3.18)$$

Burada  $C$  sabit ve 1'den büyüktür.  $C$ 'nin varsayılan değeri 2'dir.

Adım 4: Yerel optimumdan kurtulma.  $C$ , arama yönünü değiştiren değeri temsil eder.

Adım 5: Konumların güncellenmesi. Bu adım iki bölümden oluşur: Kazma aşaması ve bal fazı. İlk aşama Denklem 3.19 ile gösterilmiştir.

$$x_{new} = x_{prey} + F \times \beta \times I \times x_{prey} + F \times r_3 \times \alpha \times d_i \times |\cos(2\pi r_4) \times [1 - \cos(2\pi r_5)]| \quad (3.19)$$

$F$  yön değiştiren bayraktır. Değeri Denklem 3.20 ile belirlenir.

$$F = \begin{cases} +1 & \text{if } r_6 < 0.5 \\ -1 & \text{else} \end{cases} \quad (3.20)$$

Bal fazı Adım 5'in ikinci aşamasıdır. Denklem 3.21, bal bulmak için bal rehberi kuşunun takip edildiği durumu simüle eder.

$$x_{new} = x_{prey} + F \times r_7 \times \alpha \times d_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.21)$$

Burada  $x_{new}$ , bal porsuğunun güncellenmiş konumudur.  $x_{prey}$ , yiyeceğin/avın yerini gösterir.  $\alpha$  ve  $F$  formülleri 3.18 ve 3.20 nolu denklemlerde sunulmuştur.

Sistem parametreleri ve başlangıç konumları rastgele belirlenir. Uygunluk fonksiyonu her bal porsuğu için ayrı hesaplanır.  $x_{prey}$ 'in en iyi konumu hatırlanır ve  $x_{prey}$ 'e uygunluk değeri atanır. Azalan faktör  $\alpha$ , güncellenir. Daha sonra,  $I_i$  hesaplanır.  $x_{new}$ 'in konumları, Denklem 3.19 veya Denk. 3.21'e göre rastgele belirlenir. Güncellenen pozisyonlar değerlendirilir ve  $f_{new}$ 'e atanır. Bu adımlar, bitiş kriterleri sağlanana kadar tekrarlanır. En iyi uygunluk değerine karşılık gelen bal porsuğu pozisyonları seçilir.

### 3.2.3 Altın çakal algoritması

Bu algoritma, altın çakal hayvanının avlanma yeteneğinden ilham almıştır. Av sırasında altın çakal etrafı arar ve ava yaklaşır. Hareket etmeyi bırakana kadar avını kuşatıp zayıflatır ve avına doğru saldırıya geçer. Diğer birçok sezgisel algoritma gibi, başlangıç aşamasında çözüm de düzgün bir dağılıma sahiptir. Başlangıç çözümü Denklem 3.22'de sunulmaktadır. 3.22-3.34 nolu denklemler [125] referanstan alınmıştır.

$$Y_0 = Y_{min} + rand(Y_{max} - Y_{min}) \quad (3.22)$$

Burada  $Y_{min}$  and  $Y_{max}$  alt ve üst limitleri,  $rand$  ise 0 ile 1 arasında rastgele bir vektörü temsil etmektedir.  $Prey$  ( $av$ ) matrisi Denklem 3.23'te verilmiştir.

$$Prey = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nd} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Burada  $n$  toplam av sayısını,  $d$  değişken sayısını,  $Y_{ij}$  ise  $i$ . avın  $j$ . boyutunu ifade etmektedir. Her bir av için hesaplanan uygunluk değerleri ile oluşturulan matris Denklem 3.24'da verilmiştir.

$$F_{OA} = \begin{bmatrix} f(Y_{11}; Y_{12}; \dots; Y_{1d}) \\ \vdots \\ f(Y_{n1}; Y_{n2}; \dots; Y_{nd}) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Burada  $f$  amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. Av, erkek çakalın önderliğinde gerçekleşir. Avlara göre güncellenen konumlar Denklem 3.25 ile gösterilmiştir.

$$Y_1(t) = Y_M(t) - E \cdot |Y_M(t) - rl \cdot Prey(t)| \quad (3.25)$$

Burada  $Y_M$  erkek çakalın mevcut konumunu,  $Prey(t)$  avın konumunu ve  $rl$  ise rastgele sayılardan oluşan bir matrisi göstermektedir. Dişi çakalın avlandığı güncel konum ise Denklem 3.26'de verilmiştir.

$$Y_2(t) = Y_{FM}(t) - E \cdot |Y_{FM}(t) - rl \cdot Prey(t)| \quad (3.26)$$

Avın kaçma enerjisi Denklem 3.27-3.28'de belirtilmiştir.

$$E = E_1 \times E_0 \quad (3.27)$$

Burada  $E_0$  başlangıç durumu ve  $E_1$  avın azalan enerjisidir.  $E_0$  and  $E_1$  Denklem 3.28 ve 3.29'da sunulmuştur.

$$E_0 = 2 \times r - 1 \quad (3.28)$$

$$E_1 = c \times \left(1 - \left(\frac{t}{T}\right)\right) \quad (3.29)$$

Burada  $r$ , 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır,  $t$  mevcut iterasyon sayısıdır.  $T$  maksimum iterasyon ve  $c$  sabit bir sayıdır.  $rl$ 'nin hesaplanması Denklem 3.30'da sunulmuştur.

$$rl = 0.05 \times LF(y) \quad (3.30)$$

Denklemdaki  $LF(y)$  Levi uçuş fonksiyonunu temsil eder ve Denklem 3.31 ve 3.32'deki formüllerle hesaplanır.

$$LF(y) = 0.01 \times (\mu \times \sigma) / \left| v^{(\frac{1}{\beta})} \right| \quad (3.31)$$

$$\sigma = \left( \frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) \times \beta \times 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.32)$$

Burada  $u$ ,  $v$  0 ile 1 arasında rastgele sayılardır,  $\beta$  sabittir ve 1.5'e eşittir. Denklem 3.33, Denklem 3.25 ve 3.26'nın ortalaması alınarak elde edilir.

$$Y_1(t+1) = \frac{Y_1(t) + Y_2(t)}{2} \quad (3.33)$$

Av çakalların saldırısına uğradığında kaçma enerjisi düşer. Daha sonra bir çift çakal avın etrafını sarar. Daha sonra çakallar ava saldırır ve onu yemeye başlar. Bu durum matematiksel olarak Denklem 3.34 ve 3.35'deki gibi modellenmiştir.

$$Y_1(t) = Y_M(t) - E \cdot |rl \cdot Y_M(t) - Prey(t)| \quad (3.34)$$

$$Y_2(t) = Y_{FM}(t) - E \cdot |rl \cdot Y_{FM}(t) - Prey(t)| \quad (3.35)$$

AÇO optimizasyon sürecinde önerilen erkek ve dişi çakal çifti, AÇO'nun her iterasyonda bulunan en iyi çözümleri korumasına yardımcı olurken, rastgele parametreler  $E$  ve  $rl$ , en iyi çözümün rastgele aranmasına yardımcı olur. Ek olarak, önerilen arama stratejisi aday çözümlerin avın uygun konumunu bulmasına olanak tanır.  $E_1$  ve  $E$ 'nin uyarlanabilir değerleri, keşif ve sömürünün gerçekleşmesini sağlar. AÇO algoritmasının ayarlanması gereken yalnızca iki parametresi vardır:  $rl$  parametresi ve isteğe bağlı  $E$  parametresi.

### 3.3 Tez Kapsamında Modifiye Edilen Optimizasyon Algoritmaları

Bu tez çalışmasında şarj istasyonları yerleşim probleminde kullanılmak üzere özgün bir optimizasyon algoritmasının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda literatür çalışmasında örnekleri verilen araştırmalarda bir optimizasyon algoritması belli bir probleme özgü modifiye edildiğinde daha etkin sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle modifiye edilebilecek parametrelere sahip algoritmalar araştırılmıştır.

Metasezgisel algoritmalar, kesin bir çözüm bulmak yerine belli bir süre içinde en iyi çözümü bulmaya çalıştıkları için, AOA algoritmasının yazarları, algortmada kullanılan bazı parametrelerin yapılandırılması konusunda duyarlılık analizleri yapmışlardır. Yazarlar, belirledikleri değerlerin dışında probleme göre farklı değerlerin de çözüm ürettiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, AOA'nın performansının geliştirilebileceği değerlendirilmiştir. AOA'nın modifiye edilmesi işlemi için iki farklı yöntem uygulanmıştır. İlk yöntemde parametre optimizasyonu yapılmıştır (MAOA). İkinci yöntemde ise parametre optimizasyonu ile beraber boyut genişletme (DL-Dimension Learning) stratejisi uygulanmıştır (MDAOA).

#### 3.3.1 AOA'nın parametre optimizasyonu ile modifiye edilmesi (MAOA)

Bu çalışmada, standart AOA'da kullanılan sabit parametrelerden beş tanesi farklı bir optimizasyon algoritması olan BPA ile optimize ederek belirli bir mühendislik problemini çözmek için AOA algoritmasının performansının artırılması amaçlanmıştır. Algoritmadaki  $C_3$ , ve  $C_4$  değerleri, CEC ve Mühendislik problemleri için farklı diğer problemler için farklı

değerler almıştır. AOA makalesinde, CEC 2017 test fonksiyonlarından üçü seçilerek duyarlılık analizi yapılmıştır. Farklı durumlar için sabit parametreler değiştirilerek elde edilen kısmi sonuçlar Çizelge 3.1'de verilmiştir [119].

**Çizelge 3.1 :** Parametre değerleri için duyarlılık analizi.

| Senaryolar | Parametre değerleri |       |       |       | Maliyet fonksiyonu değeri |          |          |
|------------|---------------------|-------|-------|-------|---------------------------|----------|----------|
|            | $C_1$               | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $f5$                      | $f12$    | $f26$    |
| 21         | 2                   | 6     | 1     | 0.5   | 8.00E+02                  | 5.55E+08 | 1.17E+04 |
| 22         | 2                   | 6     | 1     | 1     | 9.51E+02                  | 7.96E+09 | 9.98E+03 |
| 23         | 2                   | 6     | 2     | 0.5   | 7.56E+02                  | 8.62E+06 | 7.13E+03 |
| 24         | 2                   | 6     | 2     | 1     | 7.85E+02                  | 7.33E+07 | 9.92E+03 |

Çalışmada verilen sabit değerlere ek olarak optimizasyon probleminin zorluğu ve doğası gereği farklı değerlerin denenebileceği de belirtilmektedir [119]. Varsayılan parametreleri çalıştırarak, algoritmalar optimizasyonda iyi performans gösterir, ancak parametreleri belirli bir soruna uyarlamak daha iyi çözümler getirir. Örneğin, [150]'da AOA'nın yapısı, OPF problemini çözmek için popülasyon çeşitliliğini artırmak için değiştirilmiştir. Bu nedenle, bir algoritmanın belirli parametreleri veya yapısının bir kısmı, etkinliği artırmak için değiştirilebilir. Optimum parametreleri bulmak, başka bir optimizasyon algoritması kullanılarak yapılabilir. Bu, yüksek hesaplama maliyetine neden olacaktır, çünkü arama alanı çok geniştir ve optimizasyon algoritmasının parametrelerde ince ayar yapmak için sürekli olarak yeni değerleri değiştirmesi ve denemesi gerekir. Bu işleme her bir spesifik problem türü için yalnızca bir kez ihtiyaç duyulduğundan, modifiye optimizasyonun daha sonra çalıştırılması, hesaplama süresi ve karmaşıklık açısından farklılık göstermez. Yeni parametreler bulunduktan sonra, alt ve üst limitlerin belirlediği etki veya arama alanı dışında orijinal algoritmanın yapısına dokunulmadan yeni bir modifiye algoritma oluşturulmuştur.

Etki veya arama alanı, olası çözümlerin güncel değerlerinin alt ve üst sınırlar içinde olmasını sağlar. Alt sınırın altındaysa, alt sınır değeri yeni bir değer olarak ayarlanır. Benzer bir kontrol üst sınır için de geçerlidir. Aralık dışı değerleri kontrol eden kod, tüm çözüm kümesi yerine her bir boyut ayrı ayrı güncellenecek şekilde değiştirilmiştir.

Algoritma 3.1, önerilen Modifiye Arşimet Optimizasyon Algoritmasının sözde kodunu göstermektedir.

Bu çalışmada,  $C_3$  ve  $C_4$  değerlerine ek olarak, Bölüm 3.2.1'de sunulan AOA'nın üç sabit olasılık değeri modifiye edilmiştir. Bunlardan ilki  $p_1$ ,  $TF$  parametresi (çarpışma) ile karşılaştırılan olasılık değeridir. İkincisi  $p_2$ , yön değiştirme bayrağı ile karşılaştırılan olasılık değeridir. Üçüncüsü ise  $p_3$ , Adım 5'te  $TF$  değerini 0.5 ile karşılaştırmak için kullanılan değerdir.

---

**Algoritma 3.1 : Önerilen Modifiye AOA(MAOA)'nın sözde kodu.**

---

```
Parametreleri tanımla;
obj_functionHBA değerini AOA'ya eşitle;
BPA(obj_functionHBA, ubHBA, lbHBA, tmaxHBA, NHBA) fonksiyonunu çalıştır
    obj_functionAOA değerini Load Flow 'a eşitle;
    C3, C4, p1, p2, p3 karar değişkenlerini tanımla;
    AOA(obj_functionAOA, ubAOA, lbAOA, tmaxAOA, NAOA, C3, C4, p1, p2, p3)
fonksiyonunu çalıştır
    Load Flow (index of buses) fonksiyonunu çalıştır
    Ağırlık katsayılarını tanımla wi=; i=1,2,3;
    Denk 1 ile güç kaybını hesapla
    Denk 1 ile Gerilim sapmasını hesapla
    Denk 1 ile Gerilim kararlılık indeksini hesapla
    GKİmin = min(GKİi); i=1,2,...nbus;
    index_Ploss=(w1 x PLoss);
    index_VDev=(w2 x VDev);
    index_GKİmin=(w3 / GKİmin);
    evindex= index_Ploss + index_VDev + index_GKİmin;
    evindex'i getir;
    matristeki baralar için minimum uygunluk değerini getir
    C3, C4, p1, p2, p3 parametreleri için en iyi değerleri getir;
    AOA'daki C3, C4, p1, p2, p3 parametrelerinin yeni değerlerini MAOA'ya entegre et
    j'nin her bir değeri için j=1,2,...ndim
        eğer değer alt sınırdan düşük ise
            update position (i,j) = lower_bound; i=1,2,...nbus
        elseif eğer değer üst sınırdan yüksek ise
            update position(i,j) = upper_bound; i=1,2,...nbus
        end
    end
    MAOA(obj_functionAOA, ubAOA, lbAOA, tmaxAOA, NAOA)'yı yeni değerler ve sınırlar ile getir
    en iyi sonuçlarına tekabül eden çözümleri (bara indekslerini) getir
```

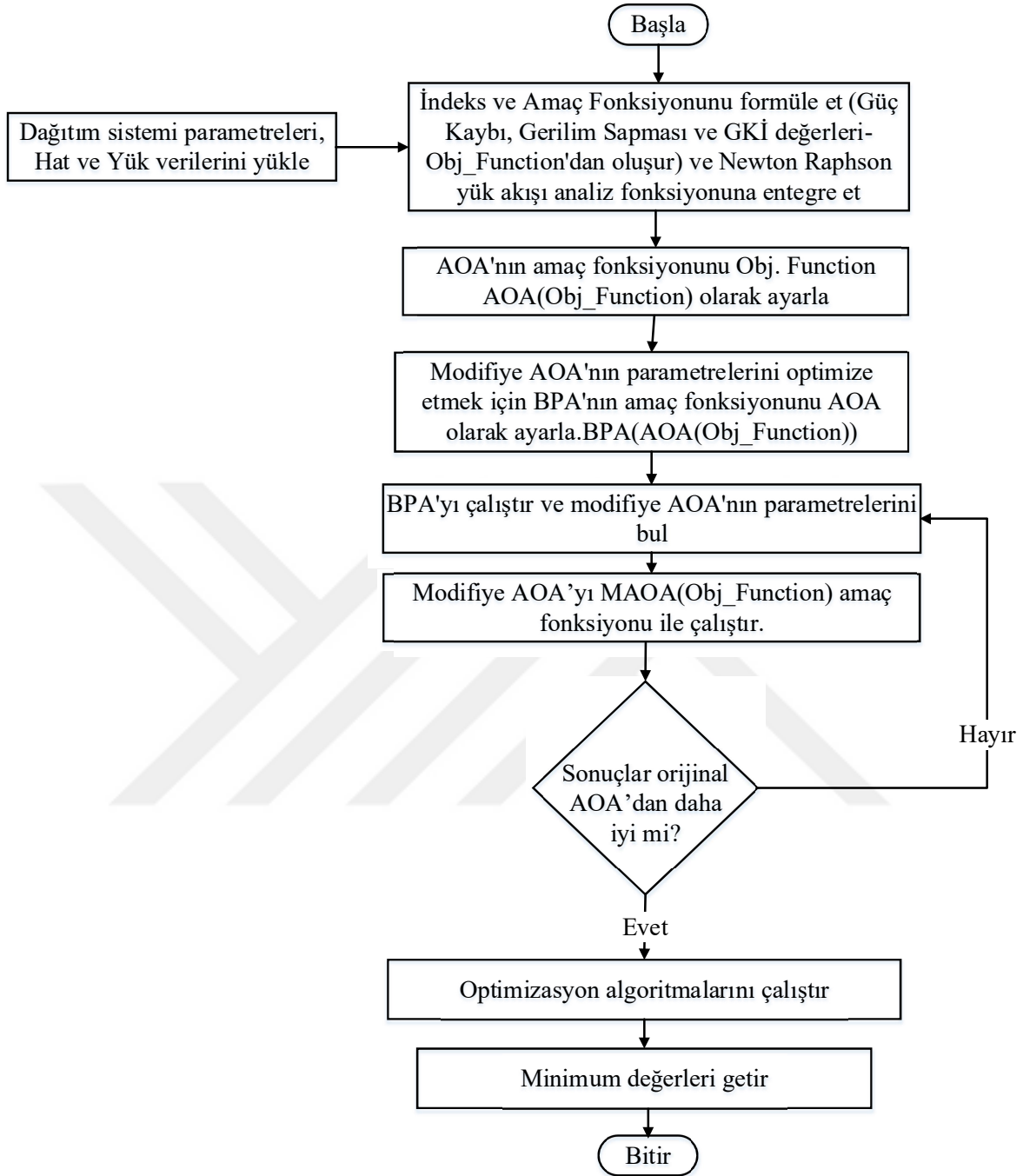
---

Bu değerler BPA kullanılarak alt ve üst limitler belirlenerek optimize edilmiştir. Elektrikli araç şarj istasyonlarının optimum yerleşimi için geliştirilen amaç fonksiyonu için parametrelerin orijinal değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2 : Parametrelerin orijinal değerleri.**

|                | Orijinal AOA                   |                                     |
|----------------|--------------------------------|-------------------------------------|
|                | CEC ve Mühendislik problemleri | Standart Optimizasyon Fonksiyonları |
| C <sub>3</sub> | 2                              | 1                                   |
| C <sub>4</sub> | 0.5                            | 2                                   |
| p <sub>1</sub> |                                | 0.5                                 |
| p <sub>2</sub> |                                | 0.5                                 |
| p <sub>3</sub> |                                | 0.5                                 |

AOA parametrelerini optimize eden yöntemin akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Önerilen MDAOA'nın akış diyagramı.

### 3.3.2 AOA'nın boyut genişleme ve parametre optimizasyonu ile modifiye edilmesi (MDAOA)

Bu bölümdeki çalışma, AOA'nın elektrikli araç şarj istasyonu yerleşimi problemi ve farklı mühendislik problemlerdeki performansını arttırmayı amaçlamaktadır. AOA algoritması sade ve ölçeklenebilir bir algoritmadır. AOA'nın kontrol seçenekleri nispeten azdır. AOA

algoritması karmaşık test fonksiyonları üzerinde test edilmiş ve diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir[119].

Ayrıca keşif ve sömürü dengesi açısından etkin bir yapıya sahiptir. Aramanın keşif aşamasında bilinmeyen alanlarda yeni çözümler aranır. Sömürü aşamasında, algoritmalar yakınlarda hâlihazırda bulunan çözümleri arar. Bu sayede uygunluk değeri artmakta ve daha doğru çözümler elde edilmektedir. İki aşama arasındaki denge, algoritmanın başarısını önemli ölçüde artırır.

Bu nedenle AOA'nın etkinliğini daha da artırmak için algoritmanın bir kısmı ve bazı parametreler, probleme özgü çözümler üretmek için değiştirilmiştir. Nesnelerin potansiyel konumları, [175,176]'da verilen DL stratejisi kullanılarak optimize edilmiştir. Ayrıca katsayıların hesaplanmasında BPA optimizasyon algoritması kullanılmıştır.

[119]'de AOA yazarları algoritmayı en yeni ve iddialı optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırmıştır. AOA'nın standart, CEC kıyaslama fonksiyonlarına ve mühendislik problemlerinde çok iyi çözümler sağlayabildiği kanıtlanmıştır. Bununla birlikte, kıyaslama fonksiyonları aracılığıyla dikkatli bir şekilde analiz edilip test edildiğinde, popülasyon çeşitliliğinin artırılabilceği ve bunun da keşif ve sömürü arasında gelişmiş bir dengeye ve daha kesin çözüm kümesine yol açabileceği gözlemlenmiştir. Modifikasyonu gerçekleştirmek için iki adım uygulanır: Belirli bir mühendislik problemini çözmek için, boyut öğrenmeye dayalı stratejinin uygulanması ve farklı bir optimizasyon algoritması olan BPA ile orijinal AOA'da kullanılan önceden belirlenmiş beş parametreyi modifiye ederek nesnelerin aday konumlarının optimize edilmesi.

#### **İyileştirilmiş AOA (Improved AOA-IAOA)**

IAOA'da, nesnenin konumunu daha iyi bir konuma güncellemek için her iterasyonun iki stratejisi vardır: Boyut öğrenmeye dayalı (DL) ve standart AOA arama stratejileri [150].

Orijinal AOA'da, Bölüm 3.3.1'de verilen 4'ten 7'ye kadar olan adımlar, arama ve işletme aşamalarını dengelemek için kullanılır. IAOA'da, keşif ve sömürü dengesi, [175,176]'ye benzer şekilde DL tabanlı strateji ile iyileştirilir.

DL stratejisi, her nesne için komşuluk oluşturmak üzere farklı bir yöntem kullanır. Bu yaklaşıma göre komşuluk verileri nesneler arasında iletilebilir. DL stratejisi dört aşamadan oluşur.

#### **Başlatma Adımı**

$N$ , nesnelerin popülasyonudur. Denklem 3.36 ile rastgele dağıtılırlar.

$$X_{ij} = l_j + frnd_j[0,1] \times (u_j - l_j), \quad i \in [1, \dots, N], \quad j \in [1, \dots, D] \quad (3.36)$$

$D$  boyuttur.  $X_i(t)$ , iterasyon  $t$  için  $i$ 'inci batırılan nesnenin konumunu temsil eder.

### Hareket/aktarma Adımı

Boyut öğrenme stratejisinde, her bir nesne,  $X_i(t)$  için yeni bir konum aday olmak üzere çevredeki nesneler tarafından yeniden konumlandırılır.

Nesnelerin yeni konum boyutları Denklem 3.37 ile hesaplanır. İlk olarak, mevcut ve aday pozisyonlar arasındaki alan Denklem 3.37 ile hesaplanır [175,176].

$$Rad_i(t) = \| x_i(t) - x_{i-AOA}(t + 1) \| \quad (3.37)$$

Daha sonra, nesnenin komşuları Denklem 3.38 ile hesaplanır.

$$N_i(t) = \{ X_j(t) \mid x_i(t) D_i(X_i(t), X_j(t)) \leq Rad_i(t), X_j(t) \in population \} \quad (3.38)$$

Burada  $N_i(t)$ ,  $X_i(t)$ 'nin komşularını içeren matristir.

### Seçme/ve güncelleme adımı

Komşuların yer değiştirmesi Denklem 3.39 ile gerçekleştirilir.

$$X_{i-DL,d}(t + 1) = X_{i,d}(t) + frndx(X_{n,d}(t) - X_{r,d}(t)) \quad (3.39)$$

Burada  $X_{n,d}(t)$  rastgele bir komşu ve  $\in N_i(t)$ 'dir.  $X_{r,d}(t)$ , popülasyon rastgele seçilmiş bir nesnedir.

$X_{i-AOA}(t + 1)$  ve  $X_{i-DL,d}(t + 1)$ 'nin uygunluk değerleri karşılaştırılır. Daha iyi olan aday seçilir. Önceki ve sonraki konumlar Denklem 3.40 ile karşılaştırılır ve güncellenir. [176].

$$X_i(t + 1) = \begin{cases} X_{i-AOA}(t + 1), & \text{if } fobject(X_{i-AOA}) < fobject(X_{i-DL}) \\ X_{i-DL}(t + 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.40)$$

### Bitirme adımı

Bu işlem tüm iterasyonlar için tekrarlanır.

### Parametre optimizasyonu

AOA algoritmasındaki  $C_3$ , ve  $C_4$  değerleri, CEC 2017 ve Mühendislik problemlerinin kullanımı ve Standart Optimizasyon Fonksiyonları için farklı değerler almaktadır. AOA makalesinde, üç CEC 2017 test fonksiyonu seçilerek duyarlılık analizi yapılmıştır. Sabit parametreler değiştirilerek elde edilen kısmi maliyet fonksiyonu değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

AOA makalesinde, problemin zorluğuna ve görünümüne bağlı olarak farklı değerlerin denenebileceği belirtilmiştir [119]. Algoritmaları varsayılan parametrelerle uygulamak iyi

performans gösterebilir, ancak belirli bir sorun için parametreleri probleme özgü ayarlamak daha iyi çözümler getirir. Değiştirilmiş algoritmanın uygulanmasının sonuçları, modifikasyonla elde edilen etkinliği göstermektedir. Bu nedenle, sonucun etkinliğini artırmak için algoritmanın yapısının bir parçası veya parametreleri değiştirilebilir. Optimum parametreler başka bir optimizasyon algoritması ile optimize edilebilir. Bu, arama alanı çok geniş olduğundan ve optimizasyon algoritmasının parametrelerde ince ayar yapmak için sürekli olarak yeni değerler değiştirmesi ve denemesi gerektiğinden, yüksek miktarda hesaplama maliyetine neden olabilir. Bu kısma, her problem türü için sadece bir kez ihtiyaç duyulduğu için, değiştirilen algoritmanın daha sonra çalıştırılması, karmaşıklık ve hesaplama süresi açısından farklılık göstermeyecektir. Yeni parametreler bulunduktan sonra, yeni modifiye algoritma çalıştırılır.

$C_3$ , ve  $C_4$  'e ek olarak, üç sabit olasılık değeri optimize edilmiştir. Olasılık değerleri aşağıdaki gibidir:

- $p_1$ , Transfer Operatörü ( $TF$ ) parametresiyle karşılaştırma olasılığı,
- $p_2$ , arama yönünü değiştirmek için işaret ( $F$ ) ile karşılaştırma olasılığı,
- $p_3$ , AOA'nın 5. Adımında keşif veya sömürü aşamalarını belirlemek için  $TF$  değerini karşılaştırmak için kullanılır.

Bu olasılıklar BPA tarafından alt ve üst sınır limitleri dikkate alınarak optimize edilmiştir. AOA parametrelerinin orijinal değerleri Bölüm 3.3.1'de Çizelge 3.2'de sunulmuştur [119]. Önerilen MDAOA'nın sözde kodu, Algoritma 3.2'de verilmiştir.

### **Algoritma 3.2 : Önerilen MDAOA'nın sözde kodu.**

---

```

Optimizasyon uygulanacak problemi belirle ve ilgili bilgileri yükle
Bu problem için MDAOA sabitleri hesaplanmamışsa
    MDAOA'nın obj_function değerini problemin amaç fonksiyonu olarak ayarla
    BPA'nın obj_function değerini MDAOA olarak ayarla
    BPA(obj_functionBPA, ubBPA, lbBPA, tmaxBPA, NBPA)'yı çalıştır
     $C_3$ ,  $C_4$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ , karar değişkenlerini tanımla;
    MDAOA(obj_functionMDAOA, ubMDAOA, lbMDAOA, tmaxMDAOA, NMDAOA,  $C_3$ ,
     $C_4$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ )
     $C_3$ ,  $C_4$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  değerleri için en iyi değerleri döndür;
     $C_3$ ,  $C_4$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ 'nin yeni değerlerini MDAOA'ya entegre et
else
    MDAOA(obj_functionMDAOA, ubMDAOA, lbMDAOA, tmaxMDAOA, NMDAOA,)
Popülasyonu rastgele değerlerle (konum, yoğunluk ve hacim) başlat
(N nesnenin arama uzayında rastgele dağıtılması ve uygunluklarının hesaplanması).
Başlangıç popülasyonu ile uygunluk fonksiyonunu çalıştır. En iyi uygunluk değerini seç.
iterasyon sayacını 1'e eşitle (t=1).

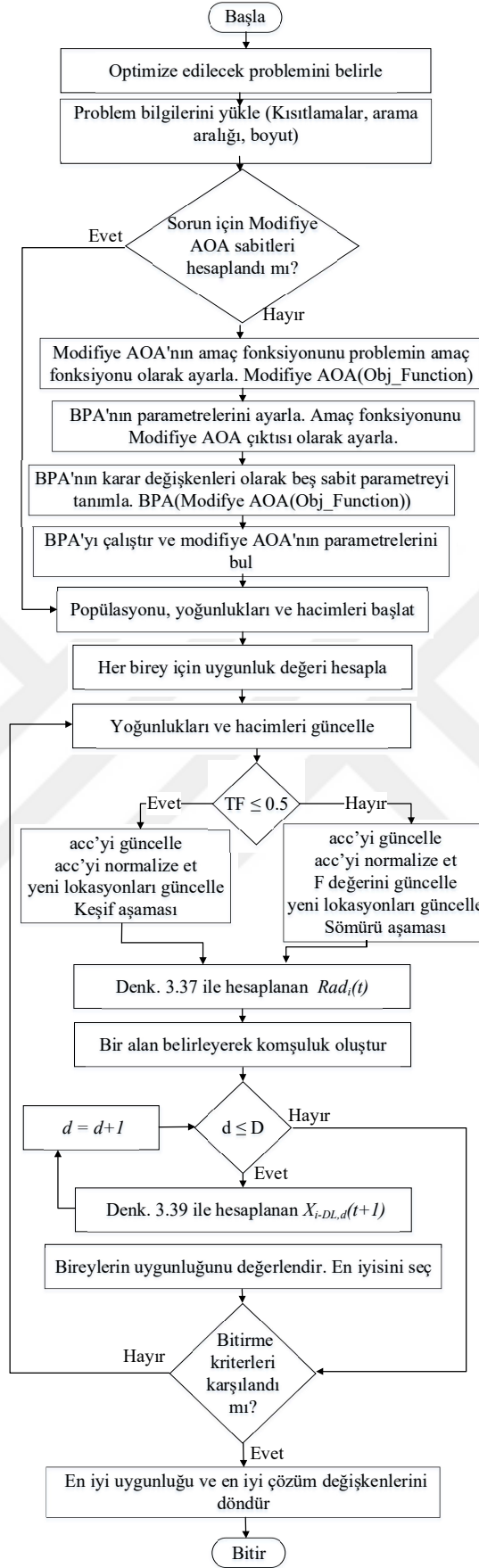
```

### Algoritma 3.2 (devam) : Önerilen MDAOA'nın sözde kodu.

---

```
 $t < t_{max}$  olduğu sürece
  her bir  $i$  objesi için
    Yoğunluğu ve hacmi güncelle
    Aktarım ve yoğunluğu azaltan faktörleri güncelle
    eğer  $TF \leq 0.5$  — Keşif aşamasını yürüt
      Hızlanmayı güncelle ve normalize et
      Konumu güncelle.
    else—Sömürü aşamasını yürüt
      Hızlanmayı güncelle ve normalize et
      Yön bayrağını ( $F$ ) güncelle
      Konumu güncelle.
    eğer sonu
       $Rad_i(t)$  hesaplanması:  $Rad_i(t)$  alanında komşuluk oluşturma
      Yarıçap( $t$ )'nın hesaplanması: Yarıçaplı( $t$ ) komşuluk binası.
       $d=1 : D$  döngüsü
        Konumu güncelle
        döngü sonu
        En iyi  $X_{i-AOA}(t+1)$  ve  $X_{i-DL,d}(t+1)$ 'yi seç
        popülasyonu güncelle
        döngü sonu
      Her nesne için uygunluk fonksiyonunu çalıştır. En iyi uygunluk değerini seç
      iterasyon değişkenini artır  $t = t+1$ .
    while döngüsü sonu
  En iyi uygunluk değerine sahip nesneyi döndür
Son
```

Önerilen algoritmanın akış diyagramı Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.2 : Önerilen MDAOA'nın akış diyagramı.

### 3.4 Tez Kapsamında Kullanılan Kıyaslama Fonksiyon ve Problemleri

#### 3.4.1 Standart kıyaslama fonksiyonları

Standart kıyaslama fonksiyon grubu, Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA)'nın sayısal performansını değerlendirmek için kullanılan fonksiyon gruplarından biridir. Algoritmaların etkinliğini farklı açılardan değerlendirmek için tek modlu, çok modlu ve sabit boyutlu fonksiyonlar kullanılmıştır. Seçilen standart kıyaslama fonksiyon parametreleri Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.

**Çizelge 3.3 : Standart kıyaslama fonksiyon parametreleri.**

| Fonksiyon No: | Fonksiyon ismi                                                                                                                                                 | Tür        | Boyut | Alt sınır | Üst sınır | $f(x^*)$ |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------|-----------|-----------|----------|
| 1             | Sphere<br>$f_1(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2$                                                                                                                        | Unimodal   | 30    | -100      | 100       | 0        |
| 2             | Chung Reynolds<br>$f_2(x) = \left( \sum_{i=1}^D x_i^2 \right)^2$                                                                                               | Unimodal   | 30    | -100      | 100       | 0        |
| 3             | Sum of Squares<br>$f_3(x) = \sum_{i=1}^D ix_i^2$                                                                                                               | Unimodal   | 30    | -10       | 10        | 0        |
| 4             | Powell Singular-2<br>$f_4(x) = \sum_{j=2}^{D-2} (x_{i-1} - 10x_i)^2 + 5(x_{i+1} - x_{i+2})^2 + (x_i - x_{i+1})^4 + 10(x_{i-1} - x_{i+2})^4$                    | Unimodal   | 30    | -4        | 5         | 0        |
| 5             | Schwefel 2.20<br>$f_5(x) = \sum_{i=1}^D  x_i $                                                                                                                 | Unimodal   | 30    | -100      | 100       | 0        |
| 6             | Csendes<br>$f_6(x) = \sum_{i=1}^D x_i^6 \left[ 2 + \sin\left(\frac{1}{x_i}\right) \right]$                                                                     | Multimodal | 30    | -1        | 1         | 0        |
| 7             | Ackley<br>$f_7(x) = -20 \exp \left( -0.2 \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D x_i^2} \right) - \exp \left( \frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + e$ | Multimodal | 30    | -32       | 32        | 0        |
| 8             | Brown<br>$f_8(x) = \sum_{i=1}^{D-1} [(x_i^2)^{x_{i+1}^2+1} + (x_{i+1}^2)^{x_i^2+1}]$                                                                           | Multimodal | 30    | -1        | 4         | 0        |
| 9             | Griewank<br>$f_9(x) = 1 + \sum_{i=1}^D \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)$                                               | Multimodal | 30    | -600      | 600       | 0        |
| 10            | Rastrigin<br>$f_{10}(x) = 10D + \sum_{i=1}^D [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)]$                                                                                      | Multimodal | 30    | -5.12     | 5.12      | 0        |
| 11            | Zakharov<br>$f_{11}(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2 + \left( \sum_{i=1}^D 0.5ix_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^D 0.5ix_i \right)^4$                                   | Multimodal | 30    | -5        | 10        | 0        |

**Çizelge 3.3 (devam) : Standart kıyaslama fonksiyon parametreleri.**

| Fonksiyon No: | Fonksiyon ismi                                                                                                                                        | Tür               | Boyut | Alt sınır | Üst sınır | $f(x^*)$ |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------|-----------|-----------|----------|
| 12            | Matyas<br>$f_{12}(x) = 0.26(x_1^2 + x_2^2) - 0.48x_1x_2$                                                                                              | Fixed-dimensional | 2     | -10       | 10        | 0        |
| 13            | Colville<br>$f_{13}(x) = 100(x_1 - x_2^2)^2 + (1 - x_1)^2 + 90(x_4 - x_3^2)^2 + (1 - x_3)^2 + 10.1(x_2 - 1)^2 + (x_4 - 1)^2 + 19.8(x_2 - 1)(x_4 - 1)$ | Fixed-dimensional | 4     | -10       | 10        | 0        |

**3.4.2 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonları**

CEC 2017, kısıtsız sayısal optimizasyon algoritmalarının performansını test etmek için oluşturulmuş test ortamıdır. CEC 2017, aralarında tek modlu, çok modlu, hibrit ve kompozisyon fonksiyonlarının da bulunduğu 29 fonksiyon ( $f_1$ ’den  $f_{30}$ ’a kadar -  $f_2$  hariç) içerir. Bu kıyaslama fonksiyonlarında, optimizasyon algoritmalarının yerel minimumlardan kaçınma performansı, keşif ve sömürü performansı değerlendirilir. Fonksiyonlar için arama aralığı [-100, 100] şeklindedir. Boyut 30’dur. CEC 2017 test fonksiyonlarının özeti ve minimum değerleri Çizelge 3.4’te sunulmuştur [177].

**Çizelge 3.4 : CEC 2017 Test fonksiyonlarının açıklamaları.**

| Fon.                                                   | Fonksiyonların açıklamaları                                                                     | Min. |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Unimodal Fonksiyonlar (Shifted and Rotated)            |                                                                                                 |      |
| $f_1(x)$                                               | Bent Cigar Fonksiyonu                                                                           | 100  |
| $f_3(x)$                                               | Zakharov Fonksiyonu                                                                             | 300  |
| $f_4(x)$                                               | Rosenbrock Fonksiyonu                                                                           | 400  |
| Simple, Multimodal, Fonksiyonlar (Shifted and Rotated) |                                                                                                 |      |
| $f_5(x)$                                               | Rastrigin Fonksiyonu                                                                            | 500  |
| $f_6(x)$                                               | Expanded Scaffer’s F6 Fonksiyonu                                                                | 600  |
| $f_7(x)$                                               | Lunacek Bi_Rastrigin Fonksiyonu                                                                 | 700  |
| $f_8(x)$                                               | Non-Continuous Rastrigin Fonksiyonu                                                             | 800  |
| $f_9(x)$                                               | Levy Fonksiyonu                                                                                 | 900  |
| $f_{10}(x)$                                            | Schwefel Fonksiyonu                                                                             | 1000 |
| Hybrid Fonksiyonlar                                    |                                                                                                 |      |
| $f_{11}(x)$                                            | Zakharov, Rosenbrock, Rastrigin Fonksiyonları                                                   | 1100 |
| $f_{12}(x)$                                            | High Conditioned Elliptic, Modified Schwefel, Bent Cigar Fonksiyonları                          | 1200 |
| $f_{13}(x)$                                            | Bent Cigar, Rosenbrock, Lunache Bi-Rastrigin Fonksiyonları                                      | 1300 |
| $f_{14}(x)$                                            | High Conditioned Elliptic, Ackley, Schaffer, Rastrigin Fonksiyonları                            | 1400 |
| $f_{15}(x)$                                            | Bent Cigar, HGBat, Rastrigin, Rosenbrock Fonksiyonları                                          | 1500 |
| $f_{16}(x)$                                            | Expanded Schaffer F6, HGBat, Rosenbrock, Modified Schwefel Fonksiyonları                        | 1600 |
| $f_{17}(x)$                                            | Katsuura, Ackley, Expanded Griewank plus Rosenbrock, Modified Schwefel, Rastrigin Fonksiyonları | 1700 |

**Çizelge 3.4 (devam) : CEC 2017 Test fonksiyonlarının açıklamaları.**

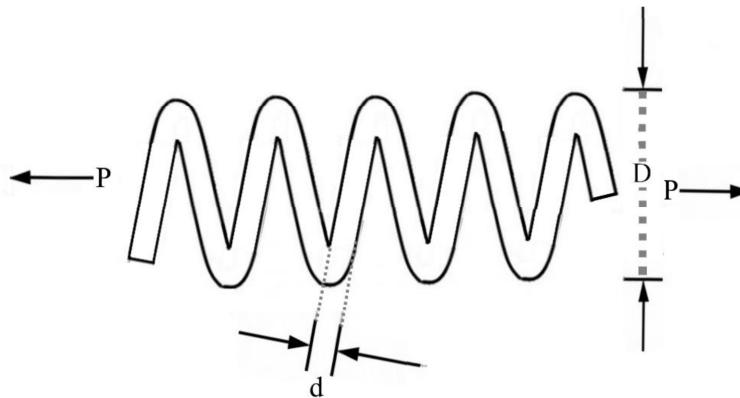
| Fon.                     | Fonksiyonların açıklamaları                                                                                     | Min. |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| $f18(x)$                 | High Conditioned Elliptic, Ackley, Rastrigin, HGBat, Discu Fonksiyonları                                        | 1800 |
| $f19(x)$                 | Bent Cigar. Rastrigin. Expanded Griewank plus Rosenbrock, Weierstrass, Expanded Schaffer Fonksiyonları          | 1900 |
| $f20(x)$                 | Happycat, Katsuura, Ackley, Rastrigin, Modified Schwefel, Schaffer Fonksiyonları                                | 2000 |
| Composition Fonksiyonlar |                                                                                                                 |      |
| $f21(x)$                 | Rosenbrock. High Conditioned Elliptic, Rastrigin Fonksiyonları                                                  | 2100 |
| $f22(x)$                 | Rastrigin, Griewank, Modified Schwefel Fonksiyonları                                                            | 2200 |
| $f23(x)$                 | Rosenbrock, Ackley, Modified Schwefel, Rastrigin Fonksiyonları                                                  | 2300 |
| $f24(x)$                 | Ackley, High Conditioned Elliptic, Griewank, Rastrigin Fonksiyonları                                            | 2400 |
| $f25(x)$                 | Rastrigin, Happycat, Ackley, Discus, Rosenbrock Fonksiyonları                                                   | 2500 |
| $f26(x)$                 | Expanded Scaffer's F6, Modified Schwefel, Griewank, Rosenbrock. Rastrigin Fonksiyonları                         | 2600 |
| $f27(x)$                 | HGBat. Rastrigin, Modified Schwefel, Bent-Cigar, High Conditioned Elliptic, Expanded Scaffer's F6 Fonksiyonları | 2700 |
| $f28(x)$                 | Ackley, Griewank, Discus, Rosenbrock, HappyCat, Expanded Scaffer's F6 Fonksiyonları                             | 2800 |
| $f29(x)$                 | G15, G16, G17 Fonksiyonları                                                                                     | 2900 |
| $f30(x)$                 | G15, G18, G19 Fonksiyonları                                                                                     | 3000 |

### 3.4.3 Mühendislik tasarım problemleri

Önerilen Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA)'nın geçerliliği ve etkinliğini kanıtlamak için beş gerçek hayat kısıtlı mühendislik problemi kullanılmıştır. Problemler, çoklu tasarım değişkenleri ve kısıtları ile oldukça karmaşıktır.

#### Germe/sıkıştırma yayı tasarımı

Germe/sıkıştırma yayı tasarım problemi, kıyaslama fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Üç değişkenli bir yayın maliyetini en aza indirmeyi amaçlayan bir optimizasyon problemidir. Bunlar: aktif bobin sayısı ( $P$ ), tel çapı ( $d$ ) ve bobin çapı ( $D$ ). Problemin dört kısıtı vardır. Problem Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.3 : Germe/sıkıştırma yayı tasarımı problemi.**

Problemin matematiksel formülasyonu aşağıdaki Denklem 3.41 ve 3.42 ile verilmiştir.

$$x = [x_1, x_2, x_3] = [d, D, P] \quad (3.41)$$

$$f(x) = (x_3 + 2)x_2x_1^2 \quad (3.42)$$

Kısıtlar Denklem 3.43'te sunulmuştur.

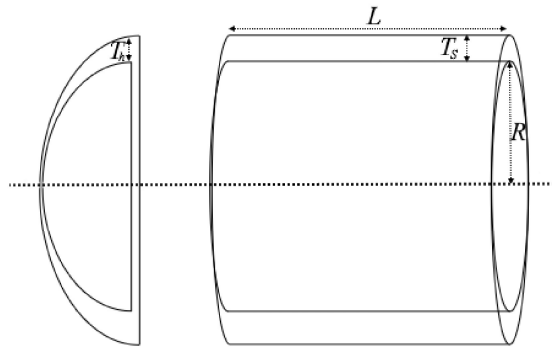
$$\begin{aligned} g_1(x) &= 1 - \frac{x_2^3 x_3}{71785 x_1^4} \leq 0, \\ g_2(x) &= \frac{4x_2^2 - x_1 x_2}{12566(x_2 x_1^3 - x_1^4)} + \frac{1}{5108 x_1^2} - 1 \leq 0, \\ g_3(x) &= 1 - \frac{140.45 x_1}{x_2^2 x_3} \leq 0, \\ g_4(x) &= \frac{x_1 + x_2}{1.5} - 1 \leq 0, \end{aligned} \quad (3.43)$$

Değişken aralıkları aşağıdaki Denklem 3.44'te verilmiştir.

$$5 \leq x_1 \leq 2.00, \quad 0.25 \leq x_2 \leq 1.30, \quad 2.00 \leq x_3 \leq 15.00 \quad (3.44)$$

### Basınçlı kap tasarımı

Basınçlı kap tasarım problemi, silindirik bir basınçlı kabın üretim maliyetini en aza indirmeyi amaçlayan bir optimizasyon problemidir. Optimizasyonun tasarımı ve parametreleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bunlar: kabuk kalınlığı ( $T_s$ ), iç yarıçap ( $R$ ), silindirik bölümün uzunluğu ( $L$ ) (kapak hariç) ve kapak kalınlığıdır ( $T_h$ ). Bu problemin dört kısıtı vardır (üç doğrusal ve bir doğrusal olmayan eşitsizlik).



Şekil 3.4 : Basınçlı kap tasarım problemi.

Problemin matematiksel formülasyonu aşağıdaki Denklem 3.45 ve 3.46 ile verilmiştir.

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4] = [T_s, T_h, R, L] \quad (3.45)$$

$$f(x) = 0.6224x_1x_3x_4 + 1.7781x_2x_3^2 + 3.1661x_1^2x_4 + 19.84x_1^2x_3 \quad (3.46)$$

Kısıtlar Denklem 3.47'de sunulmuştur.

$$\begin{aligned} g_1(x) &= -x_1 + 0.0193x_3 \leq 0, \\ g_2(x) &= -x_3 + 0.00954x_3 \leq 0, \end{aligned}$$

$$g_3(x) = -\pi x_3^2 x_4 - \frac{4}{3} \pi x_3^3 + 1296000 \leq 0, \quad (3.47)$$

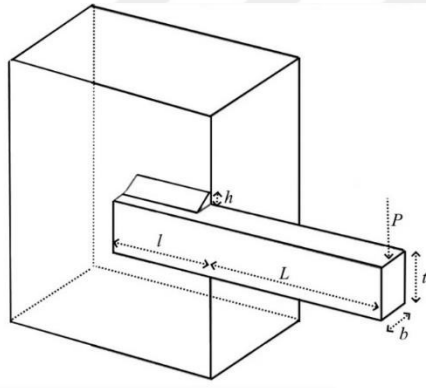
$$g_4(x) = x_4 - 240 \leq 0,$$

Değişken aralıkları aşağıdaki Denklem 3.48'de verilmiştir.

$$0 \leq x_1 \leq 99, \quad 0 \leq x_2 \leq 99, \quad 10 \leq x_3 \leq 200, \quad 10 \leq x_4 \leq 200 \quad (3.48)$$

### Kaynaklı kiriş tasarım problemi

Kaynaklı kiriş tasarım problemi, Şekil 3.5'te gösterilen kaynaklı bir kirişin üretilmesine yönelik bir maliyet minimizasyonu problemidir. Maliyet fonksiyonu dört karar değişkeni içerir: kaynak kalınlığı ( $h$ ), çubuk kalınlığı ( $b$ ), çubuğun ekli bölümünün uzunluğu ( $l$ ) ve çubuğun yüksekliği ( $t$ ).



Şekil 3.5 : Kaynaklı kiriş tasarım problemi.

Problemin matematiksel formülasyonu aşağıdaki Denklem 3.49 ve 3.50 ile verilmiştir.

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4] = [h, l, t, b] \quad (3.49)$$

$$f(x) = 1.10471x_1^2x_2 + 0.4811x_3x_4(14 + x_2) \quad (3.50)$$

Burada

$$\tau(x) = \sqrt{(\tau')^2 + 2\tau'\tau'' \frac{x_2}{2R} + (\tau'')^2} \quad ; \quad \tau' = \frac{P}{\sqrt{2} x_1 x_2} \quad ; \quad \tau'' = \frac{MR}{J}$$

$$M = P \left( L + \frac{x_2}{2} \right) \quad R = \sqrt{\frac{x_2^2}{4} + \left( \frac{x_1 + x_3}{2} \right)^2}$$

$$J = 2 \left\{ \sqrt{2} x_1 x_2 \left[ \frac{x_2^2}{12} + \left( \frac{x_1 + x_3}{2} \right)^2 \right] \right\}$$

$$\sigma(x) = \frac{6P}{x_4 x_3^2} \quad \delta(x) = \frac{4PL^3}{Ex_3^2 x_4}$$

$$P_c(x) = \frac{4.013E \sqrt{\frac{x_3^2 x_4^6}{36}}}{L^2} \left( 1 - \frac{x_3}{2L} \sqrt{\frac{E}{4G}} \right)$$

$L = 14$  in,  $\delta_{max} = 0.25$  in,  $P=6000$  Lb,  $E=30 \times 10^6$  psi,  $G = 12 \times 10^6$  psi,  $\tau_{max}= 13600$  psi,  $\sigma_{max} = 30000$  psi.

Probleme ait Denklem 3.51’de belirtilen  $(g_1(x) - g_7(x))$  yedi adet kısıt vardır.

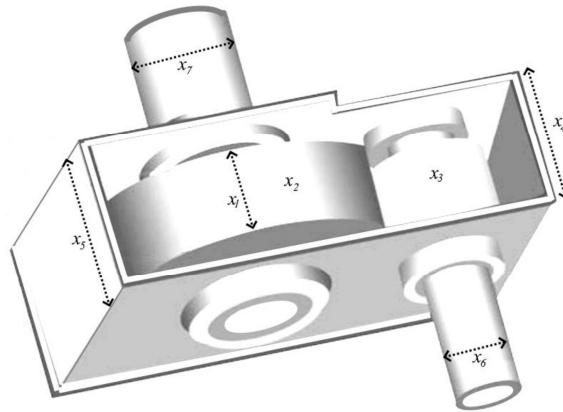
$$\begin{aligned} g_1(x) &= \tau(x) - \tau_{max} \leq 0, \\ g_2(x) &= \sigma(x) - \sigma_{max} \leq 0, \\ g_3(x) &= x_1 - x_4 \leq 0, \\ g_4(x) &= 1.10471x_1^2 + 0.4811x_3x_4(14 + x_2) - 5 \leq 0, \\ g_5(x) &= 0.125 - x_1 \leq 0, \\ g_6(x) &= \delta(x) - \delta_{max} \leq 0, \\ g_7(x) &= P - P_c(x) \leq 0, \end{aligned} \quad (3.51)$$

Değişken aralıkları aşağıdaki Denklem 3.52’de verilmiştir.

$$0.1 \leq x_1 \leq 2, \quad 0.1 \leq x_2 \leq 10, \quad 0.1 \leq x_3 \leq 10, \quad 0.1 \leq x_4 \leq 2 \quad (3.52)$$

### Hız düşürücü problem

Bu mühendislik tasarım probleminde amaç, minimum ağırlık ile küçük bir uçakta kullanılan bir hız düşürücü için parametreleri seçmektir. Problemin yedi tasarım değişkeni vardır. Bunlar: yüz genişliği, diş modülü, pinyondaki diş sayısı, hem birinci hem de ikinci miller için yataklar arasındaki uzunluk ve millerin çaplarıdır. Hız düşürücü tasarım probleminin şeması Şekil 3.6’da sunulmuştur.



**Şekil 3.6 :** Hız düşürücü tasarım problemi.

Problemin matematiksel formülasyonu aşağıdaki Denklem 3.53 ve 3.54 ile verilmiştir.

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7] \quad (3.53)$$

$$f(x) = 0.7854x_1x_2^2 \times (3.3333x_3^2 + 14.9334x_3 - 43.0934) - 1.508x_1(x_6^2 + x_7^2) + 7.4777(x_6^3 + x_7^3) + 0.7854(x_4x_6^2 + x_5x_7^2) \quad (3.54)$$

Kısıtlar Denklem 3.55'te sunulmuştur.

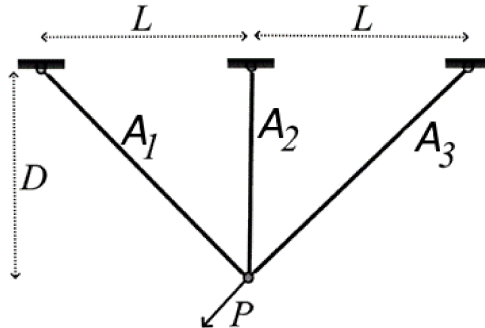
$$\begin{aligned} g_1(x) &= \frac{27}{x_1x_2^2x_3} - 1 \leq 0, g_2(x) = \frac{397.5}{x_1x_2^2x_3^2} - 1 \leq 0, \\ g_3(x) &= \frac{1.93x_4^3}{x_2x_3x_6^4} - 1 \leq 0, g_4(x) = \frac{1.93x_5^3}{x_2x_3x_7^4} - 1 \leq 0, \\ g_5(x) &= \frac{1}{110x_6^3} \sqrt{\left(\frac{745x_4}{x_2x_3}\right)^2 + 16.9 * 10^6} - 1 \leq 0, \\ g_6(x) &= \frac{1}{85x_7^3} \sqrt{\left(\frac{745x_5}{x_2x_3}\right)^2 + 157.5 * 10^6} - 1 \leq 0, \\ g_7(x) &= \frac{x_2x_3}{40} - 1 \leq 0, g_8(x) = \frac{5x_2}{x_1} - 1 \leq 0, \\ g_9(x) &= \frac{x_1}{12} - 1 \leq 0, g_{10}(x) = \frac{1.5x_6 + 1.9}{x_4} - 1 \leq 0, \\ g_{11}(x) &= \frac{1.1x_7 + 1.9}{x_5} - 1 \leq 0, \end{aligned} \quad (3.55)$$

Değişken aralıkları aşağıdaki Denklem 3.56'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} 2.6 &\leq x_1 \leq 3.6, & 0.7 &\leq x_2 \leq 0.8, \\ 17 &\leq x_3 \leq 28, & 7.3 &\leq x_4 \leq 8.3, \\ 7.3 &\leq x_5 \leq 8.3, & 2.9 &\leq x_6 \leq 3.9, & 5 &\leq x_7 \leq 5.5, \end{aligned} \quad (3.56)$$

### Üç çubuklu kafes tasarımı

Üç çubuklu kafes tasarım problemi, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi bir ağırlık minimizasyonu problemidir. Burkulma, sapma ve gerilme, sistemin kısıtlarıdır.



Şekil 3.7 : Üç çubuklu kafes tasarım problemi.

Problemin matematiksel formülasyonu aşağıdaki Denklem 3.57 ve 3.58 ile verilmiştir.

$$x = [x_1, x_2] = [A_1, A_2] \quad (3.57)$$

$$f(x) = (2\sqrt{2} x_1 + x_2) \times L \quad (3.58)$$

Burada

$$L = 100 \text{ cm}, \quad P = 2 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma = 2 \text{ kN/cm}^2$$

Kısıtlar Denklem 3.59'da sunulmuştur.

$$\begin{aligned} g_1(x) &= \frac{\sqrt{2} x_1 + x_2}{\sqrt{2} x_1^2 + 2x_1 x_2} P - \sigma \leq 0, \\ g_2(x) &= \frac{x_2}{\sqrt{2} x_1^2 + 2x_1 x_2} P - \sigma \leq 0, \\ g_3(x) &= \frac{1}{\sqrt{2} x_2 + x_1} P - \sigma \leq 0, \end{aligned} \quad (3.59)$$

Değişken aralıkları aşağıdaki Denklem 3.60'ta verilmiştir.

$$0 \leq x_1 \leq 1, \quad 0 \leq x_2 \leq 1 \quad (3.60)$$

### 3.5 Tez Kapsamında Kullanılan Test Dağıtım Ağları

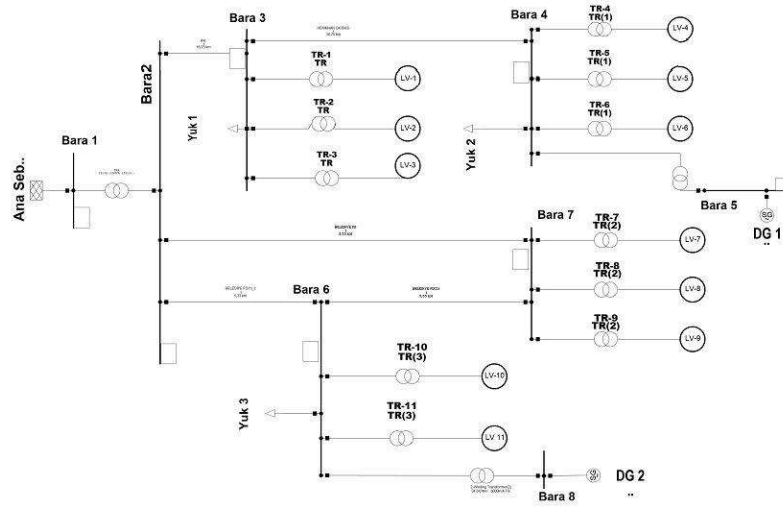
Aşağıdaki bölümlerde tez kapsamında kullanılan test sistemleri yer almaktadır.

#### 3.5.1 42-baralı örnek dağıtım ağı

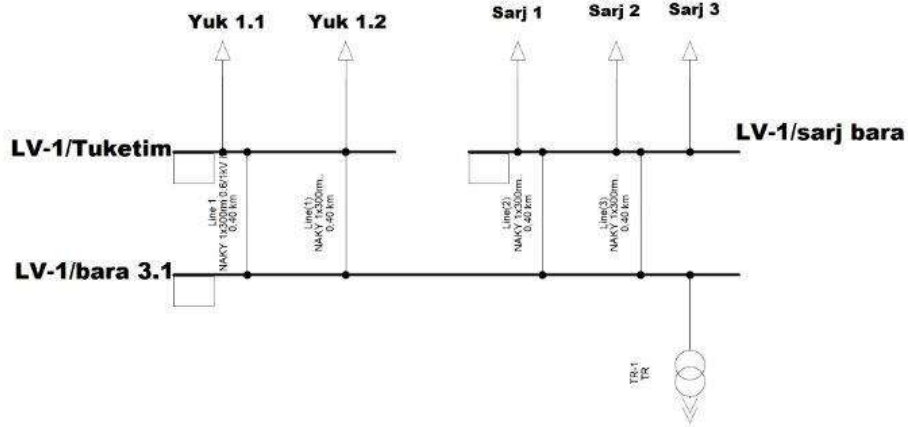
Bu bölümde dağıtım ağına eklenecek şarj istasyonlarının etkisi sanal bir model üzerinde göstermek için şarj istasyonlarının entegre edileceği Türkiye dağıtım sisteminin (36 kV/400 V) benzetimi örnek 42 baralı kesiti DigSilent yazılımı kullanılarak modellenmiştir.

Bu program ile oluşturulan modelin 36 kV'luk tek hat diyagramı Şekil 3.8'de verildiği gibidir.

Şekilde 1 nolu bara ana dağıtım ağına bağlı olup (İletim sistemi) salınım barasıdır. Bu dağıtım sisteminde bara 3, 4, 6 ve 7'ye entegre edilmiş 11 adet 400 V'luk dağıtım ağı mevcuttur. Bu dağıtım ağları 4 farklı grup şeklinde 36 kV/400V dağıtım trafoları yardımıyla bu baralara entegre edilmiştir. 1. Grup 3. nolu bara, 2 grup 4 nolu bara, 3 grup 7 nolu bara ve 4. Grup 6 nolu bara üzerindedir. Bu 11 adet dağıtım sisteminin 400 V'luk tek hat diyagramı Şekil 3.9'da verildiği gibidir (11 adet 400 V dağıtım ünitesinin tüm modellerinin tek hat diyagramının gösterimi aynı olduğu için sadece birinin gösterimine yer verilmiştir). Bu dağıtım ağının 36 kV'luk kesitine ait yük ve hat verileri Çizelge 3.5-3.6'da verilmiştir. Dağıtım ağının 400 V'luk kesitine ait hat ve yük verileri Çizelge 3.7-3.12'de verilmiştir.



**Şekil 3.8 :** 42 baralı örnek Türkiye dağıtım sisteminin 36 kV'luk yaklaşık modelinin tek hat diyagramı.



**Şekil 3.9 :** 42 baralı Örnek Türkiye dağıtım sisteminin 400 V'luk yaklaşık modelinin tek hat diyagramı (LV-1 için).

400 V'luk hatlar yer altı kabloları olarak modellenmiş olup, her gruptaki iletim hattı ve yük verileri aynıdır (Örneğin 1. grupta 3 adet olan 400 V'luk dağıtım sisteminin verileri birbirlerinin aynısıdır). Ayrıca bu dağıtım ağında 2 adet yenilenebilir enerji kaynaklı dağıtık enerji üretim sisteminin (Distributed generation - DG1 ve DG-2) devrede olduğu kabul edilmiştir. Bu dağıtık üretim sistemlerinin aktif/reaktif gücü sırasıyla 7 MW/0.2 MVAR ve 8 MW/0.2 MVAR'dır. Bu iletim sisteminde toplam yük talebi 11 MW/6 MVAR'dır.

**Çizelge 3.5 : 36 kV’luk kesitine ait yük/üretim verileri.**

| Bara No | Bara  | Bara Kodu | Yük    |          | Üretim No | Üretim Pmin (MW) | Üretim Qmax (MVAR) |
|---------|-------|-----------|--------|----------|-----------|------------------|--------------------|
|         |       |           | P (MW) | Q (MVAR) |           |                  |                    |
| 1       | Bus 1 | 1         | -      | -        |           | 0                | 430                |
| 2       | Bus 2 | 3         | -      | -        |           | -                | -                  |
| 3       | Bus 3 | 2         | 2      | 0.4      |           | 50               | 90                 |
| 4       | Bus 4 | 3         | 4      | 0.11     |           | -                | -                  |
| 5       | Bus 5 | 2         | -      | -        | DG1       | 7                | 0.2                |
| 6       | Bus 6 | 3         | 2      | 0.8      |           | -                | -                  |
| 7       | Bus 7 | 3         | -      | -        |           | -                | -                  |
| 8       | Bus 8 | 2         | -      | -        | DG2       | 8                | 0.2                |

Bara kodları 1= slack buses, 2= Üretim Baraları, 3= Yük baraları

**Çizelge 3.6 : 36 kV’luk kesitine ait yük/üretim verileri.**

| No | Nl   | Nr   | R     | X     | B     |
|----|------|------|-------|-------|-------|
| 1  | Bus2 | Bus3 | 5.638 | 6.247 | 67    |
| 2  | Bus3 | Bus4 | 5.638 | 6.247 | 67    |
| 3  | Bus2 | Bus7 | 1.79  | 1.98  | 21.28 |
| 4  | Bus2 | Bus6 | 1.79  | 1.98  | 21.28 |
| 5  | Bus6 | Bus7 | 1.79  | 1.98  | 21.28 |

**Çizelge 3.7 : 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V’luk dağıtım hattına ait veriler (1. Grup hat verileri).**

| Line no | nl          | nr           | R     | X      | B       |
|---------|-------------|--------------|-------|--------|---------|
| 1       | LV-1/load   | LV-1/Bus 3.1 | 0.042 | 0.0351 | 149.536 |
| 2       | LV-1/load   | LV-1/Bus 3.1 | 0.042 | 0.0351 | 149.536 |
| 3       | LV-1/charge | LV-1/Bus 3.1 | 0.042 | 0.0351 | 149.536 |
| 4       | LV-1/charge | LV-1/Bus 3.1 | 0.042 | 0.0351 | 149.536 |

1. Gruba bağlı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır. (LV-1/LV-2/LV-3)

**Çizelge 3.8 : 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V’luk dağıtım hattına ait veriler (2. Grup hat verileri).**

| Line no | nl          | nr           | R      | X       | B       |
|---------|-------------|--------------|--------|---------|---------|
| 1       | LV-4/load   | LV-4/Bus 4.1 | 0.0472 | 0.03958 | 168.228 |
| 2       | LV-4/load   | LV-4/Bus 4.1 | 0.0472 | 0.03958 | 168.228 |
| 3       | LV-4/charge | LV-4/Bus 4.1 | 0.0472 | 0.03958 | 168.228 |
| 4       | LV-4/charge | LV-4/Bus 4.1 | 0.0472 | 0.03958 | 168.228 |

2. Gruba bağı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır. (LV-4,LV-5,LV-6)

**Çizelge 3.9 :** 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V'luk dağıtım hattına ait veriler (3. Grup hat verileri).

| Line no | nl          | nr           | R       | X        | B       |
|---------|-------------|--------------|---------|----------|---------|
| 1       | LV-7/load   | LV-7/Bus 7.1 | 0.04414 | 0.036945 | 157.028 |
| 2       | LV-7/load   | LV-7/Bus 7.1 | 0.04414 | 0.036945 | 157.028 |
| 3       | LV-7/charge | LV-7/Bus 7.1 | 0.04414 | 0.036945 | 157.028 |
| 4       | LV-7/charge | LV-7/Bus 7.1 | 0.04414 | 0.036945 | 157.028 |

3. Gruba bağı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır. (LV-7,LV-8,LV-9)

**Çizelge 3.10 :** 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V'luk dağıtım hattına ait veriler (4. Grup hat verileri).

| Line no | nl          | nr           | R       | X       | B      |
|---------|-------------|--------------|---------|---------|--------|
| 1       | LV-6/load   | LV-6/Bus 6.1 | 0.05255 | 0.04398 | 186.92 |
| 2       | LV-6/load   | LV-6/Bus 6.1 | 0.05255 | 0.04398 | 186.92 |
| 3       | LV-6/charge | LV-6/Bus 6.1 | 0.05255 | 0.04398 | 186.92 |
| 4       | LV-6/charge | LV-6/Bus 6.1 | 0.05255 | 0.04398 | 186.92 |

4.Gruba bağı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır LV-10, LV-11.

**Çizelge 3.11 :** 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V'luk yük verileri (1.ve 2. grup).

| 1. Grup için hat verileri (1. Gruba bağı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır) |       |        | 2. Grup için hat verileri (2. Gruba bağı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır) |       |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|
| Yük                                                                                     | MW    | MVAR   | Yük                                                                                     | MW    | MVAR   |
| Load 3.1                                                                                | 0.245 | 0.001  | Load 4.1                                                                                | 0.225 | 0.001  |
| Load 3.2                                                                                | 0.265 | 0.0021 | Load 4.2                                                                                | 0.275 | 0.0021 |
| Charge 3.1                                                                              | 0.25  | 0.001  | Charge 4.1                                                                              | 0.25  | 0.001  |
| Charge 3.2                                                                              | 0.25  | 0.001  | Charge 4.2                                                                              | 0.25  | 0.001  |
| Charge 3.3                                                                              | 0.25  | 0.001  | Charge 4.3                                                                              | 0.25  | 0.001  |

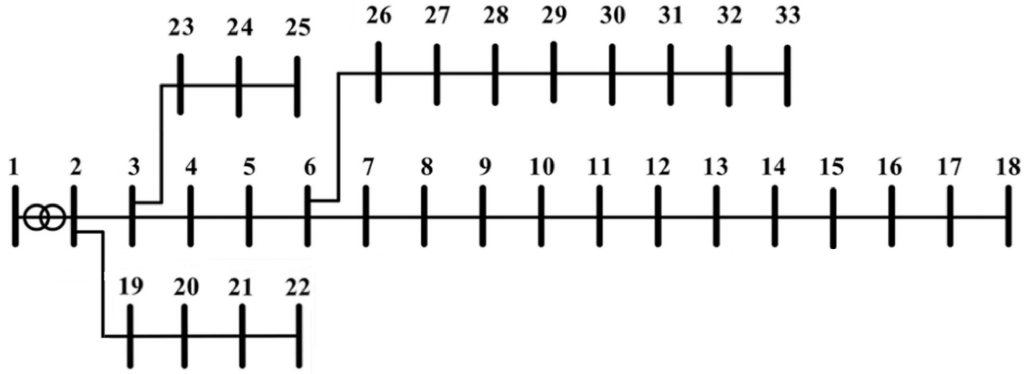
**Çizelge 3.12 :** 42 baralı dağıtım sisteminin 400 V'luk yük verileri (3.ve 4. grup).

| 3. Grup için hat verileri (3. Gruba bağı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır) |       |            | 4. Grup için hat verileri (4. Gruba bağı tüm 400 Voltluk iletim hattı verileri aynıdır) |            |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------|
| Yük                                                                                     | MW    | Yük        | MW                                                                                      | Yük        | MW    |
| Load 6.1                                                                                | 0.235 | Load 6.1   | 0.235                                                                                   | Load 6.1   | 0.235 |
| Load 6.2                                                                                | 0.268 | Load 6.2   | 0.268                                                                                   | Load 6.2   | 0.268 |
| Charge 6.1                                                                              | 0.25  | Charge 6.1 | 0.25                                                                                    | Charge 6.1 | 0.25  |
| Charge 6.2                                                                              | 0.25  | Charge 6.2 | 0.25                                                                                    | Charge 6.2 | 0.25  |
| Charge 6.3                                                                              | 0.25  | Charge 6.3 | 0.25                                                                                    | Charge 6.3 | 0.25  |

### 3.5.2 IEEE-33 baralı test dağıtım ağı

IEEE-33 baralı test sistemi, 33 bara ve 32 hattan oluşan bir radyal dağıtım sistemidir. Tüm baralar 12.66 kV seviyesindedir. Gerilim limitlerinin  $\pm\%10$  olduğu varsayılmıştır. Bu dağıtım sisteminin toplam yük talebi 3.175 MW ve 2.3 MVAR'dır. Bu güç sistemine ait

dağıtım hattı verileri ve yük verileri [178]'den alınmıştır. Şekil 3.10, IEEE-33 baralı test dağıtım ağının şemasını göstermektedir.



**Şekil 3.10 : IEEE-33 baralı test dağıtım ağı.**

Çizelge 3.13'te IEEE-33 baralı test dağıtım ağına ait hat ve yük verilerine ait bilgiler sunulmuştur.

**Çizelge 3.13 : IEEE-33 baralı test dağıtım ağının hat ve yük verileri.**

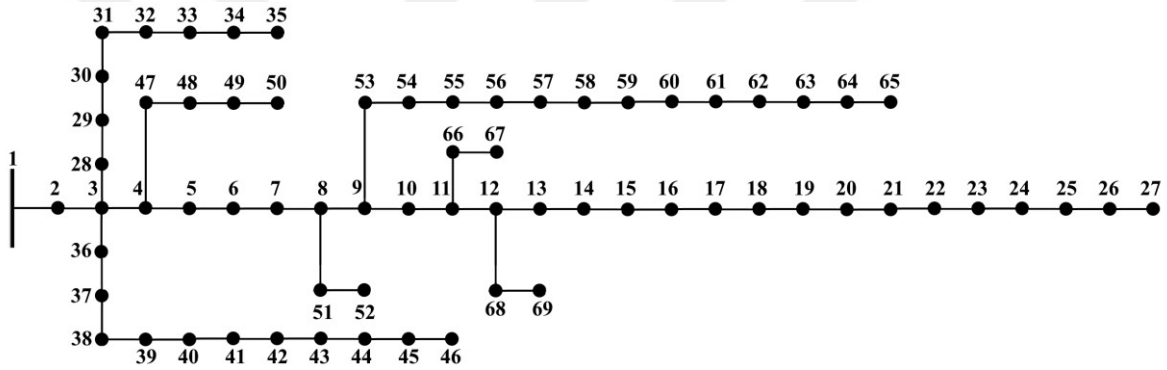
| Hat no | nl | nr | R (r)  | X (n)  | Aktif güç (kW) | Reaktif güç (kVAr) |
|--------|----|----|--------|--------|----------------|--------------------|
| 1      | 1  | 2  | 0.0922 | 0.0477 | 100.0          | 60.0               |
| 2      | 2  | 3  | 0.4930 | 0.2511 | 90.0           | 40.0               |
| 3      | 3  | 4  | 0.3660 | 0.1864 | 120.0          | 80.0               |
| 4      | 4  | 5  | 0.3811 | 0.1941 | 60.0           | 30.0               |
| 5      | 5  | 6  | 0.8190 | 0.7070 | 60.0           | 20.0               |
| 6      | 6  | 7  | 0.1872 | 0.6188 | 200.0          | 100.0              |
| 7      | 7  | 8  | 1.7114 | 1.2351 | 200.0          | 100.0              |
| 8      | 8  | 9  | 1.0300 | 0.7400 | 60.0           | 20.0               |
| 9      | 9  | 10 | 1.0400 | 0.7400 | 60.0           | 20.0               |
| 10     | 10 | 11 | 0.1966 | 0.0650 | 45.0           | 30.0               |
| 11     | 11 | 12 | 0.3744 | 0.1238 | 60.0           | 35.0               |
| 12     | 12 | 13 | 1.4680 | 1.1550 | 60.0           | 35.0               |
| 13     | 13 | 14 | 0.5416 | 0.7129 | 120.0          | 80.0               |
| 14     | 14 | 15 | 0.5910 | 0.5260 | 60.0           | 10.0               |
| 15     | 15 | 16 | 0.7463 | 0.5450 | 60.0           | 20.0               |
| 16     | 16 | 17 | 1.2890 | 1.7210 | 60.0           | 20.0               |
| 17     | 17 | 18 | 0.7320 | 0.5740 | 90.0           | 40.0               |
| 18     | 2  | 19 | 0.1640 | 0.1565 | 90.0           | 40.0               |
| 19     | 19 | 20 | 1.5042 | 1.3554 | 90.0           | 40.0               |
| 20     | 20 | 21 | 0.4095 | 0.4784 | 90.0           | 40.0               |
| 21     | 21 | 22 | 0.7089 | 0.9373 | 90.0           | 40.0               |
| 22     | 3  | 23 | 0.4512 | 0.3083 | 90.0           | 50.0               |
| 23     | 23 | 24 | 0.8980 | 0.7091 | 420.0          | 200.0              |
| 24     | 24 | 25 | 0.8960 | 0.7011 | 420.0          | 200.0              |
| 25     | 6  | 26 | 0.2030 | 0.1034 | 60.0           | 25.0               |
| 26     | 26 | 27 | 0.2842 | 0.1447 | 60.0           | 25.0               |

**Çizelge 3.13 (devam) : IEEE-33 baralı test dağıtım ağının hat ve yük verileri.**

| Hat no | nl | nr | R (ri) | X (n)  | Aktif güç (kW) | Reaktif güç (kVAr) |
|--------|----|----|--------|--------|----------------|--------------------|
| 27     | 27 | 28 | 1.0590 | 0.9337 | 60.0           | 20.0               |
| 28     | 28 | 29 | 0.8042 | 0.7006 | 120.0          | 70.0               |
| 29     | 29 | 30 | 0.5075 | 0.2585 | 200.0          | 600.0              |
| 30     | 30 | 31 | 0.9744 | 0.9630 | 150.0          | 70.0               |
| 31     | 31 | 32 | 0.3105 | 0.3619 | 210.0          | 100.0              |
| 32     | 32 | 33 | 0.3410 | 0.5302 | 60.0           | 40.0               |

### 3.5.3 IEEE-69 baralı test dağıtım ağı

IEEE 69 baralı-radyal dağıtım sistemi, 69 bara, 68 hat ve 7 yanal besleyici içermektedir. Bu sistemdeki toplam yük talebi, 12.66 kV seviyesinde sistem gerilimi ile 3802.19 kW ve 2694.60 kVAR'dır. 69-bara test sisteminin dağıtım hattı ve yük verileri [179]'den alınmıştır. IEEE 69- bara test sistemi şeması Şekil 3.11'de verilmiştir.



**Şekil 3.11 : IEEE-69 baralı dağıtım ağı şeması.**

Çizelge 3.14'te IEEE-69 baralı test dağıtım ağına ait hat ve yük verilerine ait bilgiler sunulmuştur.

**Çizelge 3.14 : IEEE-69 baralı test dağıtım ağının hat ve yük verileri.**

| Hat no | nl | nr | R (ri) | X (n)  | Aktif güç (kW) | Aktif güç (kVAr) |
|--------|----|----|--------|--------|----------------|------------------|
| 1      | 1  | 2  | 0.0005 | 0.0012 | 0              | 0                |
| 2      | 2  | 3  | 0.0005 | 0.0012 | 0              | 0                |
| 3      | 3  | 4  | 0.0015 | 0.0036 | 0              | 0                |
| 4      | 4  | 5  | 0.0251 | 0.0294 | 0              | 0                |
| 5      | 5  | 6  | 0.366  | 0.1864 | 2.6            | 2.2              |
| 6      | 6  | 7  | 0.381  | 0.1941 | 40.4           | 30               |
| 7      | 7  | 8  | 0.0922 | 0.047  | 75             | 54               |
| 8      | 8  | 9  | 0.0493 | 0.0251 | 30             | 22               |
| 9      | 9  | 10 | 0.819  | 0.2707 | 28             | 19               |
| 10     | 10 | 11 | 0.1872 | 0.0619 | 145            | 104              |

**Çizelge 3.14 (devam) : IEEE-69 baralı test dağıtım ağının hat ve yük verileri.**

| Hat no | nl | nr | R (ri) | X (n)  | Aktif güç (kW) | Aktif güç (kVAr) |
|--------|----|----|--------|--------|----------------|------------------|
| 11     | 11 | 12 | 0.7114 | 0.2351 | 145            | 104              |
| 12     | 12 | 13 | 1.03   | 0.34   | 8              | 5                |
| 13     | 13 | 14 | 1.044  | 0.345  | 8              | 5.5              |
| 14     | 14 | 15 | 1.058  | 0.3496 | 0              | 0                |
| 15     | 15 | 16 | 0.1966 | 0.065  | 45.5           | 30               |
| 16     | 16 | 17 | 0.3744 | 0.1238 | 60             | 35               |
| 17     | 17 | 18 | 0.0047 | 0.0016 | 60             | 35               |
| 18     | 18 | 19 | 0.3276 | 0.1083 | 0              | 0                |
| 19     | 19 | 20 | 0.2106 | 0.069  | 1              | 0.6              |
| 20     | 20 | 21 | 0.3416 | 0.1129 | 114            | 81               |
| 21     | 21 | 22 | 0.014  | 0.0046 | 5              | 3.5              |
| 22     | 22 | 23 | 0.1591 | 0.0526 | 0              | 0                |
| 23     | 23 | 24 | 0.3463 | 0.1145 | 28             | 20               |
| 24     | 24 | 25 | 0.7488 | 0.2475 | 0              | 0                |
| 25     | 25 | 26 | 0.3089 | 0.1021 | 14             | 10               |
| 26     | 26 | 27 | 0.1732 | 0.0572 | 14             | 10               |
| 27     | 3  | 28 | 0.0044 | 0.0108 | 26             | 18.6             |
| 28     | 28 | 29 | 0.064  | 0.1565 | 26             | 18.6             |
| 29     | 29 | 30 | 0.3978 | 0.1315 | 0              | 0                |
| 30     | 30 | 31 | 0.0702 | 0.0232 | 0              | 0                |
| 31     | 31 | 32 | 0.351  | 0.116  | 0              | 0                |
| 32     | 32 | 33 | 0.839  | 0.2816 | 14             | 10               |
| 33     | 33 | 34 | 1.708  | 0.5646 | 19.5           | 14               |
| 34     | 34 | 35 | 1.474  | 0.4873 | 6              | 4                |
| 35     | 3  | 36 | 0.0044 | 0.0108 | 26             | 18.55            |
| 36     | 36 | 37 | 0.064  | 0.1565 | 26             | 18.55            |
| 37     | 37 | 38 | 0.1053 | 0.123  | 0              | 0                |
| 38     | 38 | 39 | 0.0304 | 0.0355 | 24             | 17               |
| 39     | 39 | 40 | 0.0018 | 0.0021 | 24             | 17               |
| 40     | 40 | 41 | 0.7283 | 0.8509 | 1.2            | 1                |
| 41     | 41 | 42 | 0.31   | 0.3623 | 0              | 0                |
| 42     | 42 | 43 | 0.041  | 0.0478 | 6              | 4.3              |
| 43     | 43 | 44 | 0.0092 | 0.0116 | 0              | 0                |
| 44     | 44 | 45 | 0.1089 | 0.1373 | 39.22          | 26.3             |
| 45     | 45 | 46 | 0.0009 | 0.0012 | 39.22          | 26.3             |
| 46     | 4  | 47 | 0.0034 | 0.0084 | 0              | 0                |
| 47     | 47 | 48 | 0.0851 | 0.2083 | 79             | 56.4             |
| 48     | 48 | 49 | 0.2898 | 0.7091 | 384.7          | 274.5            |
| 49     | 49 | 50 | 0.0822 | 0.2011 | 384.7          | 274.5            |
| 50     | 8  | 51 | 0.0928 | 0.0473 | 40.5           | 28.3             |
| 51     | 51 | 52 | 0.3319 | 0.1114 | 3.6            | 2.7              |
| 52     | 9  | 53 | 0.174  | 0.0886 | 4.35           | 3.5              |
| 53     | 53 | 54 | 0.203  | 0.1034 | 26.4           | 19               |
| 54     | 54 | 55 | 0.2842 | 0.1447 | 24             | 17.2             |
| 55     | 55 | 56 | 0.2813 | 0.1433 | 0              | 0                |
| 56     | 56 | 57 | 1.59   | 0.5337 | 0              | 0                |
| 57     | 57 | 58 | 0.7837 | 0.263  | 0              | 0                |



**Çizelge 3.15 : 10 baralı Hatay dağıtım ağının hat verileri.**

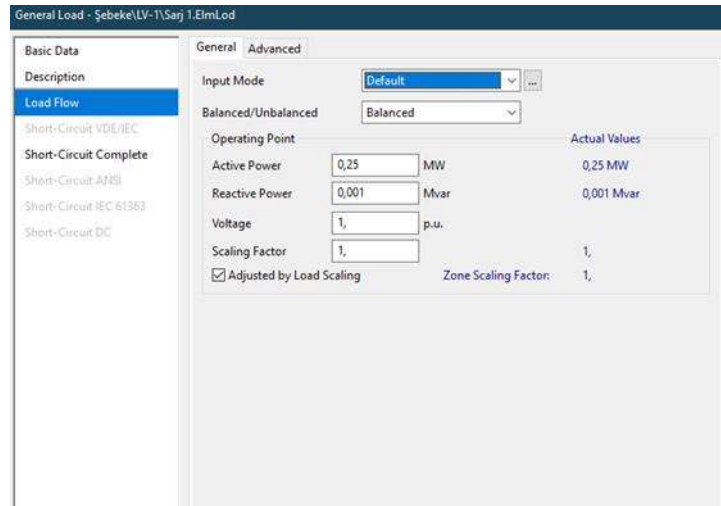
| nl | nr | R<br>(ohm/km) | X<br>(ohm/km) | B (μS/km) | km    |
|----|----|---------------|---------------|-----------|-------|
| 2  | 3  | 0.3366        | 0.373         | 4         | 16.75 |
| 3  | 4  | 0.3366        | 0.373         | 4         | 3.5   |
| 4  | 5  | 0.3366        | 0.373         | 4         | 16    |
| 2  | 7  | 0.3366        | 0.373         | 4         | 5.3   |
| 2  | 6  | 0.3366        | 0.373         | 4         | 5.3   |
| 6  | 12 | 0.3366        | 0.373         | 4         | 5.36  |

### 3.6 Tez Kapsamında Önerilen/Kullanılan Şarj İstasyonu Yerleşimi Problemleri

Bu tez çalışmasında şarj istasyonlarının yerleşimi problemi dört farklı problem üzerinde ele alınmıştır. Bu bölümde her bir problem detaylı olarak anlatılmıştır. Bu problemlerin uygulama sonuçları Bölüm 4 'te yer almaktadır.

#### 3.6.1 Problem 1: Örnek 42 baralı dağıtım ağına yerleşim problemi

Bu şarj istasyonu yerleşim probleminde dağıtım ağına toplam 330 adet aracın şarj/deşarj olacağı şarj üniteleri yerleştirilmesi hedeflenmektedir. Çalışmada her bir elektrikli araç ortalama 25 kW'lık, 3 fazlı bir yük olarak modellenmiştir. Bu doğrultuda bir senaryo durumu oluşturulmuştur. Bölüm 3.5.1, Şekil 3.8'de verilen her bir yük, 10 adet şarj ünitesini göstermektedir. Örneğin Yük1, 10 adet şarj ünitesini belirtmektedir. Şarj barasına ait bir yükün modeli Şekil 3.13'teki gibi modellenmiştir.



**Şekil 3.13 : 10 adet şarj ünitesine ait yük modeli.**

Şekil 3.9'da verilen LV-1/Tüketim barası normal dağıtım ağındaki tüketimin olduğu bara iken (ev, işyeri vb.), LV-1/şarj bara elektrik araçlarının şarj ünitelerinin ekleneceği bara olarak modellenmiştir.

Aşağıda belirtilen üç durum için bara gerilimleri, dağıtım ağına ait toplam durum ve trafo yüklenmeleri bilgileri hesaplanacaktır:

- Elektrikli şarj istasyonları devre değil iken
- Elektrikli şarj istasyonlarının tamamı devrede iken (kontROLSÜZ şarj)
- Kontrollü şarj (şebekenin maksimum kaldırabileceği elektrik araç sayısı tespit edilerek yapılan şarj) yapılırken

Bu problemin uygulanmasına ait bulgular ve tartışma bölüm 4.2’de sunulmuştur.

### 3.6.2 Problem 2: Newton Raphson tabanlı geliştirilen yeni bir model ile şarj istasyonu yerleşim problemi

Şarj istasyonlarının dağıtım ağlarına etkilerinin doğru bir şekilde ele alınabilmesi için belirlenmiş olan ölçekli model kapsamında şarj istasyonlarının konumlandırılması üzerine matematiksel bir model önerilmiştir. Bu matematiksel modele göre, dağıtım sistemindeki kısıtlar göz önünde bulundurularak dağıtım ağı boyunca verilen talepleri karşılayabilen kaç adet elektrikli araç şarj istasyonu eklenebileceği belirlenmiştir. Bu model basit bir matematiksel yaklaşıma dayalıdır. Bu modeldeki matematiksel yaklaşıma Newton Raphson ve GKİ metotları entegre edilmiştir. Bu model sayesinde basit ve etkili bir metot ile dağıtım sistemlerinde dağıtım baralarına kaç adet elektrikli araç şarj istasyonu entegre edilebileceğinin sayısı belirlenebilmektedir. Bu modele ait adımlar aşağıda sıralandığı gibidir:

Adım 1: İlgili güç sisteminin ilk adımında Newton Raphson metoduna göre yük akışı yapılarak, dağıtım sistemindeki hat kayıpları, dağıtım trafolarının yüklenmesi, ilgili hatların çektiği akım değerleri ve baralara ait gerilim değerleri belirlenir.

Sunulan modelde dikkate alınan kısıtlar Denklem 3.61-3.66 ile verilmiştir.

$$\text{Aktif güç } P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots Ng \quad (3.61)$$

$$\text{Reaktif güç } Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots Ng \quad (3.62)$$

$$\text{Bara gerilimi } V_i^{min} \leq |V_i| \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots Nb \quad (3.63)$$

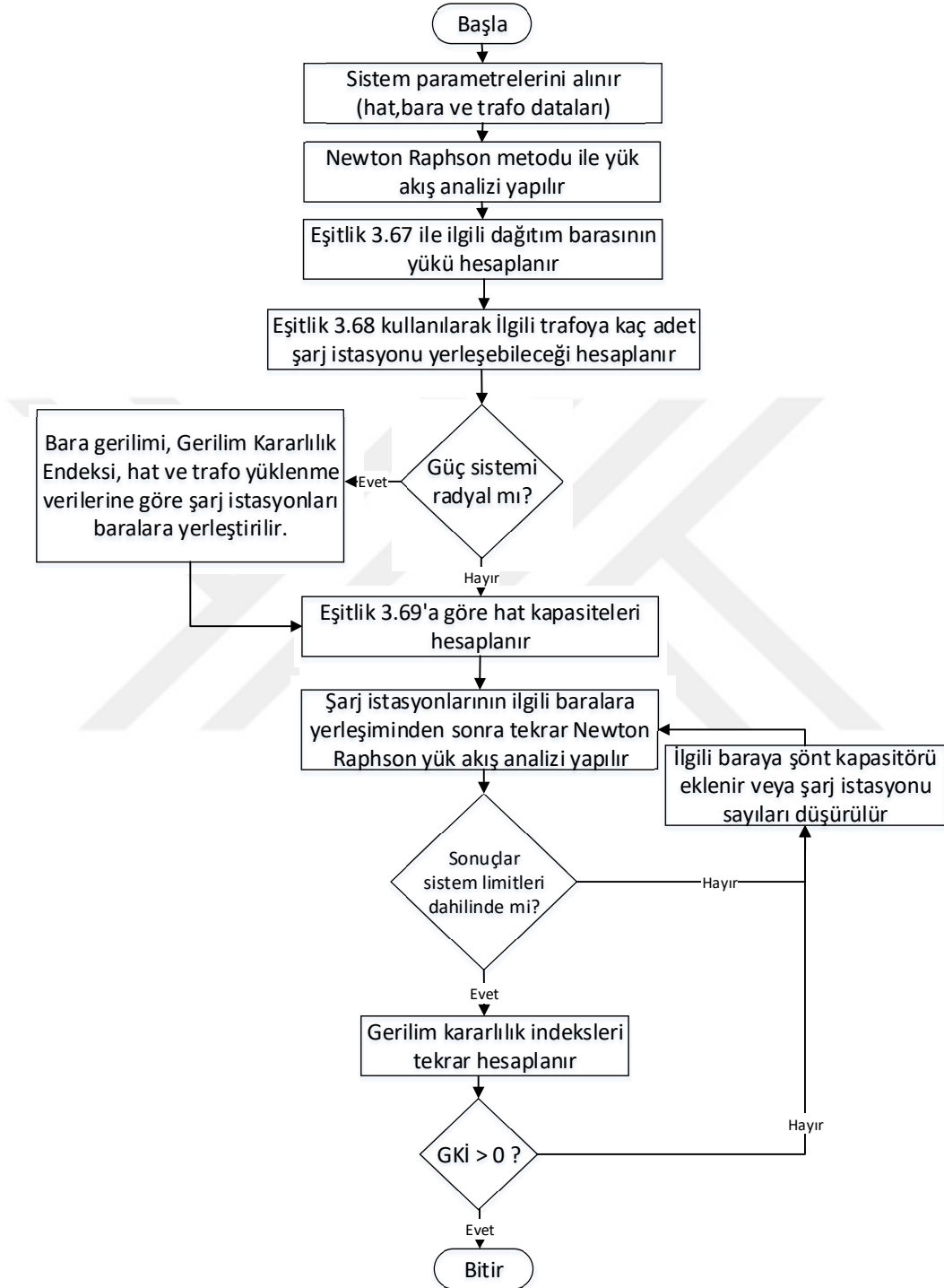
$$\text{Trafo sayısı } t_k^{min} \leq |t_k| \leq t_k^{max} \quad k = 1, 2, \dots Nt \quad (3.64)$$

$$\text{Hat gücü akışı } S_{Li} \leq S_{Li}^{max} \quad L_i = 1, 2, \dots Nb \quad (3.65)$$

$$\text{Reaktif kompanzasyon } Q_{ci}^{min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{max} \quad i = 1, 2, \dots Nc \quad (3.66)$$

Burada  $Nc$  reaktif kompanzasyon bara sayısı,  $Nt$ , kademe transformatörlerinin sayısı. Burada  $Gx$  salınım barası,  $NPQ$ ,  $NG$  ve  $NL$  sırasıyla yük barası, jeneratör barası ve iletim hatlarının sayısıdır.  $Q_C$ : i. baranın şönt kapasitörü;  $T$ : i. baranın kademe ayarı;  $S_L$ : i. baranın

hat akış limitleri;  $V_L$ : i. bara gerilimi (yük baraları);  $P_G$ : i. jeneratörün aktif güç üretimleri;  $Q_G$ : i. jeneratörün reaktif güç üretimi;  $V_G$ : i. baranın gerilimi (jenerasyon).  
Modelin işleyişini gösteren akış diyagramı Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.14 :** Önerilen metoda ait akış diyagramı.

Adım 2: Bu adımda ilgili dağıtım trafolarının verilerine ve mevcut dağıtım hattının kayıpları göz önüne alınarak bu dağıtım trafosunun ne kadarlık bir güç talebini karşılayabileceği

belirlenir (Burada hat kayıpları 1. Adım ile hesaplanır). Bu durumun matematiksel modeli Denklem 3.67’de verildiği gibidir.

$$dt_i ml(MW) - line_{loss}_k(MW) - maxload_i(MW) = remainload_i(MW) \quad (3.67)$$

Burada  $dt_i ml$ , i. dağıtım trafosunun maksimum yükünü (etiket değeri),  $line_{loss}_k$ , i. dağıtım trafosuna bağlı tüm hatların toplam kaybı (MW),  $maxload_i(MW)$  i. dağıtım trafosuna bağlı mevcut tüketicilerin (müşterilerin) çektiği maksimum yük.

Adım 3: Bu adımda 2. Adımda hesaplanan ilgili dağıtım trafosunun kalan yüküne göre ilave edilebilecek elektrikli araç şarj istasyonu adedi belirlenir. Adım 3’ün matematiksel karşılığı Denklem 3.68’de verilmiştir.

$$\frac{remainload_i(MW)}{cload(MW)} = n \quad (3.68)$$

Burada  $cload$  elektrikli araç şarj istasyonlarının toplam yük kapasitesini ve  $n$  elektrikli araç şarj istasyonu adedini belirtir.

Adım 4: Şayet radyal hat değilse Adım 4a’ya gidilir. Radyal Hat ise Adım 4b’ye gidilir.

Adım 4a: Her bir dağıtım trafosuna ilave edilecek şarj istasyonlarının kapasitesine göre bu dağıtım trafosu ve elektrikli araç şarj istasyonları arasındaki bağlantıyı sağlayacak hattın kapasitesi belirlenir. Hat kapasiteleri Denklem 3.69 ile belirlenir. Sonrasında ilgili hatlar ile şarj istasyonlarının entegrasyonu yapılır.

$$\sqrt{\frac{remainload_i}{R}} = I_{Ch,i} \quad (3.69)$$

Burada  $R$  ilgili hatta ait direnç değeri,  $I_{Ch,i}$  i. dağıtım trafosuna eklenecek şarj istasyonlarının olduğu bara ile bu dağıtım trafosu arasındaki iletim hattının taşıma kapasitesini belirtir.

Adım 4b: Radyal şebekelerde Adım 3’te hesaplanan şarj istasyonları, Adım 1’de hesaplanan bara gerilim değerlerine göre dağıtım baralarının gerilimi 1 p.u.’ya yakın olan (tercihen 0.97 pu üstü, 1.03 pu altı) ve bu adımda hesaplanan GKİ (şarj istasyonları eklenmeden GKİ hesaplanır) değeri 0.9 üzeri olan baralara eklenir.

Adım 5: Adım 4a ya da 4b’de ilgili baralara şarj istasyonları ilave edildikten sonra, bu modelde Newton Raphson metodu uygulanarak yük akışı analizi yapılır. Yük akış analizi sonucunda elde edilen trafo ve hat yüklenmelerinin istenilen limitlerde olup olmadığı kontrol edilir. Uygun limitlerde ise Adım 6’ya geçilir, değilse Adım 5a’ya geçilir.

Adım 5a: Bu adımda, Adım 5 sonrası yapılan yük akışına göre dağıtım sistemindeki baralar incelenir. Baraların gerilim seviyesi istenilen sınırların dışında ise ilgili baralara şönt kapasitör eklenir sonrasında tekrar Newton Raphson metodu uygulanır ve kısıtlar sağlanmış ise Adım 6’ya geçilir (Yoksa aynı adım tekrarlanır). Şönt kapasitör eklenme işlemi

gerçekleştirilmeyecekse ilgili bara yakınındaki dağıtım trafosuna bağlı elektrikli araç şarj istasyonlarının sayısı düşürülür veya arttırılır. Sonra tekrar yük akışı yapılarak kısıtlar sağlanırsa Adım 6'ya geçilir (Yoksa aynı adım tekrarlanır).

Adım 6: Newton Raphson metodu sonucu elde edilen ve güç sistemine ait verilere göre bu güç sisteminin GKİ verileri belirlenir. Tüm baralar için GKİ 0'dan büyük ise Adım 7'ye geçilir, diğer durumlarda ise Adım 5a'ya geçilir.

Adım 7: Bitir.

Bu problemin uygulanmasına ait bulgular ve tartışma bölüm 4.3'te sunulmuştur.

### **3.6.3 Problem 3: Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA) ile şarj istasyonu yerleşim problemi**

Çalışmanın bu bölümünde, elektrikli araç şarj istasyonlarının dağıtım ağı üzerindeki etkisi, güç kaybı, gerilim saptması ve GKİ değerleri ile incelenerek ve en dengeli ve uygun şekilde ilgili baralara yerleştirilmesi hedeflenmiştir.

Elektrikli araç şarj istasyonlarının dağıtım ağına optimum şekilde yerleştirilmesi, meydana gelebilecek gerilim profilinin bozulması, aktif güç kayıplarının artması, anlık yük artışları, iletim hatları ve trafoların aşırı yüklenmesi gibi olumsuz etkiler nedeniyle kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, bu çalışmada elektrikli araç şarj istasyonlarının dağıtım ağına etkisini mümkün olduğunca en aza indirmek için istasyonların en iyi lokasyonlara (belirli baralara) yerleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yerleştirme, standart AOA ve modifiye AOA kullanılarak çözülen güç kaybı, gerilim saptması ve GKİ'den oluşan bir indekse dayalı olarak gerçekleştirilir. Sonuç, dağıtım ağında elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılabilceği uygun baraları içermektedir.

#### **Matematiksel Formülasyon**

##### **Amaç fonksiyonu**

Yukarıda belirtilen indeks değerleri kullanılarak elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleşim probleminde kullanılacak çok amaçlı fonksiyon Denklem 3.70'te verilmiştir.

$$\min \left\{ w_1 \times f_1 + w_2 \times f_2 + \frac{w_3}{f_3} \right\} \quad (3.70)$$

Burada  $w_1$ ,  $w_2$  ve  $w_3$  ağırlık faktörleridir ve  $f_1$ ,  $f_2$  ve  $f_3$  fonksiyonlarının katsayılarını temsil eder. Aşağıda Denklem 3.71'de gösterilen amaç fonksiyonu  $f_1$ , güç kaybı değerini en aza indirmek için kullanılır.

$$f_1 = \min \left\{ \sum_{i=1}^{n_{branch}} I_i^2 R_i \right\} \quad (3.71)$$

Denklem 3.72'de gösterilen amaç fonksiyonu  $f_2$ , gerilim sapma değerinin minimizasyonunda kullanılır.

$$f_2 = \min \left\{ \sum_{i=1}^{n_{max}} (1 - V_i)^2 \times 100 \times MVAb \right\} \quad (3.72)$$

GKİ değerinin 0'dan büyük olması tercih edilir. Ancak bu değer ne kadar yüksek olursa sistemin kararlılığı o kadar iyi olur. GKİ değerini hesaplamak için, Denklem 3.73'teki amaç fonksiyonu kullanılır.

$$GKİ = \max \{ 2V_k^2 V_{k+1}^2 - 2V_{k+1}^2 (P_{k+1}r + Q_{k+1}x) - |Z|^2 (P_{k+1}^2 + Q_{k+1}^2) \} \quad (3.73)$$

Tüm GKİ değerleri arasında en düşük GKİ değeri, sistem kararlılığı açısından en zayıf halkayı temsil eder. Bu baranın en düşük GKİ değeri Denklem 3.74 ile bulunur. Sonrasında, Denklem 3.70'teki  $w_3$  sabiti bu değere bölünür.

$$f_3 = \min \{ GKİ \} \quad (3.74)$$

### Kısıtlamalar

Aşağıdaki kısıtlamalar (Denklem 3.75-3.78), dağıtım ağının minimum gerilimi, gücü ve gerilim kararlılığı dâhil olmak üzere optimum güç akışını sağlamak için kullanılır.

$$0 < GKİ_i \quad i = 1, 2, \dots, Ng \quad (3.75)$$

$$\text{Aktif güç } P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, Ng \quad (3.76)$$

$$\text{Reaktif güç } Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, Ng \quad (3.77)$$

$$\text{Bara gerilimi } V_i^{min} \leq |V_i| \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, Nb \quad (3.78)$$

$N$ , bara sayısı;  $P_i$ :  $i$  bara aktif gücü;  $Q_i$ :  $i$ . baranın reaktif gücü;  $V_i$ :  $i$ . baranın gerilimi.

Bu problemin uygulanmasına ait bulgular ve tartışma bölüm 4.4'te sunulmuştur.

### 3.6.4 Problem 4: Elektrikli otobüsler için şarj istasyonu yerleşim problemi

Bu tez çalışmasının 1. bölümde sunulan literatür çalışmaları incelendiğinde güç kaybı, gerilim sapsmaları ve gerilim kararlılığı indeksi parametreleri, elektrikli otobüsler için şarj istasyonlarının güç etkisini değerlendirmek amacıyla birlikte kullanılmamıştır. Bu bölümde önerilen çalışmada, güç etkilerinin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesi için tüm parametrelerden yararlanılmıştır. Güç kalitesi üzerindeki etkisinin yanı sıra nüfus

yoğunluğu, trafik yoğunluğu, şarj istasyonlarının konum maliyeti, İÇN'lere yakınlık ve otobüsün tüketimi gibi parametreleri de içeren bir çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Sunulan çalışmada çalışmaya özgünlük katmak için tüketim parametresi de kullanılmıştır. Bu parametre, optimum şarj istasyonları yerleşimi sağlamada bir kısıt olarak kullanılmış olup elektrikli otobüslerin duraklar arasında enerjisinin bitmemesi ve daha planlı bir şarj stratejisi belirlenmesine yardımcı olur.

Bu nedenle bu çalışmada elektrikli otobüsler için şarj istasyonlarının dağıtım ağında belirlenen parametrelere göre entegre edilebileceği en uygun lokasyonu belirleyen bir yöntem önerilmektedir. Yöntemde mevcut dağıtım sistemini değiştirmeye veya herhangi bir ek altyapı yatırımı yapmaya gerek kalmadan konum önerilir. İlgili parametrelerin ağırlıkları karar vericiler tarafından kurumun ihtiyacına göre şekillendirilebilir. Yöntem bu açıdan bir esneklik sağlamaktadır.

### **Problem tanımı**

Bu çalışmada elektrikli otobüsler için şarj istasyonları, şarj işleminin dağıtım ağına olumsuz etkilerini minimize etmek için çok amaçlı bir fonksiyon kullanılarak güç, sosyal ve çevresel açılardan hesaplanan indeks değerine göre ilgili baralara yerleştirilmiştir. Problemin karar değişkenleri, şarj istasyonlarının kurulacağı belirli baralardır. Güç kaybı, gerilim sapması ve GKİ parametreleri güç kalitesini hesaplamada kullanılmaktadır.

### **Matematiksel Formülasyon**

#### **Sosyal ve Çevresel Parametreler**

Nüfus, trafik yoğunluğu, İÇN'lere yakınlık ile ilgili veriler her aday bara için tablo halinde hazırlanır. Ayrıca bu tablo, aday baranın rakımını, yolcu yükünü ve şarj istasyonlarının kurulabileceği alanın arazi maliyetini içerir.

Elektrikli otobüslerin iki durak arasında şarjının bitmesini önlemek için enerji tüketimi hesaplanır. [181] nolu çalışmada, operasyonel, topografik ve dış parametreler dikkate alınarak elektrikli otobüslerin tüketimi araştırılmıştır. Çalışmada, makine öğrenmesi ve istatistiksel modelleri içeren yedi veri tabanlı model karşılaştırılmış ve çalışma sonunda çoklu doğrusal regresyon (MLR) ve destek vektör makineleri (SVM) tekniklerinin en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Bu nedenle çalışmamızda elektrikli otobüslerin tüketimini hesaplamak için Denklem 3.79'daki formül kullanılmıştır.

$$EC_i = \beta_0 + \beta_1 g + \beta_2 D_{Agg} + \beta_3 Road_c + \beta_4 HVAC + \beta_5 Psngr_{Load} + \beta_6 Stop_{den} + \beta_7 V_a + \beta_8 SoC_i + \beta_9 C_d + \varepsilon_i \quad (3.79)$$

Burada  $EC_i$  i'inci rotadaki enerji tüketimini,  $g$  yolun eğimini,  $Dr_{Agg}$  sürücünün agresiflik

seviyesini,  $Road_c$  yolun durumunu,  $HVAC$  havalandırma sistemi tarafından tüketilen enerjiyi,  $Psngr_{Load}$  yolcu yoğunluğunu,  $Stop_{den}$  duraklar arası durma yoğunluğunu,  $V_a$  ortalama hızı,  $SoC_i$  şarj seviyesini ve  $C_d$  sürtünme katsayısını temsil etmektedir. Tüketim modelinde  $SoC$  değerinin kullanılmasının nedeni, elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme sırasında üretilen enerjinin ya hiç oluşmaması ya da şarj seviyesi yüksekken minimum düzeyde oluşmasıdır.  $\epsilon_i$ , i. rastgele hatadır.  $\beta_0$  sabit katsayıdır ve  $\beta_1$ -  $\beta_9$  ilgili katsayıları temsil eder. Bu değerler Çizelge 3.16'da gösterilmiştir.

**Çizelge 3.16 : MLR Katsayıları.**

| $\beta_0$ | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ | $\beta_4$ | $\beta_5$ | $\beta_6$ | $\beta_7$ | $\beta_8$ | $\beta_9$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| -0.885    | 0.38      | 0.065     | 0.26      | 0.036     | 0.005     | 0.128     | 0.007     | 0.012     | 0.173     |

Modelin parametreleri aşağıdaki Çizelge 3.17'de verilmiştir.

**Çizelge 3.17 : Model parametreleri.**

| Parametre türü                      | Değer |
|-------------------------------------|-------|
| Pilin Başlangıç Şarj Durumu (%)     | 100   |
| Maks. Tork (Nm)                     | 2500  |
| Pil Kapasitesi (kWh)                | 200   |
| Ön alan (m <sup>2</sup> )           | 8.32  |
| Lastiklerin Dinamik Yarıçapı (m)    | 0.5   |
| Dişli Oranı                         | 4.66  |
| Boş Ağırlık (kg)                    | 14860 |
| Şarj Verimliliği                    | 0.978 |
| Gidiş-Dönüş Verimliliği             | 0.971 |
| Motor Verimliliği                   | 0.916 |
| Deşarj Verimliliği                  | 0.992 |
| Sürtünme Katsayısı                  | 0.6   |
| Yuvarlanma Direnci                  | 0.01  |
| Hava Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> ) | 1.27  |
| Ortam Sıcaklığı (o)                 | 20    |
| Klima (kW)                          | 0     |
| Yardımcı Güç (kW)                   | 0     |

### Amaç fonksiyonu

Elektrikli otobüslerin şarj istasyonlarının yerleşimi probleminde kullanılan ağırlıklı toplam çok amaçlı fonksiyon Denklem 3.80'de gösterilmiştir.

$$index1 = \min\{w_1 \times (p \times f_1 + f_2 + f_3)\}; index2 = \max\{w_2(d_1 + d_2 + d_3 - d_4 - c)\} \quad (3.80)$$

Burada,  $w_1$  güç kalitesi için ve  $w_2$  sosyal ve çevresel açıdan bir ağırlık faktörüdür,  $f_1, \dots, f_n$ ,  $n=1, \dots, 3$  fonksiyonları ve  $d_1, \dots, d_n$ ,  $n=1, \dots, 4$  nüfus, trafik, cazibe noktalarını (İÇN) ve arazi maliyeti bilgisi verilerini temsil eder.  $c$ , aday konumlar arasında elektrikli otobüsün

enerjisinin bitmesi durumunda kullanılan ceza değeridir.  $p$ , güç kaybını GKİ ve gerilim sapma parametrelerine göre önceliklendirmek için isteğe bağlı bir ağırlıktır. Ağırlıklar eşit olarak veya durumlara verilen öneme göre seçilebilir. Böylece sonuca doğrudan katkı sağlayacak bazı parametrelerin öne çıkarılması amaçlanmaktadır. Güç etkisi *index1* değeri ile hesaplanır. *index1*'in optimum değeri, güç kaybı ve gerilim sapma değerlerinin minimum, GKİ değerinin ise maksimum düzeyde olduğu zamandır. *index2* ile maksimum sosyal ve çevresel faktörlere sahip baraların hesaplanması amaçlanmaktadır. İki amaç fonksiyonu Denklem 3.81'deki gibi birleştirilmiştir.

$$F = \min\{index1 - index2\} \quad (3.81)$$

Fonksiyonların standart bir aralıkta olmaması ve değerlerinin birbirinden çok farklı olması toplam içindeki ağırlıkların etkileyecektir. Bu nedenle, veriler Denklem 3.82'deki gibi 0 ile 1 arasında olacak şekilde normalize edilir.

$$f_{i\ norm} = \left\{ \frac{f_i - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} \right\} ; d_{j\ norm} = \left\{ \frac{d_j - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \right\} \quad (3.82)$$

Burada,  $f_1, \dots, f_i$ ,  $i=1, \dots, 3$  ve  $d_1, \dots, d_j$ , fonksiyonlarını temsil eder  $j=1, \dots, 4$ .  $f_1$  toplam güç kaybı değerini en aza indirmek için kullanılır ve Denklem 3.83'te gösterilmiştir:

$$f_1 = \min \left\{ \sum_{i=1}^{n_{branch}} \frac{1}{i^2} R_i \right\} \quad (3.83)$$

Gerilim sapmasını en aza indirme işlevi, Denklem 3.84'te gösterilen  $f_2$  ile hesaplanır.

$$f_2 = \min \left\{ \sum_{i=1}^{n_{max}} (1 - V_i)^2 \times 100 \times MVAb \right\} \quad (3.84)$$

Daha yüksek GKİ değeri, daha iyi sistem kararlılığını gösterir. GKİ, Denklem 3.85 ile hesaplanır.

$$GKI = \max\{|V_k|^4 - 4(P_{k+1}X_k - Q_{k+1}R_k)^2 - 4(P_{k+1}R_k + Q_{k+1}X_k)^2|V_k|^2\} \quad (3.85)$$

En düşük GKİ değerine sahip bara en zayıf halka olup çökme eğilimine sahiptir. Bu nedenle, tüm GKİ değerleri arasında bu değeri maksimize eden bir fonksiyon, Denklem 3.86 ile bir minimizasyon fonksiyonu olarak yazılabilir.

$$f_3 = \min\{-VSI_{min}\} \quad (3.86)$$

İki aday bara arasında elektrikli otobüsün bataryadaki enerjisinin bitme olasılığını hesaplamak için hedef duraktaki şarj durumu (*State of charge – SoC*) hesaplanmalıdır. İlk olarak kalkış ve varış durakları arasında tüketilecek enerji miktarı hesaplanır. Ardından, kalan *SoC*, Denklem 3.87 ile hesaplanır.

$$SoC_{rm(i,j)} = SoC_i - \sum_i^j (\beta_0 + \beta_1 g + \beta_2 D_{Agg} + \beta_3 Road_c + \beta_4 HVAC + \beta_5 Psngr_{Load} + \beta_6 Stop_{den} + \beta_7 V_a + \beta_8 SoC_i + \beta_9 C_d + \varepsilon_i) / Cap_{battery} \quad (3.87)$$

$SoC_{rm(i,j)}$  istasyonlar arasında seyahat ettikten sonra kalan  $SoC$ 'yi belirtir.  $SoC_i$ , kalkış durağındaki şarj yüzdesini temsil eder. Varış istasyonunda kalan şarj seviyesi ( $SoC_{rm(i,j)}$ ) kritik seviyenin ( $SoC_{cr}$ ) altına düşerse ve bir sonraki istasyonda şarj istasyonu yoksa ceza uygulanır. Bu durum Denklem 3.88'de gösterilmiştir.

$$c = \begin{cases} 0, & SoC_{cr} > SoC_{rm(i,j)} \text{ and } EV_i = 1 \\ 0, & SoC_{cr} < SoC_{rm(i,j)} \\ M, & SoC_{cr} > SoC_{rm(i,j)} \text{ and } EV_i = 0 \end{cases} \quad (3.88)$$

$EV_i$ , aday konumların matrisini,  $M$ , ceza olarak uygulanan büyük bir sayıdır. Çalışmada otobüs durağı olsun ya da olmasın herhangi bir baraya şarj istasyonu konulabilir. Elektrikli otobüsleri, otobüs durağı olmayan bir yerde şarj etmek operasyonel esneklik açısından dikkate alınmıştır. Bu, beklenmedik enerji tüketimi, bataryanın bitmesi, elektrikli otobüslerin park edilmesi veya kullanılmadıklarında şarj istasyonlarının halka açılması gibi farklı durumlarda uygulanabilir. Aksi takdirde, yolcular araçta iken servis sırasında elektrikli otobüslerin şarj olması operasyonel olarak mümkün değildir. Bu nedenle güzergâh ayarlamaları yapılırken ilk ve son istasyonlar ile ara istasyonların seçimi dikkatli yapılmalı ve otobüs sadece yolcu taşımadığı zamanlarda şarj edilmelidir.

### Kısıtlamalar

Aşağıdaki kısıtlamalar (Denk. 3.89-3.92), dağıtım ağının minimum gerilimi, gücü ve gerilim kararlılığı dâhil olmak üzere optimum güç akışını sağlamak için kullanılır.

$$0 < GK\dot{I}_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.89)$$

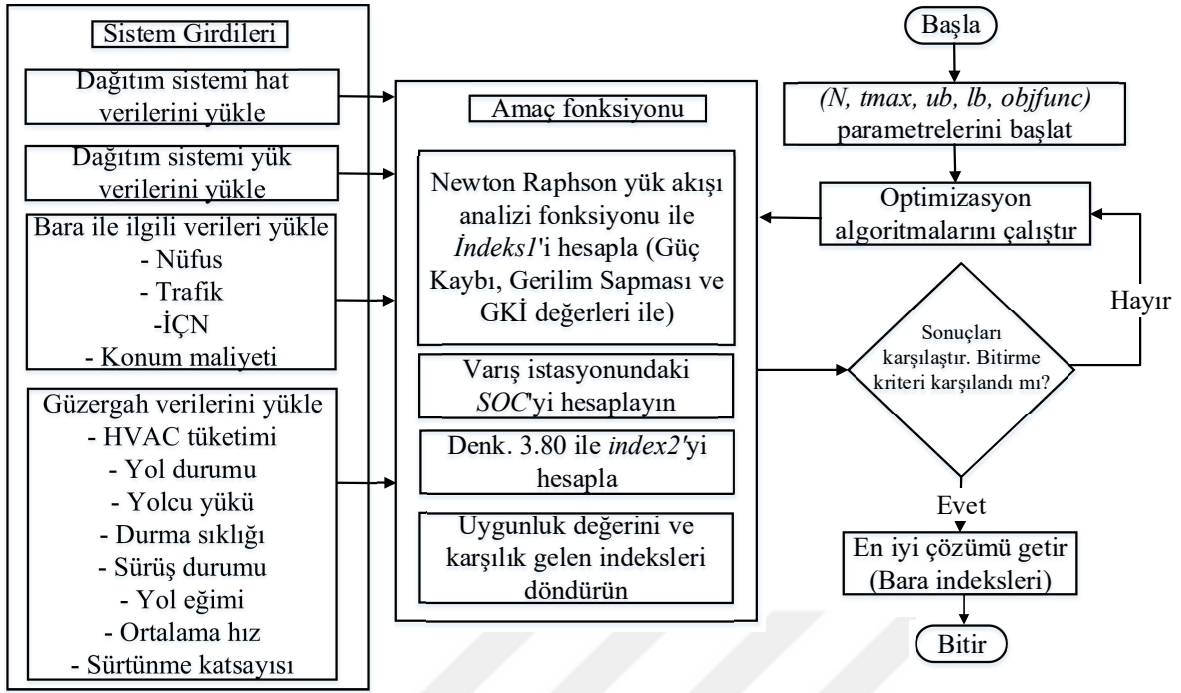
$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.90)$$

$$Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.91)$$

$$V_i^{min} \leq |V_i| \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.92)$$

$N$  bara sayısını;  $P_i$ : i. baranın aktif gücünü;  $Q_i$ : i. baranın reaktif gücünü;  $V_i$ : i. baranın gerilimini temsil eder.

Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3.15 : Önerilen yöntemin akış şeması.

Bu problemin uygulanmasına ait bulgular ve tartışma bölüm 4.5'te sunulmuştur.

### 3.7 Tez Kapsamında Kullanılan İstatistiksel Yöntemler

#### 3.7.1 Shapiro-Wilk (SW) testi

Önerilen algoritmayı diğer algoritmalarla istatistiksel olarak karşılaştırmak için en uygun yöntemi belirlemek amacıyla normallik testi yapılır. Bu amaçla Shapiro-Wilk (SW) testi kullanılmıştır.

#### 3.7.2 Friedman testi

Shapiro-Wilk (SW) testi sonuçlara dayalı olarak, her iterasyonda üretilen algoritma hatalarının karşılaştırılmasında Friedman testinin kullanılıp kullanılmayacağına karar verilir. Friedman testi, istatistiksel bir anlamlılık olup olmadığını kontrol etmek amacıyla algoritma hatalarının karşılaştırıldığı parametrik olmayan bir istatistiksel testir [182].

#### 3.7.3 Wilcoxon rank-sum testi

Wilcoxon sıra toplamı testi, algoritmaların ikili karşılaştırmalarını yapmak için post hoc testi olarak kullanılmıştır.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Doktora tez çalışmasının bu bölümünde, Bölüm 3'te belirtilen yöntemlerin problemlere uygulanması sonucunda elde edilen bulgular ve tartışmalar sunulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak elektrikli araç şarj istasyonlarının en uygun şekilde yerleştirilmesi için iki yeni modifiye Arşimet optimizasyon algoritması (MAOA ve MDAOA)'nın etkinliği test edilmiştir. Performans analiz testleri;13 standart kıyaslama fonksiyonu, 29 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonu, beş gerçek hayat mühendislik problemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test kapsamında, önerilen modifiye algoritmaların etkinliği, modern ve rekabetçi algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Burada optimizasyon yöntemine geçişe hazırlamak için öncelikle Problem 1-2'de deterministik yöntemler incelenmiş sonrasında Problem 3-4'te optimizasyon yöntemine geçilmiştir. Bu bağlamda, Şİ Yerleşiminin Örnek 42 baralı dağıtım ağına uygulanması (Problem 1) ve Newton Raphson tabanlı geliştirilen yeni bir model ile Şİ yerleşimi (Problem 2) problemlerine 3.bölümde önerilen yöntemler uygulanmıştır. Daha sonra bu bölümde etkinliği test edilen Modifiye AOA algoritmaları Şİ Yerleşimi problemine (Problem 3) uygulanmıştır. Son olarak bu bölümde, elektrikli otobüslerin şarj istasyonlarının dağıtım ağı üzerinde elektriksel, sosyal ve çevresel özelliklere göre en uygun şekilde yerleştirilmesini sağlayan yöntem test dağıtım ağları üzerinde test edilmiştir.

##### 4.1 Modifiye AOA(MAOA ve MDAOA)'nın Kıyaslama Fonksiyonlarına Uygulanması

MAOA ve MDAOA algoritmalarının etkinliği, standart kıyaslama fonksiyonları, CEC 2017 test paketi ve beş mühendislik problemi olmak üzere üç fonksiyon grubunda değerlendirilmiştir

AOA ve Modifiye AOA algoritmalarına ek olarak, formüle edilen amaç fonksiyonu, iyi bilinen eski algoritmaların yanı sıra çeşitli kıyaslama fonksiyonları (CEC, mühendislik ve standart) kullanılarak etkinliği kanıtlanmıştır. Çalışmada kullanılan yeni optimizasyon algoritmaları şunlardır: Bal Porsuğu Algoritması (BPA-2021), Sinüs Kosinüs Algoritması (SKA-2016), Kelebek Optimizasyon Algoritması (KOA-2019), Hibrit Parçacık Sürü Optimizasyonu Kelebek Optimizasyon Algoritması (HPSOKOA-2020), Altın Çakal Optimizasyonu (AÇO-2022), Balina Optimizasyon Algoritması (BOA-2016), Karınca Aslanı Optimizasyonu (KAO-2015), Salp Sürü Algoritması (SSA-2017), Atomik Yörünge Arama Algoritması (AYAA-2021) [118,122–125,133,183,184].

Tutarlılığı sağlamak için tüm algoritma değerlendirmeleri 30 kez çalıştırılmış ve maksimum iterasyon sayısı 1000 olarak ayarlanmıştır. ( $t_{max}=1000$ ). Karşılaştırmada kullanılan algoritmalar için parametreler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

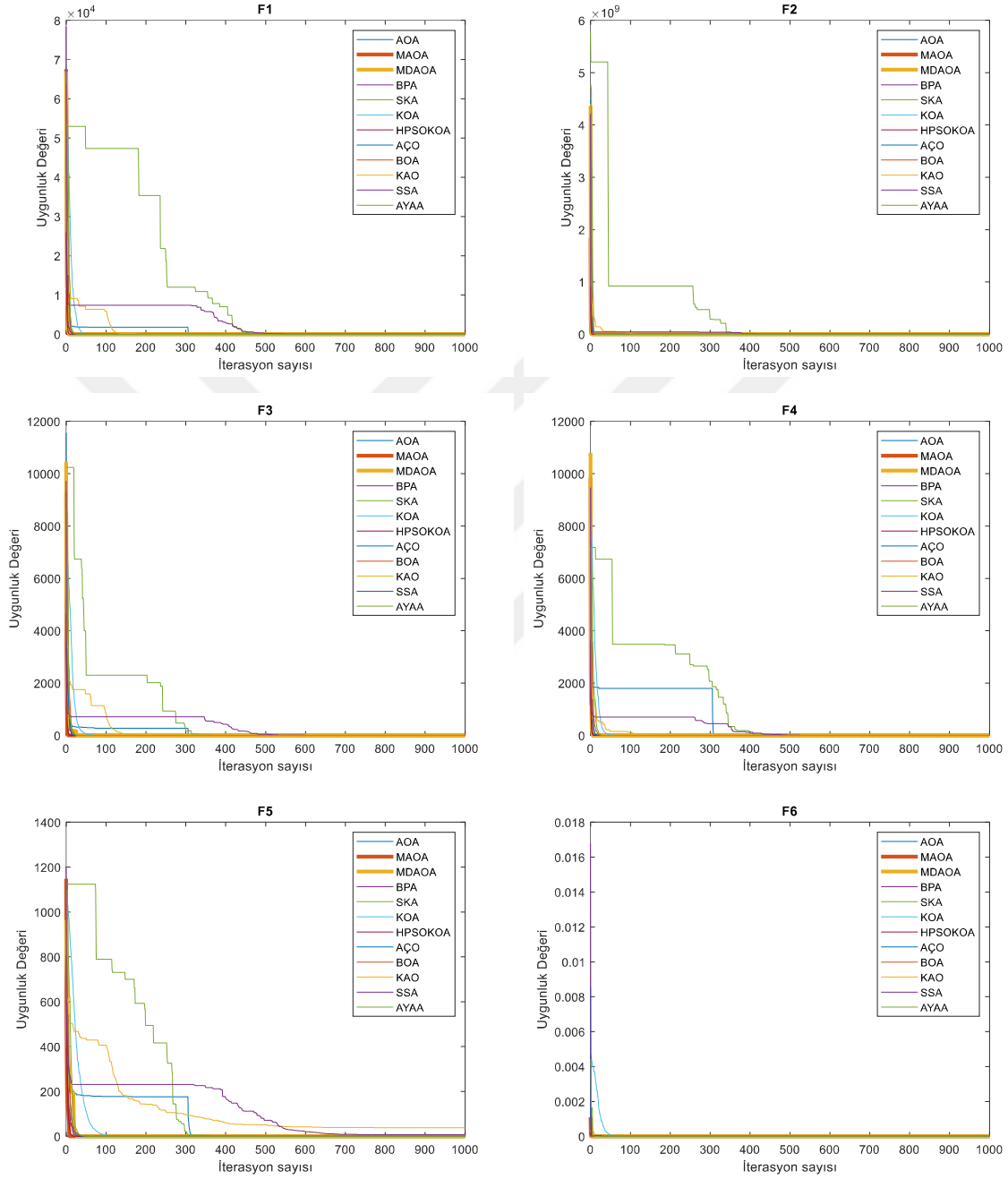
**Çizelge 4.1 : Karşılaştırmada kullanılan algoritmalar için parametreler.**

| Algoritma | Kullanılan parametreler                                                                                                                                                                                                            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AOA       | Obje sayısı= 50<br>C1 = 2,<br>C2 = 6<br>C3=2; C4=0.5; (CEC ve mühendislik problemleri)<br>C3=1; C4=2; (Standart Optimizasyon fonksiyonları)                                                                                        |
| BPA       | Bal porsuğu sayısı= 50<br>$\beta$ (Bal porsuğunun yiyecek bulabilme kabiliyeti) =6<br>C = 2                                                                                                                                        |
| SKA       | Popülasyon sayısı= 50,<br>a = 2,<br>$r_1(0) = 2$ ( $r_1$ lineer olarak a'dan 0'a azalmaktadır)                                                                                                                                     |
| KOA       | Popülasyon sayısı= 50,<br>p=0.8 (ihtimal anahtarı)<br>Güç üs değeri=0.1 (a'nın başlangıç değeri)<br>Duyusal kip=0.01 (c'nin başlangıç değeri)                                                                                      |
| HPSOKOA   | Kelebek sürü sayısı =50<br>$c_1 = c_2 = 0.5$<br>w = 0.7 (Eylemsizlik faktör sayısı)<br>p = 0.6 (İhtimal faktör sayısı)<br>Güç üs değeri=0.1 (a'nın başlangıç değeri)<br>Duyusal kip=0.01 (c'nin başlangıç değeri)<br>$V_{max} = 1$ |
| AÇO       | Av popülasyonu=50<br>$c_1 = 1.5$                                                                                                                                                                                                   |
| BOA       | Balina popülasyon sayısı = 50<br>a = değişken, lineer olarak 2'den 0'a azalmaktadır<br>b=1                                                                                                                                         |
| KAO       | Popülasyon sayısı= 50,                                                                                                                                                                                                             |
| SSA       | Salp popülasyonu sayısı= 50,                                                                                                                                                                                                       |
| AYAA      | Popülasyon sayısı= 50,<br>Katman sayısı = 5 (Çekirdek etrafındaki maksimum katman sayısı)<br>Foton oranı = 0.1 (Elektronların lokasyonlarını belirlemek için Foton oranı)                                                          |

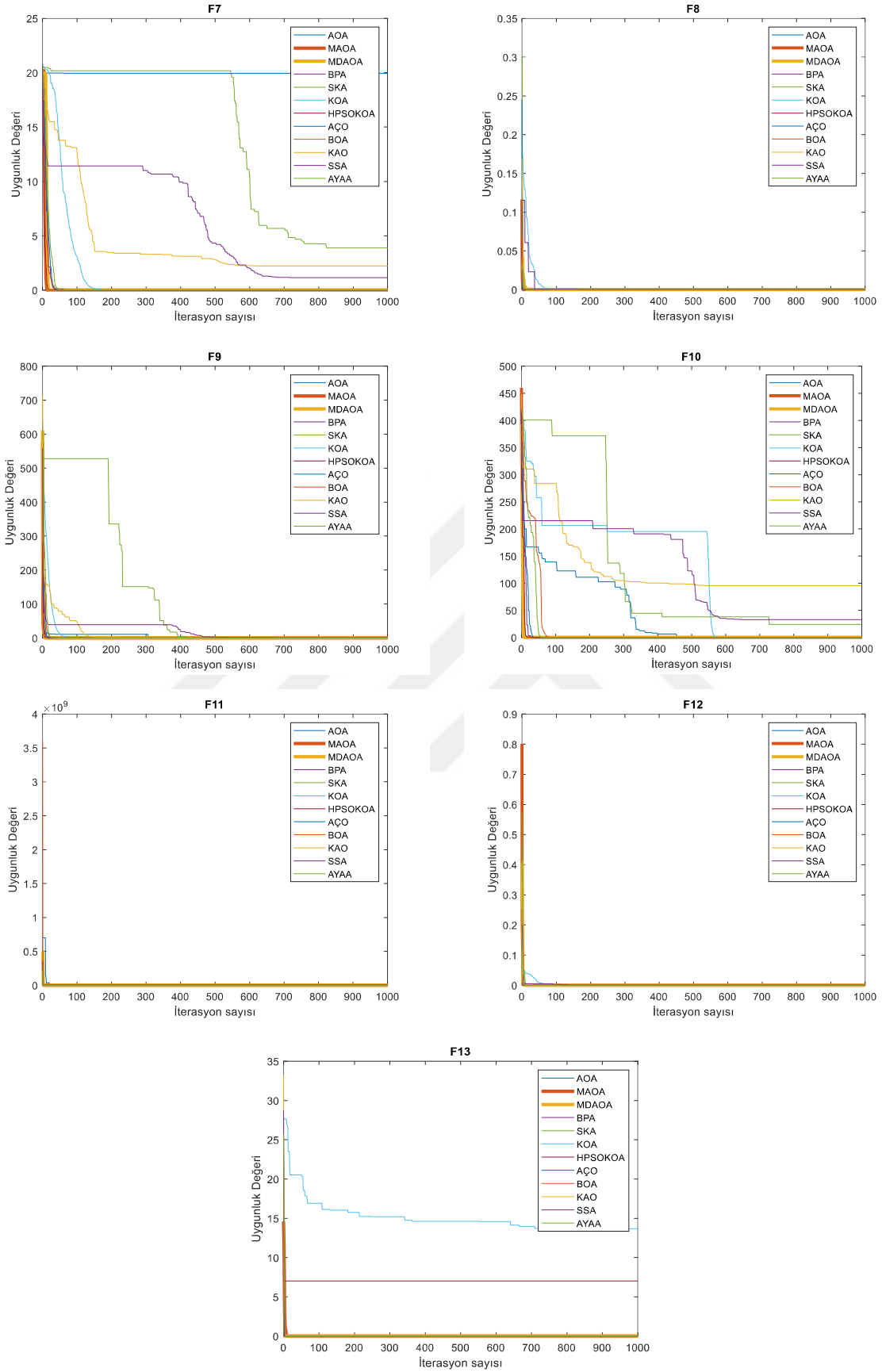
Karşılaştırılan optimizasyon algoritmalarının Matlab programlaması, Matlab File Exchange'den alınmıştır. Algoritmaların karşılaştırmaları, Microsoft Windows 10 işletim sistemi ortamında MATLAB R2019 sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1.1 Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA)’nın standart kıyaslama fonksiyonlarına uygulanması

Şekil 4.1, 13 standart kıyaslama fonksiyonunun yakınsama eğrisi grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.1 : Standart kıyaslama fonksiyonunun yakınsama eğrisi grafikleri.



Şekil 4.1 (devam) : Standart kıyaslama fonksiyonunun yakınsama eğrisi.

13 standart kıyaslama fonksiyonu 11 algoritma kullanılarak 1000 iterasyon ile 30 kez çalıştırmıştır. Elde edilen ortalama, standart sapma, medyan ve maksimum değerler Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çalışmadaki çözüm kümelerinden karşılaştırma bilgileri çıkarmak için iki hipotez tanımlanmıştır: sıfır hipotezi  $H_0$  ve alternatif hipotez  $H_1$ .  $H_0$ , karşılaştırılan algoritmaların medyan hatalarının aynı ve sıfıra eşit olduğunu belirtirken,  $H_1$ , karşılaştırılan algoritmaların medyan hatalarından en az birinin diğerlerinden aynı olmadığını ve sıfırdan farklı olduğunu öne sürmektedir. İstatistiksel anlamlılık düzeyi ( $\alpha$ ), hipotezin kabul edilip edilmeyeceğine veya reddedileceğine karar vermek için tanımlanan bir eşik değeridir. Bu çalışmada anlamlılık düzeyi 0.05 olarak kabul edilmiştir.

İstatistiksel olarak en uygun yöntemi belirlemek amacıyla başvurulmuş Shapiro-Wilk (SW) normallik testi sonucunda, elde edilen verilerin normal dağılıma sahip olmadığı görülmüştür. Bu yüzden [122,128,133,138,149,185]'deki çalışmalara benzer şekilde her iterasyonda üretilen algoritma hatalarının karşılaştırılmasında Friedman testi kullanılmıştır [182]. Ortalama değerler Çizelge 4.2'de gösterilmektedir. Daha sonra, [120,126,127,129,133,138]'deki çalışmalara benzer şekilde algoritmaların ikili karşılaştırmalarını yapmak için post hoc testi olarak Wilcoxon Rank toplamı testi kullanılır. Başka bir deyişle iki çözüm seti istatistiksel olarak anlamlı olan medyan değerlerine göre karşılaştırılır. P değeri 0.05 olarak belirlenen anlamlılık seviyesinden düşükse algoritmalar istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar verir. Hesaplanan P değerleri, MAOA ile diğer algoritmalar ve MDAOA ile diğer algoritmalar olmak üzere her bir fonksiyon için iki satır halinde Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Sonuçlar, MAOA ve MDAOA'nın toplam 13 standart kıyaslama işlevinden 12'sinde en iyi sonuçları sağlayabildiğini göstermektedir. 11 nolu fonksiyonda MAOA daha iyi sonuç üretirken, MDAOA ikinci en iyi sonucu bulmuştur. 5 nolu fonksiyonda ise MDAOA en iyi sonucu hesaplamış, MAOA ise en yakın ikinci sonucu bulmuştur. 1 nolu fonksiyonda MAOA ve MDAOA en iyi sonucu hesaplamış ve diğer algoritmalar global minimum değerine ulaşamamıştır. Ayrıca, ortalama standart sapma değerleri, diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında fonksiyonların çoğunda daha iyi performans sergilemiştir.

**Çizelge 4.2 : 13 standart kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

| Fon | Ölçüm        | AOA      | MAOA            | MDAOA           | BPA             | SKA      | KOA      | HPSOKOA   | AÇO       | BOA             | KAO      | SSA      | AYAA      |
|-----|--------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------------|----------|----------|-----------|
| 1   | Ort.         | 1,39E+03 | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | 7,36E-297       | 8,86E-03 | 1,06E-13 | 8,86E-118 | 6,46E-127 | 1,05E-165       | 6,98E-07 | 9,61E-09 | 3,59E-148 |
|     | Std. Sapma   | 4,03E+02 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 3,78E-02 | 6,80E-15 | 2,46E-117 | 2,73E-126 | 0,00E+00        | 7,43E-07 | 1,45E-09 | 1,96E-147 |
|     | Medyan       | 1,33E+03 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 1,37E-302       | 1,57E-04 | 1,04E-13 | 5,32E-119 | 1,50E-129 | 2,69E-178       | 4,03E-07 | 9,90E-09 | 9,90E-153 |
|     | Maksimum     | 2,06E+03 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 2,09E-295       | 2,08E-01 | 1,20E-13 | 1,22E-116 | 1,45E-125 | 3,15E-164       | 3,16E-06 | 1,34E-08 | 1,08E-146 |
|     | P (Wilcoxon) | <,001    |                 | 1               | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     | <,001     | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     |
| 2   | P (Wilcoxon) | <,001    | 1               |                 | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     | <,001     | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     |
|     | Ort.         | 2,02E+06 | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | 9,53E-06 | 1,21E-16 | 3,20E-249 | 6,14E-255 | <b>0,00E+00</b> | 1,89E-13 | 7,77E-17 | 1,93E-290 |
|     | Std. Sapma   | 1,54E+06 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 3,52E-05 | 9,10E-18 | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00        | 3,55E-13 | 3,35E-17 | 0,00E+00  |
|     | Medyan       | 1,80E+06 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 6,56E-09 | 1,20E-16 | 7,82E-253 | 1,40E-259 | 0,00E+00        | 7,92E-14 | 7,28E-17 | 1,48E-302 |
|     | Maksimum     | 8,32E+06 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 1,71E-04 | 1,36E-16 | 6,18E-248 | 1,10E-253 | 0,00E+00        | 1,56E-12 | 1,73E-16 | 5,79E-289 |
| 3   | P (Wilcoxon) | <,001    |                 | 1               | 1               | <,001    | <,001    | <,001     | <,001     | 1               | <,001    | <,001    | <,001     |
|     | P (Wilcoxon) | <,001    | 1               |                 | 1               | <,001    | <,001    | <,001     | <,001     | 1               | <,001    | <,001    | <,001     |
|     | Ort.         | 1,80E+02 | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | 4,88E-300       | 1,43E-04 | 1,01E-13 | 4,23E-116 | 1,48E-128 | 1,60E-173       | 3,88E-01 | 8,34E-02 | 8,79E-147 |
|     | Std. Sapma   | 5,71E+01 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 4,15E-04 | 6,04E-15 | 9,30E-116 | 5,34E-128 | 0,00E+00        | 5,66E-01 | 2,12E-01 | 4,81E-146 |
|     | Medyan       | 1,64E+02 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 3,14E-303       | 6,87E-06 | 1,01E-13 | 1,77E-117 | 1,61E-130 | 4,05E-180       | 1,02E-01 | 2,04E-02 | 3,37E-154 |
| 4   | Maksimum     | 3,45E+02 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 1,17E-298       | 2,03E-03 | 1,14E-13 | 3,95E-115 | 2,67E-127 | 3,91E-172       | 1,92E+00 | 1,17E+00 | 2,64E-145 |
|     | P (Wilcoxon) | <,001    |                 | 1               | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     | <,001     | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     |
|     | P (Wilcoxon) | <,001    | 1               |                 | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     | <,001     | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     |
|     | Ort.         | 1,17E+03 | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | 1,14E-184       | 3,44E-01 | 7,00E-14 | 2,65E-116 | 1,19E-07  | 9,57E-07        | 9,89E-01 | 7,35E-01 | 7,42E-28  |
|     | Std. Sapma   | 9,05E+02 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 8,27E-01 | 6,20E-15 | 4,91E-116 | 6,13E-07  | 2,15E-06        | 5,20E-01 | 3,88E-01 | 4,06E-27  |
|     | Medyan       | 1,20E+03 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 5,89E-219       | 3,48E-02 | 6,97E-14 | 4,11E-117 | 9,28E-12  | 6,34E-08        | 9,25E-01 | 7,12E-01 | 1,82E-71  |
|     | Maksimum     | 3,46E+03 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 3,18E-183       | 3,71E+00 | 8,28E-14 | 2,41E-115 | 3,36E-06  | 1,02E-05        | 2,20E+00 | 1,75E+00 | 2,22E-26  |
|     | P (Wilcoxon) | <,001    |                 | 1               | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     | <,001     | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     |
|     | P (Wilcoxon) | <,001    | 1               |                 | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     | <,001     | <,001           | <,001    | <,001    | <,001     |

**Çizelge 4.2 (devam) : 13 standart kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

| Fon | Ölçüm        | AOA       | MAOA            | MDAOA           | BPA             | SKA       | KOA      | HPSOKOA         | AÇO             | BOA             | KAO      | SSA      | AYAA            |
|-----|--------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|----------|-----------------|
| 5   | Ort.         | 2,4E-44   | 3,6E-247        | <b>5,5E-253</b> | 5,5E-157        | 9,99E-05  | 7,33E-11 | 1,24E-56        | 3,79E-73        | 8,1E-107        | 31,77275 | 8,810732 | 2,94E-77        |
|     | Std. Sapma   | 1,31E-43  | 0               | 0               | 2,3E-156        | 0,000173  | 4,59E-12 | 1,52E-56        | 5,29E-73        | 3,1E-106        | 19,77774 | 9,23309  | 1,01E-76        |
|     | Medyan       | 8,43E-60  | 1,5E-254        | 5,2E-266        | 9E-159          | 1,36E-05  | 7,29E-11 | 7,74E-57        | 1,8E-73         | 3,6E-111        | 26,53474 | 6,891382 | 3,26E-79        |
|     | Maksimum     | 7,18E-43  | 7,7E-246        | 1,2E-251        | 1,3E-155        | 0,00074   | 8,36E-11 | 6,15E-56        | 2,16E-72        | 1,5E-105        | 72,43711 | 32,39427 | 5,28E-76        |
|     | P (Wilcoxon) | <,001     |                 | 0,002           | <,001           | <,001     | <,001    | <,001           | <,001           | <,001           | <,001    | <,001    | <,001           |
| 6   | P (Wilcoxon) | <,001     |                 |                 | <,001           | <,001     | <,001    | <,001           | <,001           | <,001           | <,001    | <,001    | <,001           |
|     | Ort.         | 2,09E-13  | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | 3,44E-251 | 2,78E-09 | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | 8,31E-43 | 7,89E-44 | <b>0,00E+00</b> |
|     | Std. Sapma   | 7,64E-13  | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00  | 1,52E-09 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 2,55E-42 | 2,18E-43 | 0,00E+00        |
|     | Medyan       | 2,79E-229 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 1,26E-268 | 2,61E-09 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 1,03E-44 | 9,42E-45 | 0,00E+00        |
|     | Maksimum     | 3,77E-12  | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 8,34E-250 | 5,63E-09 | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 1,33E-41 | 1,12E-42 | 0,00E+00        |
| 7   | P (Wilcoxon) | 1         |                 | <b>1</b>        | 1               | <,001     | <,001    | 1               | 1               | 1               | <,001    | <,001    | 1               |
|     | P (Wilcoxon) | 1         | <b>1</b>        |                 | 1               | <,001     | <,001    | 1               | 1               | 1               | <,001    | <,001    | 1               |
|     | Ort.         | 1,88E+01  | <b>8,88E-16</b> | <b>8,88E-16</b> | <b>8,88E-16</b> | 1,12E+01  | 3,44E-11 | <b>8,88E-16</b> | 4,68E-15        | 4,09E-15        | 1,86E+00 | 1,78E+00 | 3,85E-15        |
|     | Std. Sapma   | 3,52E+00  | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 9,79E+00  | 1,55E-11 | 0,00E+00        | 9,01E-16        | 2,85E-15        | 7,63E-01 | 8,41E-01 | 1,35E-15        |
|     | Medyan       | 2,00E+01  | 8,88E-16        | 8,88E-16        | 8,88E-16        | 1,72E+01  | 3,39E-11 | 8,88E-16        | 4,44E-15        | 4,44E-15        | 2,07E+00 | 1,89E+00 | 4,44E-15        |
| 8   | Maksimum     | 2,00E+01  | 8,88E-16        | 8,88E-16        | 8,88E-16        | 2,02E+01  | 6,44E-11 | 8,88E-16        | 7,99E-15        | 7,99E-15        | 2,89E+00 | 4,47E+00 | 4,44E-15        |
|     | P (Wilcoxon) | <,001     |                 | <b>1</b>        | 1               | <,001     | <,001    | 1               | <,001           | <,001           | <,001    | <,001    | <,001           |
|     | P (Wilcoxon) | <,001     | <b>1</b>        |                 | 1               | <,001     | <,001    | 1               | <,001           | <,001           | <,001    | <,001    | <,001           |
|     | Ort.         | 2,02E-17  | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | <b>0,00E+00</b> | 1,77E-149 | 2,21E-22 | 7,17E-111       | <b>0,00E+00</b> | 8,95E-277       | 1,37E-15 | 1,92E-16 | <b>0,00E+00</b> |
|     | Std. Sapma   | 1,10E-16  | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 6,73E-149 | 4,22E-22 | 3,23E-110       | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 1,16E-15 | 2,20E-16 | 0,00E+00        |
|     | Medyan       | 0,00E+00  | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 1,19E-157 | 1,03E-22 | 1,03E-121       | 0,00E+00        | 7,43E-295       | 1,02E-15 | 1,42E-16 | 0,00E+00        |
|     | Maksimum     | 6,00E-16  | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 0,00E+00        | 2,66E-148 | 2,26E-21 | 1,73E-109       | 0,00E+00        | 2,68E-275       | 4,40E-15 | 9,18E-16 | 0,00E+00        |
|     | P (Wilcoxon) | 1         |                 | <b>1</b>        | 1               | <,001     | <,001    | <,001           | 1               | <,001           | <,001    | <,001    | 1               |
|     | P (Wilcoxon) | 1         | <b>1</b>        |                 | 1               | <,001     | <,001    | <,001           | 1               | <,001           | <,001    | <,001    | 1               |

**Çizelge 4.2 (devam) : 13 standart kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

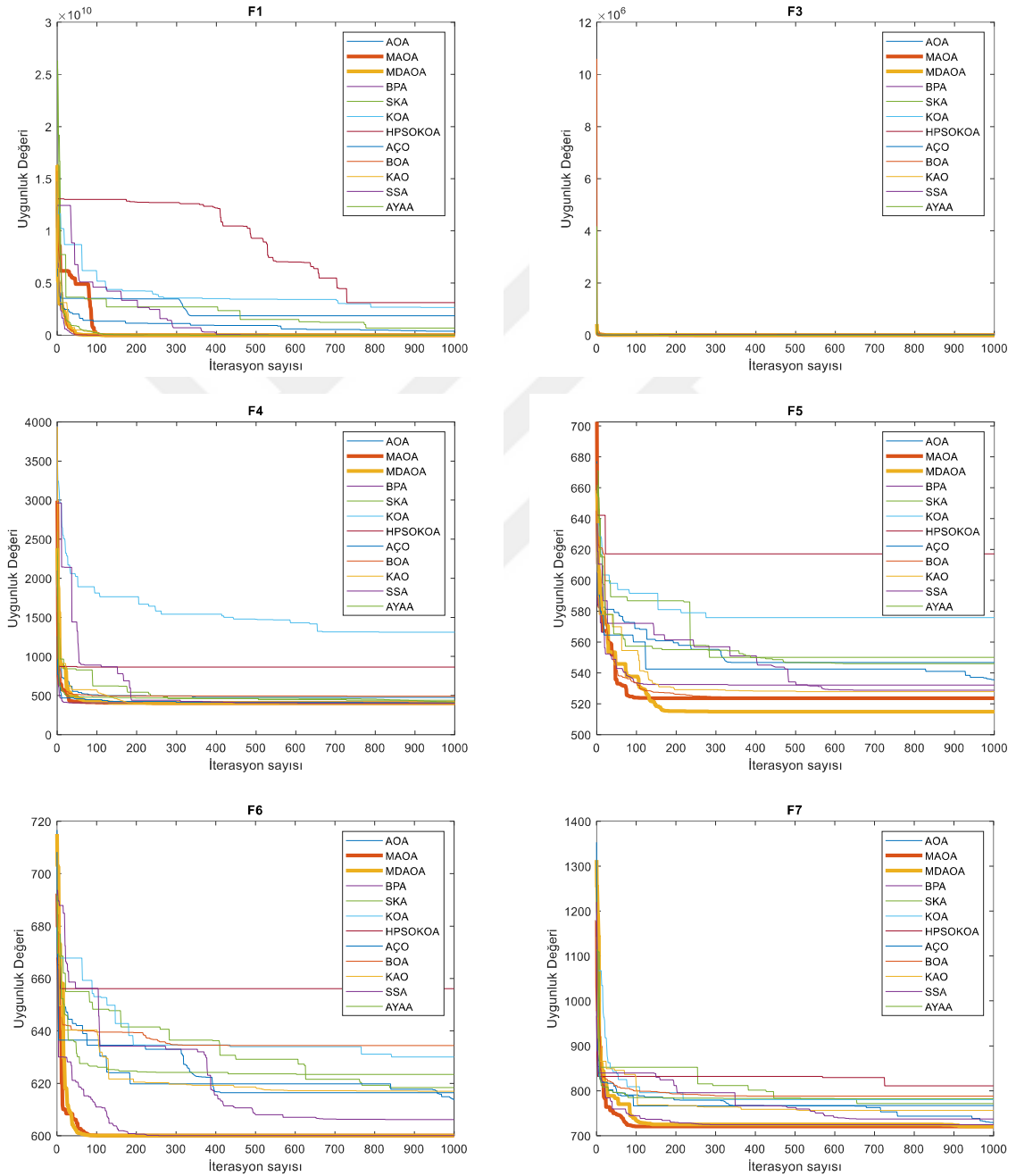
| For | Ölçüm        | AOA       | MAOA      | MDAOA     | BPA       | SKA       | KOA      | HPSOKOA   | AÇO      | BOA      | KAO      | SSA      | AYAA      |
|-----|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 9   | Ort.         | 1,35E+01  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 1,41E-01  | 5,88E-16 | 0,00E+00  | 0,00E+00 | 2,20E-03 | 7,52E-03 | 1,01E-02 | 1,78E-03  |
|     | Std. Sapma   | 4,34E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 2,38E-01  | 1,49E-15 | 0,00E+00  | 0,00E+00 | 8,41E-03 | 9,11E-03 | 1,34E-02 | 4,74E-03  |
|     | Medyan       | 1,30E+01  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 1,30E-02  | 0,00E+00 | 0,00E+00  | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,50E-03 | 3,70E-03 | 0,00E+00  |
|     | Maksimum     | 2,45E+01  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 7,95E-01  | 7,55E-15 | 0,00E+00  | 0,00E+00 | 3,62E-02 | 3,70E-02 | 4,42E-02 | 1,78E-02  |
|     | P (Wilcoxon) | 0,109     |           | 1         | 1         | <,001     | 0,001    | 1         | 1        | 1        | <,001    | <,001    | 0,18      |
| 10  | P (Wilcoxon) | 0,109     | 1         |           | 1         | <,001     | 0,001    | 1         | 1        | 1        | <,001    | <,001    | 0,18      |
|     | Ort.         | 1,92E+01  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 1,70E+01  | 1,72E+01 | 0,00E+00  | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,34E+01 | 4,84E+01 | 8,14E+00  |
|     | Std. Sapma   | 4,82E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 2,39E+01  | 5,26E+01 | 0,00E+00  | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,83E+01 | 1,78E+01 | 1,49E+01  |
|     | Medyan       | 1,95E+01  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 6,37E+00  | 0,00E+00 | 0,00E+00  | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 6,82E+01 | 4,83E+01 | 0,00E+00  |
|     | Maksimum     | 2,95E+01  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 8,48E+01  | 1,86E+02 | 0,00E+00  | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,13E+02 | 9,75E+01 | 4,89E+01  |
| 11  | P (Wilcoxon) | 0,001     |           | 1         | 1         | <,001     | 0,012    | 1         | 1        | 1        | <,001    | <,001    | 0,005     |
|     | P (Wilcoxon) | 0,001     | 1         |           | 1         | <,001     | 0,012    | 1         | 1        | 1        | <,001    | <,001    | 0,005     |
|     | Ort.         | 1,01E+06  | 6,84E-258 | 4,61E-251 | 6,13E-159 | 5,84E+00  | 6,58E-14 | 6,42E-116 | 1,76E-57 | 5,00E+02 | 7,84E+00 | 2,08E-03 | 2,45E-105 |
|     | Std. Sapma   | 4,81E+06  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 1,94E-158 | 5,65E+00  | 5,21E-15 | 2,56E-115 | 6,65E-57 | 1,50E+02 | 7,28E+00 | 3,29E-03 | 1,32E-104 |
|     | Medyan       | 7,03E+01  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 2,73E-164 | 3,97E+00  | 6,57E-14 | 4,13E-118 | 1,00E-59 | 4,93E+02 | 6,11E+00 | 1,83E-04 | 3,34E-110 |
| 12  | Maksimum     | 2,63E+07  | 2,05E-256 | 1,38E-249 | 9,89E-158 | 1,77E+01  | 8,07E-14 | 1,38E-114 | 3,33E-56 | 9,24E+02 | 3,16E+01 | 1,15E-02 | 7,24E-104 |
|     | P (Wilcoxon) | <,001     |           | 0,237     | <,001     | <,001     | <,001    | <,001     | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001     |
|     | P (Wilcoxon) | <,001     | 0,237     |           | <,001     | <,001     | <,001    | <,001     | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001     |
|     | Ort.         | 1,67E-119 | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 5,60E-124 | 4,69E-18 | 3,28E-125 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,58E-16 | 2,64E-16 | 0,00E+00  |
|     | Std. Sapma   | 9,16E-119 | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 3,07E-123 | 2,57E-17 | 8,22E-125 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 9,24E-16 | 3,58E-16 | 0,00E+00  |
| 12  | Medyan       | 2,15E-158 | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 3,87E-133 | 1,30E-21 | 8,61E-127 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,83E-16 | 1,42E-16 | 0,00E+00  |
|     | Maksimum     | 5,01E-118 | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 1,68E-122 | 1,41E-16 | 3,23E-124 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 4,28E-15 | 1,71E-15 | 0,00E+00  |
|     | P (Wilcoxon) | 0,042     |           | 1         | 1         | <,001     | <,001    | <,001     | 1        | 1        | <,001    | <,001    | 1         |
|     | P (Wilcoxon) | 0,042     | 1         |           | 1         | <,001     | <,001    | <,001     | 1        | 1        | <,001    | <,001    | 1         |

**Çizelge 4.2 (devam) : 13 standart kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

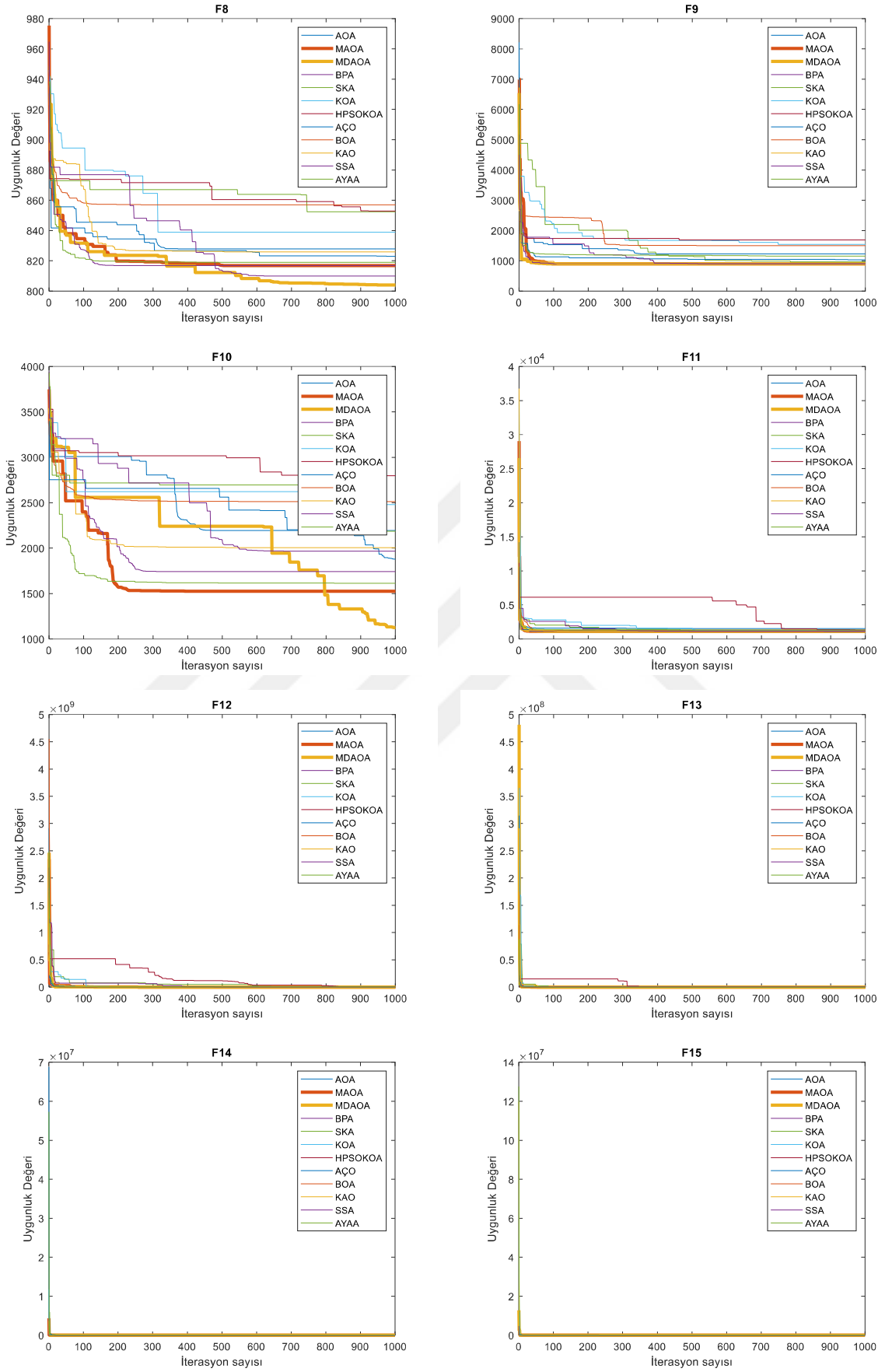
| Fon | Ölçüm         | AOA      | MAOA     | MDAOA    | BPA      | SKA      | KOA      | HPSOKOA  | AÇO      | BOA      | KAO      | SSA      | AYAA     |
|-----|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 13  | Ort.          | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,17E+00 | 0,00E+00 | 8,77E+00 | 1,45E+01 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 2,59E-01 |
|     | Std. Sapma    | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,81E+00 | 0,00E+00 | 5,74E+00 | 6,63E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 9,86E-01 |
|     | Medyan        | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,61E+00 | 1,41E+01 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
|     | Maksimum      | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,89E+00 | 0,00E+00 | 2,22E+01 | 2,67E+01 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,89E+00 |
|     | P (Wilcoxon)  | 1        |          | 1        | 0,003    | 1        | <,001    | <,001    | 1        | 1        | 1        | 1        | 0,18     |
|     | P (Wilcoxon)  | 1        | 1        |          | 0,003    | 1        | <,001    | <,001    | 1        | 1        | 1        | 1        | 0,18     |
|     | Friedman Rank | 7,35     | 2,73     | 2,73     | 3,73     | 9,88     | 9        | 6,08     | 5,31     | 5,19     | 10,65    | 9,73     | 5,62     |

#### 4.1.2 Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA)'nın CEC 2017 kıyaslama fonksiyonlarına uygulanması

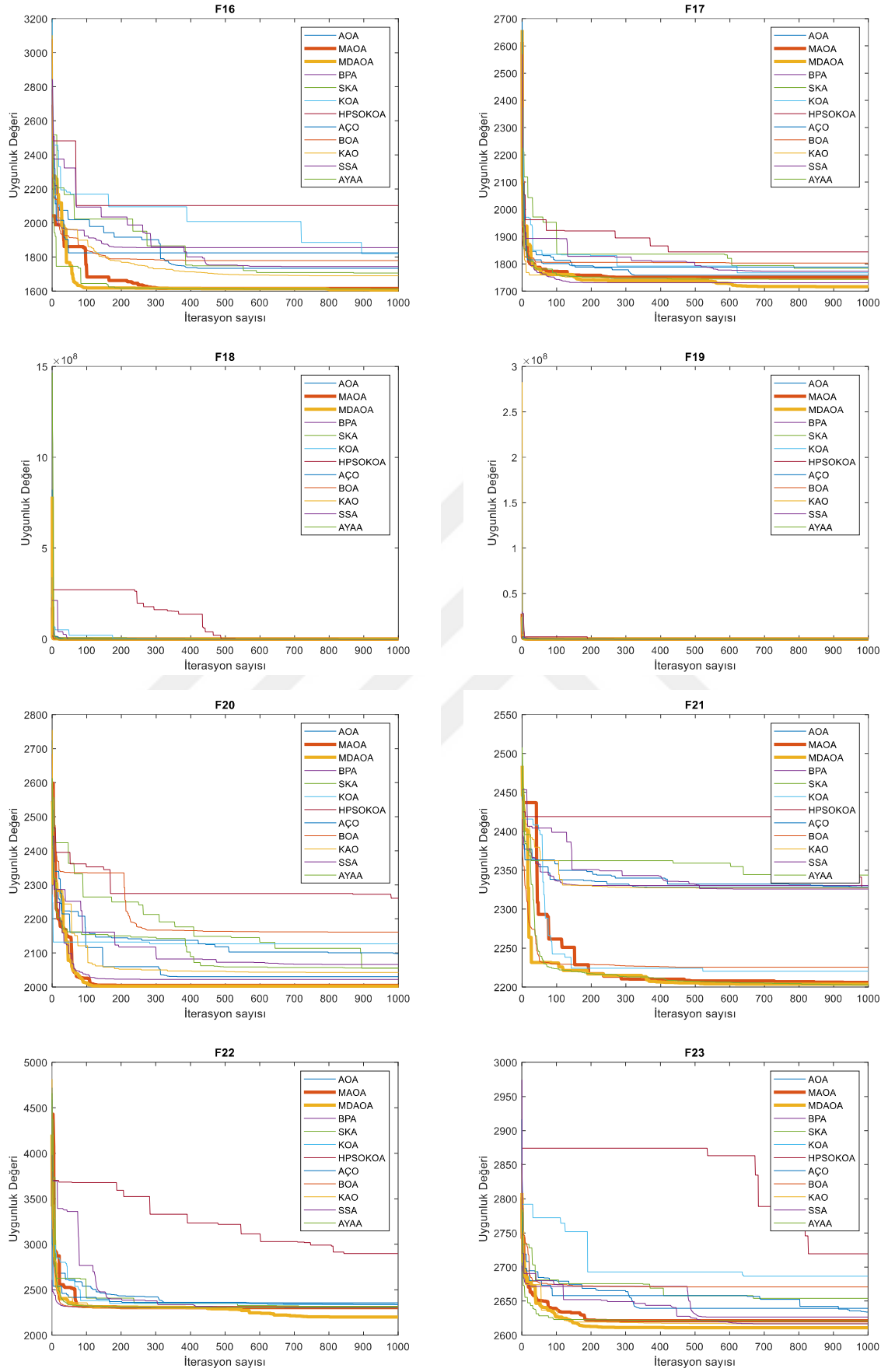
Bu bölümde, MAOA ve MDAOA'nın etkinliği CEC 2017 kıyaslama fonksiyonları ile değerlendirilmiştir. MAOA ve MDAOA'nın diğer algoritmalarla göre daha iyi performans gösterdiği 1000 iterasyonlu yakınsama eğrisi grafikleri Şekil 4.2'de sunulmuştur.



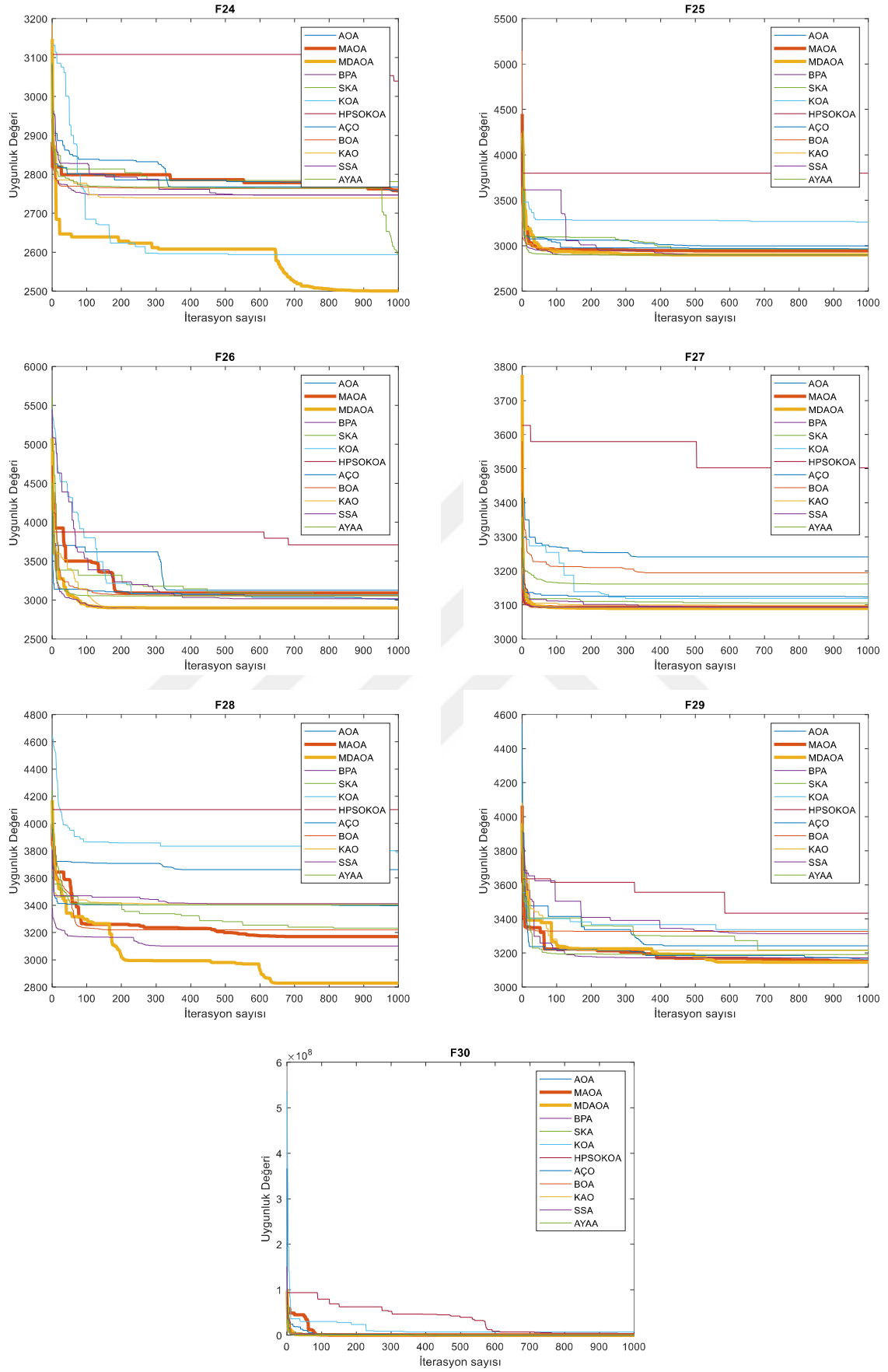
Şekil 4.2 : CEC 2017 kıyaslama fonksiyonlarının yakınsama eğrisi grafikleri.



Şekil 4.2 (devam) : CEC 2017 kıyaslama fonksiyonlarının yakınsama eğrisi grafikleri.



Şekil 4.2 (devam) : CEC 2017 kıyaslama fonksiyonlarının yakınsama eğrisi grafikleri.



Şekil 4.2 (devam) : CEC 2017 kıyaslama fonksiyonlarının yakınsama eğrisi grafikleri.

Algoritmaların maksimum 1000 iterasyon ve 30 kez çalışması ile elde edilen ortalama ve standart sapma değerlerini içeren sonuçlar Çizelge A.1’de sunulmuştur.

Çizelgedeki sonuçların ortalama değerleri karşılaştırıldığında, MAOA 6,20,27 ve 30 nolu fonksiyonlarda en iyi sonucu elde ederken MDAOA, tüm fonksiyonlar için optimum sonuçlar vermiştir. MDAOA, 24 fonksiyonda en iyi sonucu bulan tek algoritma olmuştur. MAOA 28 fonksiyonda (24 nolu fonksiyon dışında tüm fonksiyonlar) AOA’dan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, MAOA standart AOA’dan daha iyi, MDAOA ise tüm algoritmalar arasında en iyi performansı göstermiştir.

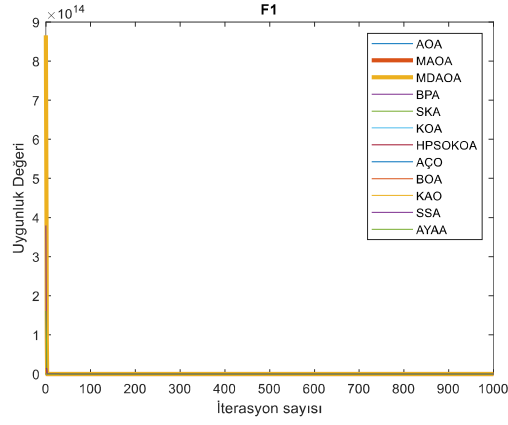
#### 4.1.3 Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA)’nın mühendislik problemlerine uygulanması

Önerilen MAOA ve MDAOA’nın etkinliğini test etmek için beş mühendislik problemi kullanılmıştır. Problemler, birçok tasarım değişkenine sahip olup kısıtlarla birlikte karmaşık bir yapıya sahiptir. MAOA ve MDAOA, mühendislik problemlerinde de oldukça etkili sonuçlar vermiştir. Çizelge 4.3, ilgili parametrelerle birlikte mühendislik tasarım problemlerinin listesini göstermektedir.

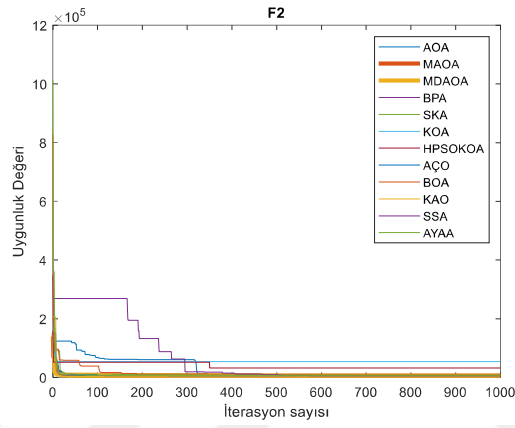
**Çizelge 4.3 : Problem parametreleri.**

|       | Problem                                                               | Alt Sınır                        | Üst Sınır                        | Boyut |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| $f_1$ | Germe/sıkıştırma yayı tasarımı<br>(Tension/compression spring design) | [0.05,0.25,2]                    | [2,1.3,15]                       | 3     |
| $f_2$ | Basınçlı kap tasarımı<br>(Pressure vessel design)                     | [0,0,10,10]                      | [99,99,200,200]                  | 4     |
| $f_3$ | Kaynaklı kiriş tasarım problemi<br>(Welded beam design)               | [0.1,0.1,0.1,0.1<br>]            | [2,10,10,2]                      | 4     |
| $f_4$ | Hız düşürücü tasarım problemi<br>(Speed reducer problem)              | [2.6,0.7,17,7.3,<br>7.3,2.9,5.0] | [3.6,0.8,28,8.3,8.<br>3,3.9,5.5] | 7     |
| $f_5$ | Üç çubuklu kafes tasarımı<br>(Three bar truss design)                 | [0,0]                            | [1,1]                            | 2     |

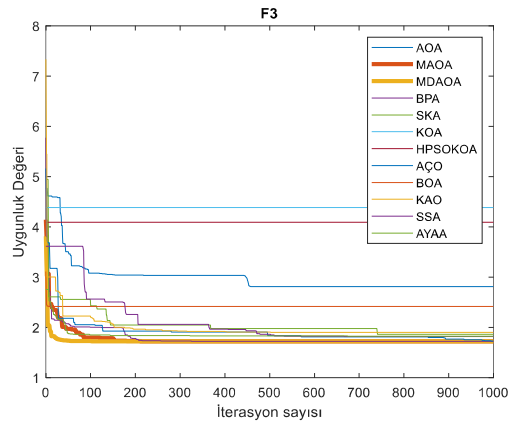
AOA, MAOA, MDAOA ve diğer algoritmalar için problemin yakınsama eğrileri, Şekil 4.3-4.7’de gösterilmiştir.



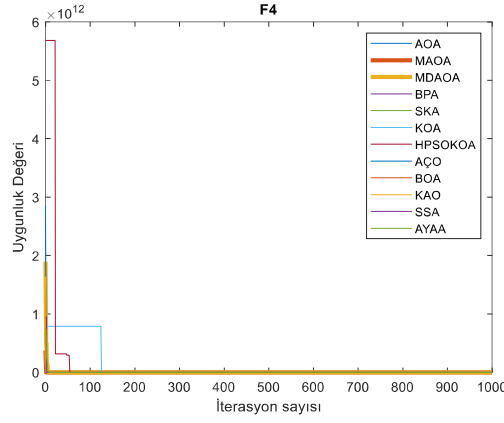
Şekil 4.3 : Germe/sıkıştırma yayı tasarımı problemi için yakınsama eğrileri.



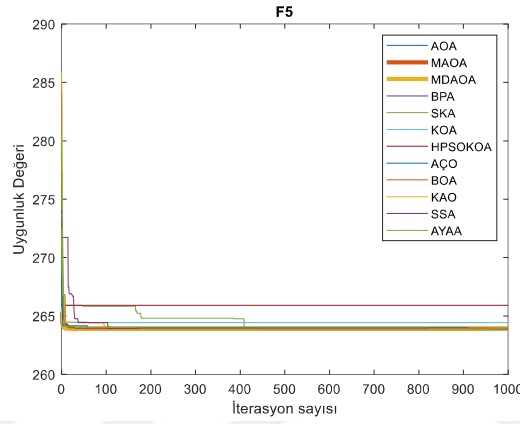
Şekil 4.4 : Basınçlı kap tasarım problemi için yakınsama eğrileri.



Şekil 4.5 : Kaynaklı kiriş tasarım problemi için yakınsama eğrileri.



Şekil 4.6 : Hız düşürücü tasarım problemi için yakınsama eğrileri.



Şekil 4.7 : Üç çubuklu makas tasarım probleminin yakınsama eğrileri.

AOA, MAOA ve MDAOA'nın da aralarında bulunduğu 12 algorithmadan elde edilen sayısal sonuçlar Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Sonuçlar incelendiğinde, MDAOA'nın beş problemde de ortalama değerler dikkate alındığında en iyi sonuçları verdiği görülmektedir. 1. fonksiyonda MDAOA ile AÇO en iyi sonucu bulmuş, 2 ve 3. fonksiyonlarda MDAOA tek başına en iyi sonuçları üretmiştir. 4. fonksiyonda MAOA, MDAOA ve BPA en iyi sonucu hesaplayabilmiştir. 5. fonksiyonda ise MAOA'nın da içinde yer aldığı yedi algoritma en düşük uygunluk değerini bulabilmiştir.

Bu bölümdeki çalışmanın katkıları şöyle özetlenebilir:

- AOA algoritması modifiye edilerek çok çeşitli problem fonksiyonlarında daha iyi sonuçlar sağlayan yeni MAOA ve MDAOA geliştirilmiştir.
- Belirli bir mühendislik problemini çözmek için parametreler farklı bir optimizasyon algoritması olan BPA ile optimize edilmiştir.
- Modifiye versiyonda, algoritmanın erken yakınsama davranışı iyileştirilmiş ve AOA'nın keşif ve sömürü aşamaları arasındaki dengenin iyileştirilmesi sağlanmıştır.

**Çizelge 4.4 : Mühendislik problemleri için hesaplanan çözümlerin karşılaştırması.**

| Fon. | Ölçüm        | AOA             | MAOA            | MDAOA           | BPA             | SKA      | KOA      | HPSOKOA  | AÇO             | BOA             | KAO             | SSA             | AYAA            |
|------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1    | Ort.         | 1,38E-02        | 1,28E-02        | <b>1,27E-02</b> | 1,30E-02        | 1,30E-02 | 1,36E-02 | 7,60E+12 | <b>1,27E-02</b> | 1,37E-02        | 1,38E-02        | 1,31E-02        | 1,30E-02        |
|      | Std. Sapma   | 5,83E-04        | 2,02E-04        | 6,91E-06        | 9,28E-04        | 1,29E-04 | 7,80E-04 | 4,16E+13 | 1,94E-05        | 1,34E-03        | 1,53E-03        | 8,54E-04        | 7,64E-04        |
|      | Medyan       | 1,36E-02        | 1,27E-02        | 1,27E-02        | 1,27E-02        | 1,29E-02 | 1,33E-02 | 1,57E-02 | 1,27E-02        | 1,31E-02        | 1,32E-02        | 1,29E-02        | 1,28E-02        |
|      | Maksimum     | 1,50E-02        | 1,35E-02        | 1,27E-02        | 1,78E-02        | 1,32E-02 | 1,61E-02 | 2,28E+14 | 1,28E-02        | 1,78E-02        | 1,77E-02        | 1,74E-02        | 1,69E-02        |
|      | P (Wilcoxon) | <,001           |                 | <,001           | 0,23            | <,001    | <,001    | <,001    | 0,53            | 0,001           | <,001           | 0,001           | 0,019           |
|      | P (Wilcoxon) | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           |
| 2    | Ort.         | 3,91E+04        | 6,50E+03        | <b>5,90E+03</b> | 5,92E+03        | 6,93E+03 | 4,94E+04 | 5,51E+04 | 6,27E+03        | 7,82E+03        | 6,20E+03        | 6,55E+03        | 6,64E+03        |
|      | Std. Sapma   | 5,51E+04        | 5,53E+02        | 1,76E+01        | 5,63E+01        | 6,15E+02 | 3,12E+04 | 4,04E+04 | 5,22E+02        | 9,66E+02        | 3,20E+02        | 7,09E+02        | 5,13E+02        |
|      | Medyan       | 8,98E+03        | 6,43E+03        | 5,90E+03        | 5,89E+03        | 6,73E+03 | 3,74E+04 | 4,37E+04 | 5,93E+03        | 7,97E+03        | 6,08E+03        | 6,41E+03        | 6,48E+03        |
|      | Maksimum     | 2,00E+05        | 7,32E+03        | 5,94E+03        | 6,11E+03        | 8,33E+03 | 1,10E+05 | 1,92E+05 | 7,33E+03        | 1,03E+04        | 7,08E+03        | 8,97E+03        | 7,33E+03        |
|      | P (Wilcoxon) | <,001           |                 | <,001           | <,001           | 0,012    | <,001    | <,001    | 0,141           | <,001           | 0,047           | 0,797           | 0,141           |
|      | P (Wilcoxon) | <,001           | <,001           |                 | 0,393           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           |
| 3    | Ort.         | 2,58E+00        | 1,73E+00        | <b>1,72E+00</b> | 1,73E+00        | 1,86E+00 | 3,75E+00 | 2,30E+10 | 1,73E+00        | 2,30E+00        | 1,79E+00        | 1,80E+00        | 1,80E+00        |
|      | Std. Sapma   | 5,52E-01        | 4,64E-03        | 8,50E-10        | 2,31E-03        | 4,23E-02 | 1,07E+00 | 1,14E+11 | 3,42E-03        | 6,41E-01        | 8,22E-02        | 1,04E-01        | 9,74E-02        |
|      | Medyan       | 2,54E+00        | 1,72E+00        | 1,72E+00        | 1,72E+00        | 1,86E+00 | 3,55E+00 | 4,68E+00 | 1,73E+00        | 1,99E+00        | 1,75E+00        | 1,76E+00        | 1,75E+00        |
|      | Maksimum     | 3,60E+00        | 1,75E+00        | 1,72E+00        | 1,74E+00        | 1,93E+00 | 8,83E+00 | 6,25E+11 | 1,74E+00        | 4,20E+00        | 1,95E+00        | 2,17E+00        | 2,19E+00        |
|      | P (Wilcoxon) | <,001           |                 | <,001           | 0,041           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           |
|      | P (Wilcoxon) | <,001           | <,001           |                 | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           |
| 4    | Ort.         | 8,80E+09        | <b>2,99E+03</b> | <b>2,99E+03</b> | <b>2,99E+03</b> | 3,10E+03 | 7,94E+10 | 3,18E+03 | 3,01E+03        | 3,11E+03        | 3,00E+03        | 3,03E+03        | 3,01E+03        |
|      | Std. Sapma   | 3,99E+10        | 5,32E-05        | 1,46E-05        | 1,31E-12        | 2,69E+01 | 3,45E+11 | 5,77E+01 | 5,56E+00        | 7,33E+01        | 5,03E+00        | 2,25E+01        | 2,45E+01        |
|      | Medyan       | 3,12E+03        | 2,99E+03        | 2,99E+03        | 2,99E+03        | 3,09E+03 | 3,23E+03 | 3,18E+03 | 3,01E+03        | 3,10E+03        | 3,00E+03        | 3,03E+03        | 3,00E+03        |
|      | Maksimum     | 2,15E+11        | 2,99E+03        | 2,99E+03        | 2,99E+03        | 3,14E+03 | 1,86E+12 | 3,31E+03 | 3,02E+03        | 3,31E+03        | 3,01E+03        | 3,11E+03        | 3,10E+03        |
|      | P (Wilcoxon) | <,001           |                 | <,001           | 0,043           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           |
|      | P (Wilcoxon) | <,001           | <,001           |                 | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           | <,001           |
| 5    | Ort.         | <b>2,64E+02</b> | <b>2,64E+02</b> | <b>2,64E+02</b> | <b>2,64E+02</b> | 2,65E+02 | 2,65E+02 | 2,71E+02 | 2,65E+02        | <b>2,64E+02</b> | <b>2,64E+02</b> | <b>2,64E+02</b> | <b>2,64E+02</b> |
|      | Std. Sapma   | 1,29E-04        | 2,04E-03        | 1,72E-06        | 4,08E-05        | 3,44E+00 | 9,69E-01 | 5,07E+00 | 3,46E+00        | 3,85E-01        | 3,78E-04        | 1,88E-03        | 3,32E-02        |
|      | Medyan       | 2,64E+02        | 2,64E+02        | 2,64E+02        | 2,64E+02        | 2,64E+02 | 2,65E+02 | 2,70E+02 | 2,64E+02        | 2,64E+02        | 2,64E+02        | 2,64E+02        | 2,64E+02        |

**Çizelge 4.4 (devam) : Mühendislik problemleri için hesaplanan çözümlerin karşılaştırması.**

| Fon. | Ölçüm         | AOA      | MAOA     | MDAOA       | BPA      | SKA      | KOA      | HPSOKOA  | AÇO      | BOA      | KAO      | SSA      | AYAA     |
|------|---------------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 5    | Maksimum      | 2,64E+02 | 2,64E+02 | 2,64E+02    | 2,64E+02 | 2,83E+02 | 2,68E+02 | 2,84E+02 | 2,83E+02 | 2,65E+02 | 2,64E+02 | 2,64E+02 | 2,64E+02 |
|      | P (Wilcoxon)  | 4,00E-03 |          | <,001       | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 7,90E-02 | 9,92E-01 | <,001    |
|      | P (Wilcoxon)  | <,001    | <,001    |             | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | Friedman Rank | 9,20     | 3,50     | <b>2,00</b> | 3,30     | 7,80     | 10,40    | 11,60    | 4,80     | 8,10     | 5,40     | 6,20     | 5,70     |

- Önerilen modifiye algoritma, standart kıyaslama fonksiyonları, CEC 2017 test paketi, ve mühendislik problemleri üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar, MDAOA algoritmasının probleme özgü parametreler ile diğer iyi bilinen algoritmalarından daha iyi sonuçlar üretebileceğini göstermektedir.

#### 4.2 Problem 1: Şarj İstasyonu Yerleşiminin Örnek 42 Baralı Dağıtım Ağına Uygulanması

Bu bölümde örnek 42 baralı bir dağıtım ağı modellenerek (Türkiye dağıtım ağına benzer), bu sisteme eklenecek şarj istasyonlarının etkisi sanal bir model üzerinde gösterilmiştir. Böylece bu çalışma ile ilerde Türkiye elektrik şebekesinde sayısı artacak olan elektrikli şarj istasyonlarının etkisi detaylı bir şekilde gösterilerek, sunulan çözümler ile bu konuda yapılacak çalışmalara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Çalışmada her bir elektrikli araç ortalama 25 kW'lık, 3 fazlı bir yük olarak modellenmiştir. Burada elektrik araç şarj ünitelerinin entegre edileceği Türkiye dağıtım sisteminin (36 kV/400 V) tahmini 42 baralı kesiti DigSilent yazılımı kullanılarak bölüm 3.5.1'de modellenmiştir.

Aşağıda belirtilen üç durum için bara gerilimleri, dağıtım ağına ait toplam durum ve trafo yüklenme bilgileri toplanmıştır:

- Elektrikli şarj istasyonları devre değil iken (Çizelge 4.5-4.7)
- Elektrikli şarj istasyonlarının tamamı devrede iken (kontROLSÜZ şarj) (Çizelge 4.8-4.10)
- Kontrollü şarj (şebekenin maksimum kaldırabileceği elektrik araç sayısı tespit edilerek yapılan şarj) yapılırken (Çizelge 4.11-4.13)

**Çizelge 4.5 :** Trafo Elektrikli şarj istasyonları devre değilken bara gerilimleri.

| Bara        | Gerilim (kV) | Vpu  | kV   | DEG  |
|-------------|--------------|------|------|------|
| Bus1        | 154          | 1    | 154  | 0    |
| Bus2        | 34.5         | 1    | 34.5 | 0.1  |
| Bus3        | 34.5         | 0.99 | 34.1 | -0.7 |
| LV-1/Bus3.1 | 0.4          | 0.99 | 0.4  | 28.5 |
| LV-2/Bus3.1 | 0.4          | 0.99 | 0.4  | 28.5 |
| LV-3/Bus3.1 | 0.4          | 0.99 | 0.4  | 28.5 |
| Bus4        | 34.5         | 1    | 34.4 | -0.4 |
| LV-4/Bus4.1 | 0.4          | 1    | 0.4  | 22.6 |
| LV-5/Bus4.1 | 0.4          | 1    | 0.4  | 22.6 |
| LV-6/Bus4.1 | 0.4          | 1    | 0.4  | 22.6 |
| Bus7        | 34.5         | 1    | 34.5 | 0.2  |

**Çizelge 4.5 (devam) :** Trafo Elektrikli şarj istasyonları devre değilken bara gerilimleri.

| Bara         | Gerilim (kV) | V <sub>pu</sub> | kV   | DEG  |
|--------------|--------------|-----------------|------|------|
| LV-7/Bus7.1  | 0.4          | 1               | 0.4  | -1   |
| LV-8/Bus7.1  | 0.4          | 1               | 0.4  | -1   |
| LV-9/Bus7.1  | 0.4          | 1               | 0.4  | -1   |
| Bus6         | 34.6         | 1               | 34.6 | 0.4  |
| LV-10/Bus6.1 | 0.4          | 1               | 0.4  | 29.3 |
| LV-11/Bus6.1 | 0.4          | 1               | 0.4  | 29.3 |

**Çizelge 4.6 :** Şebekeye ait toplam durum.

| Kurulu Güç | Ana Şebeke | Şebeke kayıpları | Yük       | Üretim    |
|------------|------------|------------------|-----------|-----------|
| 26.24 MW   | -0.84 MW   | 0.58 MW          | 13.58 MW  | 15 MW     |
|            | 0.83 MVAR  | 1.2 MVAR         | 0.26 MVAR | 0.63 MVAR |

**Çizelge 4.7 :** Trafo yüklenmeleri.

| No | MW   | MVAR | kA   | Yüklenme |
|----|------|------|------|----------|
| 1  | 0.55 | 0.05 | 0.01 | 46.58    |
| 2  | 0.55 | 0.05 | 0.01 | 46.58    |
| 3  | 0.55 | 0.05 | 0.01 | 46.58    |
| 4  | 0.53 | 0.05 | 0.01 | 44.64    |
| 5  | 0.53 | 0.05 | 0.01 | 44.64    |
| 6  | 0.54 | 0.05 | 0.01 | 44.64    |
| 7  | 0.54 | 0.05 | 0.01 | 49.74    |
| 8  | 0.54 | 0.05 | 0.01 | 49.74    |
| 9  | 0.54 | 0.05 | 0.01 | 49.74    |
| 10 | 0.58 | 0.06 | 0.01 | 48.6     |
| 11 | 0.6  | 0.06 | 0.01 | 49.97    |

**Çizelge 4.8 :** Elektrikli şarj istasyonlarının tamamı devrede iken (kontROLSÜZ şarj) bara gerilimleri.

| Bara         | Gerilim (kV) | V <sub>pu</sub> | kV   | DEG  |
|--------------|--------------|-----------------|------|------|
| Bus1         | 154          | 1               | 154  | 0    |
| Bus2         | 34.5         | 1               | 34.5 | -0.8 |
| Bus3         | 34.5         | 0.98            | 33.7 | -3.9 |
| LV-1/Bus3.1  | 0.4          | 0.97            | 0.4  | 24   |
| LV-2/Bus3.1  | 0.4          | 0.97            | 0.4  | 24   |
| LV-3/Bus3.1  | 0.4          | 0.97            | 0.4  | 24   |
| Bus4         | 34.5         | 0.99            | 34   | 24   |
| LV-4/Bus4.1  | 0.4          | 0.97            | 0.4  | 16.1 |
| LV-5/Bus4.1  | 0.4          | 0.97            | 0.4  | 16.1 |
| LV-6/Bus4.1  | 0.4          | 0.97            | 0.4  | 16.1 |
| Bus7         | 34.5         | 1               | 34.4 | -3.9 |
| LV-7/Bus7.1  | 0.4          | 0.98            | 0.4  | -3.9 |
| LV-8/Bus7.1  | 0.4          | 0.98            | 0.4  | -3.9 |
| LV-9/Bus7.1  | 0.4          | 0.98            | 0.4  | -3.9 |
| Bus6         | 34.5         | 1               | 34.5 | -0.7 |
| LV-10/Bus6.1 | 0.4          | 0.98            | 0.4  | 26.4 |
| LV-11/Bus6.1 | 0.4          | 0.98            | 0.4  | 26.4 |

**Çizelge 4.9 : Kontrolsüz şarj yapılırken toplam durum.**

| Kurulu Güç | Ana Şebeke | Şebeke kayıpları | Yük      | Üretim    |
|------------|------------|------------------|----------|-----------|
| 26.24 MW   | 8.98 MW    | 2.5 MW           | 21.83 MW | 15 MW     |
|            | -0.66 MVAR | 3.41 MVAR        | 0.3 MVAR | 4.36 MVAR |

**Çizelge 4.10 : Elektrikli Şarj istasyonlarının tamamı devrede (kontrolsüz şarj) iken trafo yüklenmeleri.**

| No | MW   | MVAR | kA   | Yüklenme |
|----|------|------|------|----------|
| 1  | 1.4  | 0.18 | 0.02 | 120.6    |
| 2  | 1.4  | 0.18 | 0.02 | 120.6    |
| 3  | 1.4  | 0.18 | 0.02 | 120.6    |
| 4  | 1.4  | 0.21 | 0.02 | 119.3    |
| 5  | 1.4  | 0.21 | 0.02 | 119.3    |
| 6  | 1.41 | 0.21 | 0.02 | 120.3    |
| 7  | 1.4  | 0.2  | 0.02 | 128.8    |
| 8  | 1.4  | 0.2  | 0.02 | 128.8    |
| 9  | 1.4  | 0.2  | 0.02 | 128.8    |
| 10 | 1.46 | 0.24 | 0.02 | 123.4    |
| 11 | 1.48 | 0.24 | 0.03 | 124.81   |

**Çizelge 4.11 : Kontrollü şarj yapılırken bara gerilimleri.**

| Bus Name     | Gerilim (kV) | Vpu  | kV   | DEG  |
|--------------|--------------|------|------|------|
| Bus1         | 154          | 1    | 154  | 0    |
| Bus2         | 34.5         | 1    | 34.5 | -0.8 |
| Bus3         | 34.5         | 0.98 | 33.9 | -2.7 |
| LV-1/Bus3.1  | 0.4          | 0.98 | 0.4  | 25.7 |
| LV-2/Bus3.1  | 0.4          | 0.98 | 0.4  | 25.7 |
| LV-3/Bus3.1  | 0.4          | 0.98 | 0.4  | 25.7 |
| Bus4         | 34.5         | 0.99 | 34.3 | -3.4 |
| LV-4/Bus4.1  | 0.4          | 0.99 | 0.4  | 18.5 |
| LV-5/Bus4.1  | 0.4          | 0.99 | 0.4  | 18.5 |
| LV-6/Bus4.1  | 0.4          | 0.99 | 0.4  | 18.5 |
| Bus7         | 34.5         | 1    | 34.4 | -0.6 |
| LV-7/Bus7.1  | 0.4          | 0.99 | 0.4  | -2.8 |
| LV-8/Bus7.1  | 0.4          | 0.99 | 0.4  | -2.8 |
| LV-9/Bus7.1  | 0.4          | 0.99 | 0.4  | -2.8 |
| Bus6         | 34.5         | 1    | 34.5 | -0.7 |
| LV-10/Bus6.1 | 0.4          | 1    | 0.4  | 27.5 |
| LV-11/Bus6.1 | 0.4          | 1    | 0.4  | 27.5 |

**Çizelge 4.12 : Kontrollü şarj yapılırken toplam durum.**

| Kurulu Güç | Ana Şebeke | Şebeke kayıpları | Yük       | Üretim    |
|------------|------------|------------------|-----------|-----------|
| 26.24 MW   | 5.29 MW    | 1.21 MW          | 19.68 MW  | 15 MW     |
|            | -0.27 MVAR | 2.16 MVAR        | 0.29 MVAR | 2.72 MVAR |

**Çizelge 4.13 :** Kontrollü şarj yapılırken trafo yüklenmeleri.

| No | MW   | MVAR | kA   | Yüklenme |
|----|------|------|------|----------|
| 1  | 1.09 | 0.1  | 0.02 | 93       |
| 2  | 1.09 | 0.1  | 0.02 | 93       |
| 3  | 1.09 | 0.1  | 0.02 | 93       |
| 4  | 1.08 | 0.12 | 0.02 | 91.05    |
| 5  | 1.08 | 0.12 | 0.02 | 91       |
| 6  | 1.09 | 0.2  | 0.02 | 92.08    |
| 7  | 1.09 | 0.12 | 0.02 | 99.4     |
| 8  | 1.09 | 0.12 | 0.02 | 99.4     |
| 9  | 1.09 | 0.12 | 0.02 | 99.4     |
| 10 | 1.13 | 0.14 | 0.02 | 94.9     |
| 11 | 1.15 | 0.14 | 0.03 | 96       |

Simülasyon sonuçlarında görüldüğü gibi elektrikli araçların şarj durumlarının dağıtım ağına etkileri oldukça yüksektir. 220 aracın şarj edildiği kontrollü durum ile kontrolsüz durum karşılaştırıldığında dağıtım ağına bara gerilimlerinin ve aktif güç kayıplarının (0.94 MW seviyesinde) iyileştiği ve trafo yüklenmelerinin yaklaşık %30 azaldığı görülmektedir. Bu şekilde dağıtım sistemlerinde mevcut şebekeleri modelleyerek, kontrollü ve planlı bir program dâhilinde ne kadar elektrikli aracın şarj edilebileceği bulunabilir. Özellikle elektrikli filo araçlarının aynı anda şarj istasyonlarını kullanacağı düşünülürse, modelleme ve simülasyon çalışmalarının oldukça önemli olacağı düşünülmektedir.

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de yaygınlaşacak olan elektrikli araç şarj istasyonlarının mevcut dağıtım ağlarına etkisinin öngörülmesi önem arz etmektedir. Kontrollü ve kontrolsüz şarj koşullarının ağ üzerindeki etkileri, bu çalışmada sunulan örnek modele benzer şekilde entegre edilecek dağıtım sisteminin sanal modeli geliştirilerek incelenebilir. Böylece dağıtım sistemine güvenli bir şekilde entegre edilebilecek elektrikli araç şarj istasyonu sayısı belirlenebilecektir.

Bu bölümdeki çalışmada elektrikli araç şarj istasyonlarının etkilerini gözlemlemek amacıyla Türkiye'de görülen dağıtım ağına benzer 42 baralı dağıtım ağı DigSilent yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Bu modelde elektrikli araçların kontrollü ve kontrolsüz olarak şarj edilmesi durumunda ortaya çıkan farklılıklar gözlemlenmiştir. Ayrıca kontrolsüz şarjın dağıtım ağına getirdiği olumsuz etkiler detaylı bir şekilde gösterilmekte ve tartışılmaktadır. Ayrıca kontrolsüz şarjdan elde edilen verilere göre sistem içerisinde kontrollü ve güvenli bir şekilde şarj edilebilecek elektrikli araç sayısı da belirlenebilecektir.

Bu simülasyon çalışması önümüzdeki yıllarda elektrikli araçların mobil yük olarak dağıtım ağına entegrasyonunu planlamakla görevli kişilere yardımcı olabilir. Simülasyon çıktısı,

birçok ülkede hızla yaygınlaşan elektrikli araçların mevcut dağıtım ağlarına optimum entegrasyonunu sağlamaktadır.

Bu çalışmanın literatüre katkısı özetle;

- Benzer çalışmalar için kullanılacak 42 baralı dağıtım ağı tüm dataları verilerek, bu bölümde test edilerek, sunulmuştur.
- Türkiye’de büyük kapasiteli elektrikli araç şarj istasyonunun (330 araç) mevcut dağıtım ağına entegrasyonu sanal model kullanılarak detaylı bir şekilde gösterilmiştir.
- Bu çalışmadaki gibi elde edilen simülasyon verilerine göre bir dağıtım sistemine optimum biçimde ne kadar şarj istasyonunun entegre edileceği gösterilmiştir.

#### **4.3 Problem 2: Newton Raphson Tabanlı Geliştirilen Yeni Bir Model İle Şarj İstasyonu Yerleşimi**

Literatürdeki çalışmalarda elektrikli araçların şarj olma işleminin dağıtım ağına etkisinin sınırlı bir şekilde ele alındığı görülmektedir. Ayrıca, olası sorunların daha detaylı değerlendirilmesi amacıyla elektrikli araçların şarj olmasının dağıtım ağına gerilim kararlılığı üzerindeki ve nominal çalışmaya etkileri açısından hala araştırılması gereken eksiklikler olduğu değerlendirilmiştir. Bu bölümde Bölüm 1’de sunulan sorunların analizine yönelik elektrikli araçların dağıtım ağına optimum entegrasyonunu sağlayan Bölüm 3’te sunulan Newton Raphson tabanlı matematiksel model kullanılmıştır. Bu bağlamda çalışmanın önerdiği model DIgSILENT Power Factory programı kullanılarak bir durum ağı modeli olarak uygulanmıştır. Bu model IEEE 33 baralı radyal test sistemine uygulanarak optimum şarj istasyonu sayısı ve konumları belirlenmiştir. Böylece, şarj istasyonlarının ilgili dağıtım ağına entegrasyonunun ardından bu ağların nominal işletiminin sürekliliği sağlanmıştır.

Bu güç sisteminin değerlerine ait dağıtım hattı verileri ve yük verileri [95] nolu referanstan alınmıştır. Bu çalışmada bu dağıtım sistemi DigSilent yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmada 1 nolu baraya dağıtım trafosu eklenmiştir. Eklenen dağıtım trafosu 20/12.66 kV, 6.5 MVA güce sahiptir. Günümüz şartlarında birçok AA şarj istasyonu 22 kW güce sahiptir. Ayrıca küçük boyutlu DA istasyonları ise 24-25 kW güç sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmada her iki şarj olasılığını da kapsayacak şekilde her bir elektrikli araç şarj istasyonu ortalama 25 kW’lık bir yük olarak modellenmiştir. Durum 1 ve Durum 2’de IEEE-33 baralı test dağıtım ağı kullanılacaktır.

Durum 1: Bu durumda, şarj istasyonları devreye alınmadan önce IEEE-33 baralı dağıtım ağında Newton Raphson yöntemine göre yük akış analizi yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.14-4.15'da verilmiştir.

**Çizelge 4.14 :** IEEE-33 baralı test sistemlerinin yük akış analizi sonuçları

| Bara  | Vpu/deg     | Bara   | Vpu/deg     |
|-------|-------------|--------|-------------|
| Bus1  | 0.991/-0.66 | Bus18  | 0.9/-1.57   |
| Bus2  | 0.99/-0.65  | Bus19  | 0.99/-0.66  |
| Bus3  | 0.976/-0.57 | Bus20  | 0.98/-0.73  |
| Bus4  | 0.97/-0.5   | Bus21  | 0.985/-0.75 |
| Bus5  | 0.961/-0.45 | Bus22  | 0.984/-0.77 |
| Bus6  | 0.942/-0.52 | Bus23  | 0.972/-0.6  |
| Bus7  | 0.94/-0.76  | Bus24  | 0.965/-0.69 |
| Bus8  | 0.925/-0.91 | Bus25  | 0.962/-0.73 |
| Bus9  | 0.923/-1.11 | Bus26  | 0.94/-0.48  |
| Bus10 | 0.917/-1.17 | Bus27  | 0.94/-0.42  |
| Bus11 | 0.916/-1.16 | Bus28  | 0.931/-0.69 |
| Bus12 | 0.915/-1.15 | Bus29  | 0.923/-0.62 |
| Bus13 | 0.91/-1.25  | Bus30  | 0.92/-0.62  |
| Bus14 | 0.906/-1.33 | Bus31  | 0.916/-0.6  |
| Bus15 | 0.905/-1.37 | Bus32  | 0.914/-0.64 |
| Bus16 | 0.903/-1.39 | Bus33  | 0.914/-0.64 |
| Bus17 | 0.901/-1.48 | Ploss  | 0.2 MW      |
| Pg    | 3.91 MW     | Qloss  | 0.21 MVAR   |
| Qg    | 2.51 MVAR   | TRload | 77          |

**Çizelge 4.15 :** IEEE-33 baralı test sisteminin hat yüklenmeleri

| Hat | nl | nr | Hat Yüğü | Hat | nl | nr | Hat Yüğü |
|-----|----|----|----------|-----|----|----|----------|
| 1   | 1  | 2  | 23       | 17  | 17 | 18 | 1.1      |
| 2   | 2  | 3  | 41       | 18  | 2  | 19 | 4        |
| 3   | 3  | 4  | 29.5     | 19  | 19 | 20 | 3        |
| 4   | 4  | 5  | 28       | 20  | 20 | 21 | 2        |
| 5   | 5  | 6  | 27.5     | 21  | 21 | 22 | 1        |
| 6   | 6  | 7  | 12.9     | 22  | 3  | 23 | 10.6     |
| 7   | 7  | 8  | 10.5     | 23  | 23 | 24 | 9.6      |
| 8   | 8  | 9  | 8.1      | 24  | 24 | 25 | 4.8      |
| 9   | 9  | 10 | 7.4      | 25  | 6  | 26 | 14.6     |
| 10  | 10 | 11 | 6.7      | 26  | 26 | 27 | 13.6     |
| 11  | 11 | 12 | 6.2      | 27  | 27 | 28 | 13       |
| 12  | 12 | 13 | 5.4      | 28  | 28 | 29 | 12.4     |
| 13  | 13 | 14 | 4.7      | 29  | 29 | 30 | 11       |
| 14  | 14 | 15 | 3.1      | 30  | 30 | 31 | 5.1      |
| 15  | 15 | 16 | 2.5      | 31  | 31 | 32 | 3.3      |
| 16  | 16 | 17 | 1.8      | 32  | 32 | 33 | 0.8      |

Çizelge 4.14'teki bara gerilimleri ve Çizelge 4.15'daki dağıtım hattı verileri normal sınırlar içindedir. Bu güç sisteminde senkron jeneratör 3.91 MW/2.51MVAR aktif/reaktif güç üretmiştir. Bu dağıtım sistemindeki hat kayıpları 0.2 MW/0.21 MVAR'dır.

Durum 2: Durum 2'de 33-baralı test dağıtım ağının ilgili baralarına entegre edilecek şarj istasyonu sayısı bu çalışmada önerilen model ile belirlenmiştir. Her bir şarj istasyonu 0.125 MW güce sahip olduğu varsayılmaktadır (her bir şarj istasyonunun beş aracı şarj ettiği kabul edilmektedir). Önerilen modele göre 1. Adımda yük akış analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.14-4.15'te verilmiştir. Adım 2'de verilen Denklem 3.67'ye göre dağıtım transformatörünün kalan gücü hesaplanır. Hesaplamalara göre trafonun kalan gücü 1.77 MW'dır. Daha sonra Adım 3'te entegre edilebilecek şarj istasyonu sayısı 14 olarak hesaplanır. Daha sonra bu şarj istasyonlarının baralara dağıtımı için Adım 4b uygulanır. Adım 4b, Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.18'a göre (GKİ değerleri şarj istasyonu entegrasyonu öncesinde ve sonrasında hesaplanmıştır), şarj istasyonlarının 1,2,3,4,19,20,21,22,23,24 numaralı baralara entegre edilebileceği sonucuna varılabilir. Daha sonra 14 şarj istasyonu belirlenen baralara dağıtılmaktadır. Bara gerilimi yüksek olan 1,2,3 ve 4 numaralı baralara iki şarj istasyonu, diğerlerine ise tek bir şarj istasyonu entegre edilmiştir. Şarj istasyonları entegre edildikten sonra Adım 5'te tekrar yük akışı gerçekleştirilir. Sonuçlar Çizelge 4.16 ve 4.17'de verilmiştir. Tüm verilerin kısıtların dışına çıkmadığı doğrulandıktan sonra 6.adıma geçilerek güç sisteminin gerilim kararlılık indeksi (GKİ) ölçülür. Bu değer istenilen aralıkta olduğunda 7.Adımda çalışma sonlandırılır. Elde edilen GKİ değerleri Çizelge 4.18'de verilmiştir. Tüm GKİ değerleri sıfır değerinin üzerindedir. Önerilen model ile toplam 14 şarj istasyonu (70 Elektrikli araç) ilgili baralara başarıyla entegre edilmiştir.

**Çizelge 4.16 : IEEE-33 baralı test dağıtım ağı yük akış analizi sonuçları.**

| Bara   | Vpu/deg     | Bara  | Vpu/deg     | Bara  | Vpu/deg     |
|--------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| Bus1   | 0.99/-0.97  | Bus10 | 0.911/-1.55 | Bus22 | 0.976/-1.32 |
| Bus2   | 0.988/-1.21 | Bus11 | 0.91/-1.54  | Bus23 | 0.966/-0.98 |
| Bus3   | 0.971/-0.93 | Bus12 | 0.909/-1.53 | Bus24 | 0.959/-1.1  |
| Bus4   | 0.964/-0.87 | Bus13 | 0.904/-1.63 | Bus25 | 0.955/-1.14 |
| Bus5   | 0.956/-0.8  | Bus14 | 0.902/-1.63 | Bus26 | 0.935/-0.85 |
| Bus6   | 0.937/-0.89 | Bus15 | 0.901/-1.75 | Bus27 | 0.932/-0.8  |
| Bus7   | 0.933/-1.13 | Bus16 | 0.901/-1.77 | Bus28 | 0.926/-1.07 |
| Bus8   | 0.92/-1.29  | Bus17 | 0.90/-1.85  | Bus29 | 0.919/-0.99 |
| Bus9   | 0.918/-1.5  | Bus18 | 0.9/-1.86   | Bus30 | 0.915/-0.88 |
| Pg     | 5.71 MW     | Bus19 | 0.987/-1    | Bus31 | 0.909/-1.62 |
| Qg     | 2.98 MVAR   | Bus20 | 0.978/-1.21 | Bus32 | 0.909/-1.01 |
| Ploss  | 0.24 MW     | Qloss | 0.29 MVAR   | Bus33 | 0.909/-1.62 |
| TRload | 99%         |       |             |       |             |

**Çizelge 4.17 : IEEE-33 baralı test sisteminin hat yüklenmeleri.**

| Hat | nl | nr | Hat Yüğü | Hat | Nereden | Nereye | Hat Yüğü |
|-----|----|----|----------|-----|---------|--------|----------|
| 1   | 1  | 2  | 30.7     | 17  | 17      | 18     | 1.1      |
| 2   | 2  | 3  | 48.6     | 18  | 2       | 19     | 9.2      |
| 3   | 3  | 4  | 32.1     | 19  | 19      | 20     | 6.9      |
| 4   | 4  | 5  | 28.2     | 20  | 20      | 21     | 5.6      |
| 5   | 5  | 6  | 27.6     | 21  | 21      | 22     | 2.3      |
| 6   | 6  | 7  | 12.9     | 22  | 3       | 23     | 13.3     |
| 7   | 7  | 8  | 10.6     | 23  | 23      | 24     | 10.9     |
| 8   | 8  | 9  | 8.2      | 24  | 24      | 25     | 4.8      |
| 9   | 9  | 10 | 7.5      | 25  | 6       | 26     | 14.3     |
| 10  | 10 | 11 | 6.8      | 26  | 26      | 27     | 13.7     |
| 11  | 11 | 12 | 5.5      | 27  | 27      | 28     | 13.1     |
| 12  | 12 | 13 | 5.5      | 28  | 28      | 29     | 12.5     |
| 13  | 13 | 14 | 4.7      | 29  | 29      | 30     | 11.1     |
| 14  | 14 | 15 | 3.1      | 30  | 30      | 31     | 5.1      |
| 15  | 15 | 16 | 2.5      | 31  | 31      | 32     | 3.3      |
| 16  | 16 | 17 | 1.8      | 32  | 32      | 33     | 0.8      |

**Çizelge 4.18 : IEEE-33 baralı test sisteminin GKİ değerleri.**

| Bara  | GKİ/İlk | Bara  | GKİ/İlk | Bara  | GKİ/Son | Bara  | GKİ/Son |
|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| Bus1  | 0.999   | Bus18 | 0.67    | Bus1  | 0.998   | Bus18 | 0.665   |
| Bus2  | 0.999   | Bus19 | 0.988   | Bus2  | 0.995   | Bus19 | 0.975   |
| Bus3  | 0.987   | Bus20 | 0.984   | Bus3  | 0.982   | Bus20 | 0.974   |
| Bus4  | 0.933   | Bus21 | 0.975   | Bus4  | 0.931   | Bus21 | 0.970   |
| Bus5  | 0.9052  | Bus22 | 0.967   | Bus5  | 0.9012  | Bus22 | 0.965   |
| Bus6  | 0.88    | Bus23 | 0.935   | Bus6  | 0.877   | Bus23 | 0.93    |
| Bus7  | 0.82    | Bus24 | 0.912   | Bus7  | 0.815   | Bus24 | 0.902   |
| Bus8  | 0.76    | Bus25 | 0.89    | Bus8  | 0.745   | Bus25 | 0.888   |
| Bus9  | 0.755   | Bus26 | 0.82    | Bus9  | 0.75    | Bus26 | 0.814   |
| Bus10 | 0.74    | Bus27 | 0.81    | Bus10 | 0.735   | Bus27 | 0.804   |
| Bus11 | 0.72    | Bus28 | 0.8     | Bus11 | 0.715   | Bus28 | 0.799   |
| Bus12 | 0.719   | Bus29 | 0.76    | Bus12 | 0.710   | Bus29 | 0.755   |
| Bus13 | 0.712   | Bus30 | 0.74    | Bus13 | 0.706   | Bus30 | 0.735   |
| Bus14 | 0.7     | Bus31 | 0.72    | Bus14 | 0.685   | Bus31 | 0.711   |
| Bus15 | 0.69    | Bus32 | 0.71    | Bus15 | 0.680   | Bus32 | 0.705   |
| Bus16 | 0.685   | Bus33 | 0.7     | Bus16 | 0.675   | Bus33 | 0.685   |
| Bus17 | 0.68    |       |         | Bus17 | 0.677   |       |         |

Şarj istasyonlarının mevcut dağıtım ağları üzerindeki etkisinin önceden tahmin edilmesi sistemin stabil çalışması ve öngörülebilir bakım için önem arz eder. Kontrollü ve kontrolsüz şarj koşullarının dağıtım ağı üzerindeki etkileri, bu çalışmada sunulan modele benzer şekilde entegre edilecek dağıtım sisteminin sanal modeli geliştirilerek incelenebilir. Böylece dağıtım sistemine güvenli bir şekilde entegre edilebilecek şarj istasyonu sayısı belirlenebilmektedir. Daha yüksek kapasiteli sistem bileşenlerine (trafo vb.) yatırım yapmak, dağıtım ağı sistemini istikrarlı ve güvenli tutmanın başka bir yoludur; ancak bileşen

maliyetleri çok yüksektir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, şarj istasyonlarının dağıtım ağına olumsuz etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabilir.

Bu bölümde şarj istasyonlarının dağıtım ağına optimum yerleştirilmesi için Bölüm 3.6.2’de sunulan yeni bir matematiksel model uygulanmıştır. Ayrıca IEEE-33 baralı test dağıtım ağı DigSilent yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Önerilen model, operasyonel kısıtlamaların dışına çıkmadan başarıyla uygulanmıştır. Bu çalışmada iki durum değerlendirilmiştir. İlk durumda modelin etkinliğini test etmek için IEEE-33 baralı test dağıtım ağı kullanılmıştır. Başlangıçta şarj istasyonları aktif olmadan yük akış analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur. İkinci durumda, tüm şarj istasyonları çalışır durumdayken bir yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. Yük akış analizine göre 70 elektrikli aracı aynı anda şarj edebilen şarj istasyonları ilgili baralara bağlanabilmektedir.

Özetle bu bölümde yapılan çalışmanın literatüre katkısı şu şekilde ifade edilebilir:

1. Elektrikli araç şarj istasyonlarının mevcut dağıtım ağları üzerindeki etkileri ve istasyonların bu ağlara optimum entegrasyonu için yeni bir matematiksel model önerilmiştir.
2. Önerilen matematiksel model verimli bir şekilde IEEE 33 baralı test dağıtım ağına uygulanmıştır.
3. Önerilen model ile yük akış analizi kullanılarak belli sayıda aracı aynı anda şarj edebilen şarj istasyonlarının bağlanabileceği baralar belirlenebilmektedir.

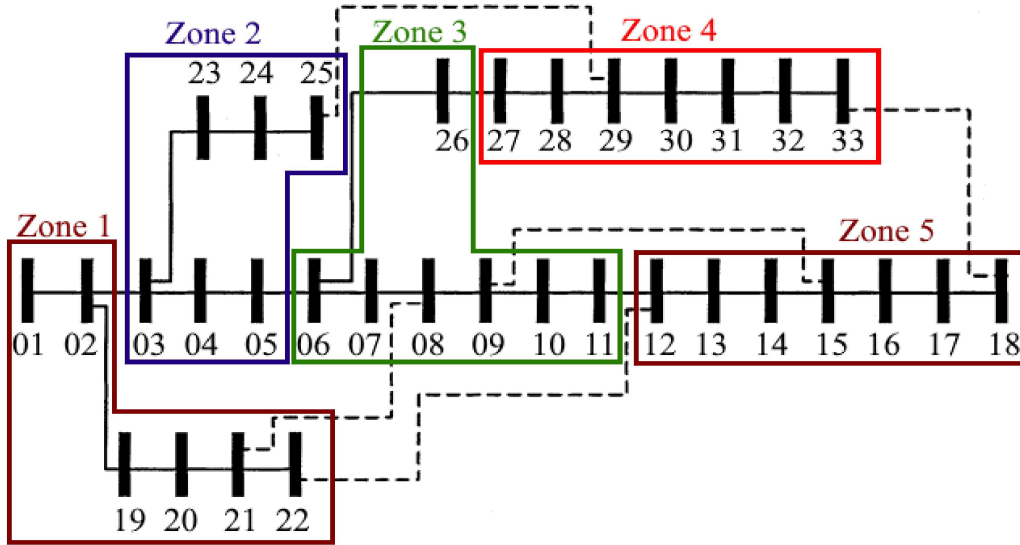
Bu bölümde yapılan simülasyon çalışması, önümüzdeki yıllarda elektrikli araçların mobil yük olarak dağıtım ağına entegrasyonunun planlanmasına yardımcı olabilir. Bu gibi simülasyon çalışmaları, elektrikli araçların mevcut dağıtım ağlarına optimum entegrasyonunda önemli rol oynar. Ayrıca dağıtım ağında daha fazla elektrikli aracın şarj olabilmesini sağlamak, CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltarak çevreye yardımcı olur. Avrupa çevre ajansına göre, 2019'da yeni kayıtlı araçların ortalama emisyon oranı 122 g CO<sub>2</sub>/km'dir [186]. Bu, bir elektrikli aracın yılda 12.000 km yol kat etmesi durumunda yaklaşık 1.4 ton CO<sub>2</sub>'nin önlenebileceği anlamına gelmektedir. İkinci durumda ise 70 elektrikli aracın şarj edilebileceği 14 elektrikli şarj istasyonu dağıtım ağına entegre edilmiştir. Bu durumda yılda yaklaşık 100 ton CO<sub>2</sub> salınımı önlenmiş olmaktadır. Benzer çalışmalar, elektrikli araçların dağıtım ağına etkisini en aza indirirken ülkelerin karbon emisyonu azaltma hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olabilir.

#### 4.4 Problem 3: Şarj İstasyonu Yerleşiminin Modifiye AOA (MAOA ve MDAOA) İle Uygulanması

Bu bölümde elektrikli araç şarj istasyonlarının, Bölüm 3.6.3'te belirtilen gerilim profilinin korunması ve dağıtım ağına olumsuz etkilerini en aza indirmek için modifiye AOA (MAOA ve MDAOA) algoritmaları kullanılarak en uygun lokasyonlara (spesifik baralara) yerleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yerleştirme, güç kaybı, gerilim saptması ve gerilim kararlılık indeksi parametrelerinden oluşan bir indeks ile gerçekleştirilir. Dağıtım ağındaki tüm baraların kararlı durum gerilimlerini ve gerilim açılarını hesaplamak için IEEE-33 baralı, 69-baralı ve 10-baralı Hatay dağıtım ağlarında Newton Raphson yöntemine dayalı bir yük akışı analizi yapılmış ve sonuçlar detaylı olarak tartışılmıştır. Ayrıca MAOA ve MDAOA algoritmalarının etkinliği bilinen diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılmış, üstünlüğü ve performansı ortaya konmuştur.

##### 4.4.1 IEEE-33 baralı test dağıtım ağı

Dağıtım sistemi, [62,75,187,188] çalışmalarında olduğu gibi bölgelere ayrılmıştır. IEEE-33 baralı test dağıtım ağının şeması ve bölgeleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : IEEE-33 baralı test sistemi

Bu bölümde, Denklem 3.70'teki çok amaçlı fonksiyon, AOA ve MAOA algoritmalarında elektrikli araç şarj istasyonlarının dağıtım ağına optimum entegrasyonu (konumlandırılması) için kullanılmıştır. Çok amaçlı fonksiyon, aktif güç kayıplarını, gerilim saptmasını ve GKİ parametrelerini içermektedir. Bu parametreler, uygun bir ağırlık fonksiyonu ile bir amaç

fonksiyonunda birleştirilmiştir. AA ve DA şarj gücü her elektrikli araç için farklı olduğundan 50 kW ile 150 kW arasında değişen çeşitli güç seviyelerinde elektrikli araç şarj istasyonları kullanılmıştır. 1'den 5'e kadar olan bölgeler için istasyonların aktif güç değerleri 120 kW, 75 kW, 150 kW, 100 kW, 50 kW ve reaktif güç değerleri 75 kVAR, 47 kVAR, 95 kVAR, 63 kVAR ve 32 kVAR olarak kabul edilmiştir. Her bölgede, şarj istasyonu yerleştirilmesi için tek bir bara seçilir.

Karşılaştırma amacıyla amaç fonksiyonunun ağırlık katsayıları  $w_1=0.4504$ ,  $w_2=905.9343$ ,  $w_3=95.0525$  olarak ayarlanmıştır. Böylece, minimum (en iyi çözüm) için üç indeks değerinin her biri 100'e ayarlanmıştır (üç indeksin tümü için en iyi yerleştirme sonucu 300'dür).

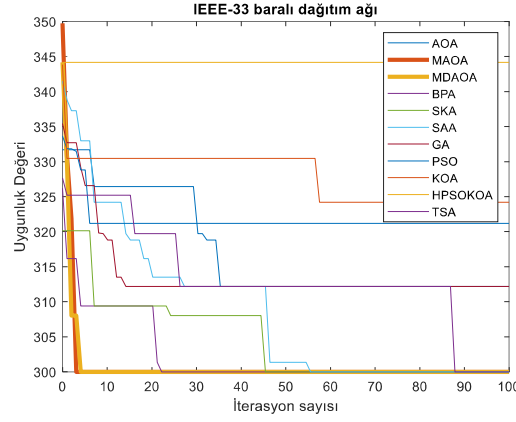
AOA ve modifiye AOA (MAOA ve MDAOA)'ya ek olarak, formüle edilmiş amaç fonksiyonu, etkinliği kanıtlanmış, iyi bilinen, klasik ve yeni optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Bu algoritmalar Bal Porsuğu Algoritması (BPA), Sinüs Kosinüs Algoritması (SKA), Sosyal Ağ Araması (SAA), Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Kelebek Optimizasyonu Algoritması (KOA), Hibrit Parçacık Sürü Optimizasyonu Kelebek Optimizasyonu (HPSOKOA) ve Tulumlular Sürü Algoritması (TSA) algoritmalarıdır. Karşılaştırmalı sonuçlar, Şekil 4.9'da grafik olarak ve Çizelge 4.19'da tablo halinde sunulmuştur. Sonuçlar, popülasyon boyutu (Population size)  $N=30$ , maksimum iterasyon sayısı  $t_{max}=100$  ve 30 çalışma kullanılarak hesaplanmıştır. Standart AOA, mühendislik problemleri ve standart optimizasyon fonksiyonları için farklı  $C_3$  ve  $C_4$  değerlerine sahiptir. Mühendislik problemleri için önerilen değerler AOA için daha iyi sonuçlar sağladığından modifiye AOA ile kıyaslarken bu önerilen değerler kullanılmıştır.

**Çizelge 4.19 :** Elektrikli araç şarj istasyonlarının IEEE-33 baralı test dağıtım ağına yerleştirilmesi için optimizasyon algoritmalarının karşılaştırmalı sonuçları.

|            | AOA      | MAOA            | MDAOA           | BPA      | SKA             | SAA             | GA       | PSO      | KOA      | HPSOKOA  | TSA      |
|------------|----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ortalama   | 3.12E+02 | <b>3.01E+02</b> | <b>3.01E+02</b> | 3.02E+02 | <b>3.01E+02</b> | <b>3.02E+02</b> | 3.07E+02 | 3.19E+02 | 3.27E+02 | 3.35E+02 | 3.13E+02 |
| Std. Sapma | 6.13E+00 | 2.75E+00        | 2.22E+00        | 4.48E+00 | 1.46E+00        | 4.20E+00        | 6.14E+00 | 5.76E+00 | 6.77E+00 | 6.16E+00 | 1.24E+01 |
| Medyan     | 3.12E+02 | 3.00E+02        | 3.00E+02        | 3.00E+02 | 3.00E+02        | 3.00E+02        | 3.12E+02 | 3.20E+02 | 3.30E+02 | 3.34E+02 | 3.09E+02 |
| Maksimum   | 3.26E+02 | 3.15E+02        | 3.12E+02        | 3.14E+02 | 3.08E+02        | 3.12E+02        | 3.14E+02 | 3.35E+02 | 3.39E+02 | 3.47E+02 | 3.42E+02 |

Minimum sonuç veren en iyi lokasyonlar 1, 3, 12, 26, 27 numaralı baralardır. AOA ile amaç fonksiyonunun 30 kez çalışmasında minimum uygunluk değeri 3.03E+02, ortalama 3.12E+02, maksimum 3.26E+02 hesaplanmıştır. Ayrıca AOA için standart sapma 6.13E+00 bulunmuştur. MAOA ve MDAOA ile aynı koşullar altında, amaç fonksiyonu için minimum uygunluk değeri her iki algoritma için 3.00E+02, ortalama 3.01E+02 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca MAOA ve MDAOA için standart sapma değerleri sırasıyla 2.75E+00 ve 2.22E+00

olarak hesaplanmıştır. Minimum GKİ değeri 0.9386, minimum gerilim değeri 0.9923 olarak hesaplanmıştır. Probleme ait tüm algoritmaların yakınsama grafikleri Şekil 4.9’da verilmiştir.



**Şekil 4.9 :** MAOA, MDAOA ve diğer optimizasyon algoritmalarının IEEE-33 baralı dağıtım ağı için uygunluk değerlerini gösteren grafik.

Çizelge 4.20'deki sayısal sonuçlar ve Şekil 4.9'daki yakınsama eğrileri diğer tekniklerle karşılaştırıldığında modifiye AOA (MAOA ve MDAOA)'nın başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir. Bu, MAOA'nın güç sistemi mühendisliğinde önemli ve zorlu bir problem olan şarj istasyonlarının yerleştirme probleminde kullanılabileceğini göstermektedir. Elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılmasından sonraki gerilim detayları Çizelge 4.20'de gösterilmiştir.

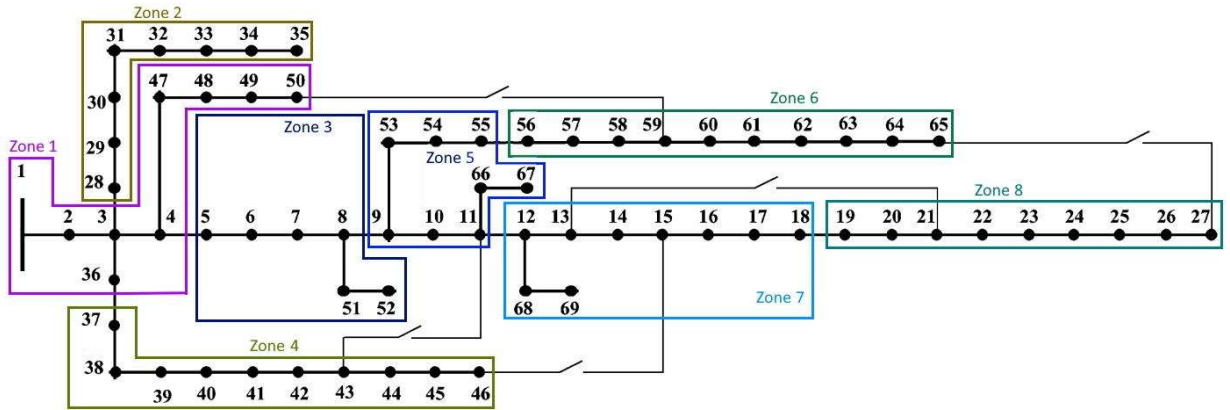
**Çizelge 4.20 :** Elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleşiminden sonra IEEE-33 baralı test dağıtım ağındaki bara gerilimleri.

| Gerilim |        | Gerilim |        | Gerilim |              |
|---------|--------|---------|--------|---------|--------------|
| Bara    | p.u.   | Bara    | p.u.   | Bara    | Gerilim p.u. |
| 1       | 1.0000 | 12      | 0.9923 | 23      | 0.9982       |
| 2       | 0.9997 | 13      | 0.9923 | 24      | 0.9982       |
| 3       | 0.9982 | 14      | 0.9923 | 25      | 0.9982       |
| 4       | 0.9972 | 15      | 0.9923 | 26      | 0.9935       |
| 5       | 0.9963 | 16      | 0.9923 | 27      | 0.9931       |
| 6       | 0.9939 | 17      | 0.9923 | 28      | 0.9931       |
| 7       | 0.9937 | 18      | 0.9923 | 29      | 0.9931       |
| 8       | 0.9934 | 19      | 0.9997 | 30      | 0.9931       |
| 9       | 0.9930 | 20      | 0.9997 | 31      | 0.9931       |
| 10      | 0.9925 | 21      | 0.9997 | 32      | 0.9931       |
| 11      | 0.9924 | 22      | 0.9997 | 33      | 0.9931       |

Çizelgeye göre gerilim değerlerinin operasyonel sınırların dışına çıkmadığı görülmüştür.

#### 4.4.2 IEEE-69 baralı test dağıtım ağı

IEEE 69 bara test dağıtım ağının sekiz bölüme ayrılmış hali Şekil 4.10'da sunulmuştur.



Şekil 4.10 : IEEE-69 baralı test sistemi

Sekiz bölge için, elektrikli araç şarj istasyonlarının aktif güç değerleri 120 kW, 75 kW, 150 kW, 100 kW, 50 kW, 130 kW, 50 kW, 100 kW ve reaktif güç değerleri 75 kVAR, 47 kVAR, 95 kVAR, 63'tür. kVAR, 32 kVAR, 82 kVAR, 32 kVAR, 63 kVAR olarak kabul edilmiştir. IEEE 69 baralı test dağıtım ağı için, IEEE 33 baralı test sistemi simülasyonundaki ile aynı aralıktaki güç değerleri kullanılmıştır.

Amaç fonksiyonunun ağırlık katsayıları  $w_1=0.6136$ ,  $w_2=1075.0363$ ,  $w_3=95.5665$  (üç indeksin tümü için en iyi yerleştirme sonucu 300 olacak şekilde) ayarlanmıştır.

Elektrikli araç şarj istasyonlarının IEEE 69-bus dağıtım sistemine yerleştirilmesi için AOA, MAOA, BPA, SKA, SAA, GA, PSO, KOA, HPSOKOA ve TSA'nın karşılaştırmalı sonuçlarını gösteren grafik Şekil 4.11'de, sayısal sonuçlar Çizelge 4.21'de sunulmuştur. Sonuçlar, popülasyon sayısı  $N=30$ , maksimum iterasyon sayısı=100 ve 30 kez çalıştırma olacak şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 4.21 : Elektrikli araç şarj istasyonlarının IEEE-69 baralı dağıtım sistemine yerleştirilmesi için optimizasyon algoritmalarının sonuçlarının karşılaştırması.

|            | AOA      | MAOA            | MDAOA           | BPA      | SKA      | SAA      | GA       | PSO      | KOA      | HPSOKOA  | TSA      |
|------------|----------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ortalama   | 3.12E+02 | <b>3.01E+02</b> | <b>3.01E+02</b> | 3.09E+02 | 3.12E+02 | 3.02E+02 | 3.02E+02 | 3.21E+02 | 3.37E+02 | 3.63E+02 | 3.36E+02 |
| Std. Sapma | 1.28E+01 | 1.64E+00        | 8.44E-01        | 1.54E+01 | 6.25E+00 | 7.21E+00 | 1.54E+00 | 1.76E+01 | 1.88E+01 | 2.21E+01 | 2.69E+01 |
| Medyan     | 3.09E+02 | 3.01E+02        | 3.01E+02        | 3.04E+02 | 3.12E+02 | 3.01E+02 | 3.01E+02 | 3.10E+02 | 3.34E+02 | 3.67E+02 | 3.38E+02 |
| Maksimum   | 3.48E+02 | 3.08E+02        | 3.04E+02        | 3.53E+02 | 3.34E+02 | 3.40E+02 | 3.04E+02 | 3.45E+02 | 3.65E+02 | 4.02E+02 | 4.02E+02 |

Minimum sonuç veren en iyi lokasyonlar 1, 5, 9, 12, 19, 28, 37, 56 numaralı baralardır.

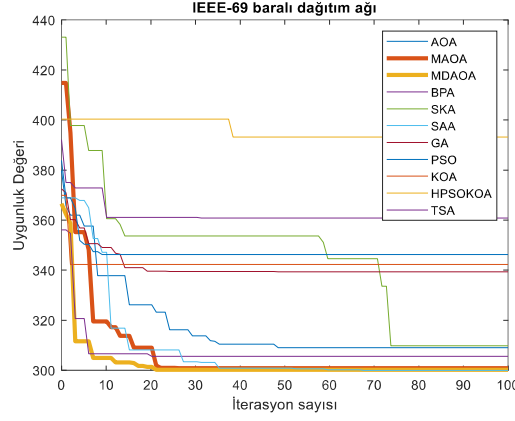
AOA ile amaç fonksiyonunun 30 kez çalışması için, ortalama 3.12E+02, medyan 3.09E+02 ve maksimum 3.48E+02 hesaplanmıştır. Ayrıca AOA için standart sapma 1.28E+01

bulunmuştur. MAOA ile aynı koşullar altında yapılan 30 kez çalışmada, amaç fonksiyonu için, ortalama  $3.01E+02$ , medyan  $3.01E+02$  ve maksimum  $3.08E+02$  uygunluk değeri hesaplanmıştır. Ayrıca MAOA ile standart sapma  $1.64E+00$  bulunmuştur. MDAOA için, ortalama  $3.01E+02$ , medyan  $3.01E+02$  ve maksimum  $3.04E+02$  uygunluk değeri hesaplanmıştır. Ayrıca MDAOA ile standart sapma  $8.44E-01$  bulunmuştur. Elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleştirilmesinden sonraki gerilim detayları Çizelge 4.22'de verilmiştir.

**Çizelge 4.22 :** Elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleştirilmesinden sonra IEEE-69 baralı sistemindeki bara gerilimleri.

| Bara No | Gerilim<br>p.u. | Bara No | Gerilim<br>p.u. | Bara No | Gerilim<br>p.u. |
|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|
| 1       | 1.0000          | 24      | 0.9935          | 47      | 1.0000          |
| 2       | 1.0000          | 25      | 0.9935          | 48      | 1.0000          |
| 3       | 1.0000          | 26      | 0.9935          | 49      | 1.0000          |
| 4       | 1.0000          | 27      | 0.9935          | 50      | 1.0000          |
| 5       | 0.9999          | 28      | 1.0000          | 51      | 0.9979          |
| 6       | 0.9990          | 29      | 1.0000          | 52      | 0.9979          |
| 7       | 0.9982          | 30      | 1.0000          | 53      | 0.9977          |
| 8       | 0.9979          | 31      | 1.0000          | 54      | 0.9976          |
| 9       | 0.9978          | 32      | 1.0000          | 55      | 0.9974          |
| 10      | 0.9976          | 33      | 1.0000          | 56      | 0.9972          |
| 11      | 0.9974          | 34      | 1.0000          | 57      | 0.9963          |
| 12      | 0.9966          | 35      | 1.0000          | 58      | 0.9963          |
| 13      | 0.9958          | 36      | 1.0000          | 59      | 0.9963          |
| 14      | 0.9950          | 37      | 0.9998          | 60      | 0.9963          |
| 15      | 0.9942          | 38      | 0.9997          | 61      | 0.9963          |
| 16      | 0.9940          | 39      | 0.9997          | 62      | 0.9963          |
| 17      | 0.9937          | 40      | 0.9997          | 63      | 0.9963          |
| 18      | 0.9937          | 41      | 0.9997          | 64      | 0.9963          |
| 19      | 0.9935          | 42      | 0.9997          | 65      | 0.9963          |
| 20      | 0.9935          | 43      | 0.9997          | 66      | 0.9974          |
| 21      | 0.9935          | 44      | 0.9997          | 67      | 0.9974          |
| 22      | 0.9935          | 45      | 0.9997          | 68      | 0.9966          |
| 23      | 0.9935          | 46      | 0.9997          | 69      | 0.9966          |

Minimum GKİ değeri 0.9353, minimum gerilim değeri 0.9924 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında, MAOA ve MDAOA'nın minimum standart sapma ile optimum sonuçlar ürettiği görülmektedir. AOA, MAOA ve MDAOA algoritmalarının da aralarında bulunduğu 11 algoritmanın minimum sonucunun yakınsama eğrileri Şekil 4.11'de verilmiştir.

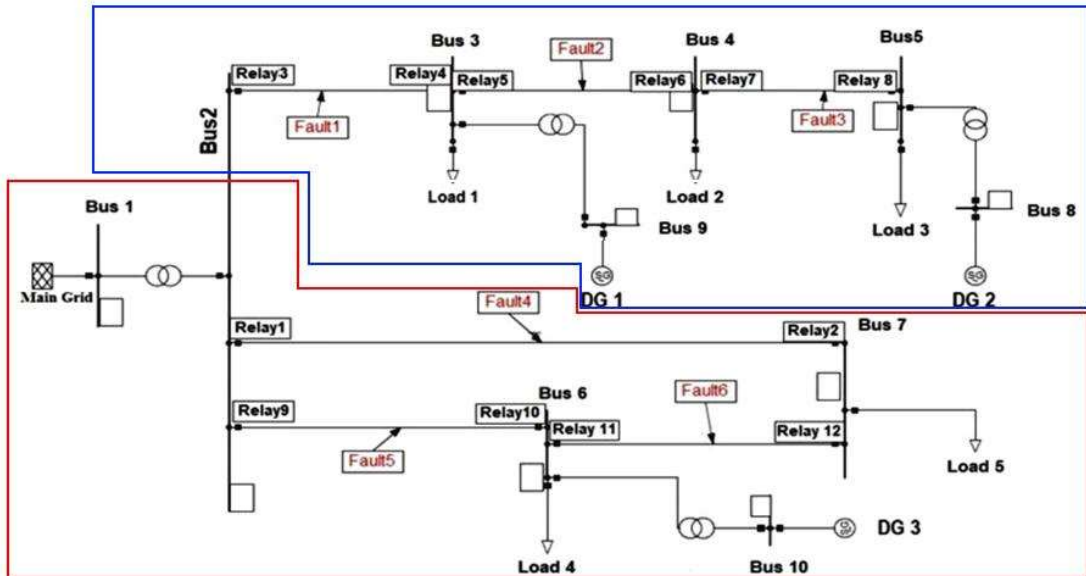


**Şekil 4.11 :** Elektrikli araç şarj istasyonlarının IEEE-69 baralı test dağıtım ağına yerleştirilmesi için optimizasyon algoritmalarının sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.11 ve Çizelge 4.22, MAOA ve MDAOA'nın diğer tekniklerle karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar elde ettiğini açıkça göstermektedir.

#### 4.4.3 Hatay 10-baralı dağıtım ağı

Bölüm 3.5.4'te sunulan 10 baralı Hatay dağıtım ağına AOA ve modifiye AOA(MAOA ve MDAOA) ile şarj istasyonu yerleşim problemi uygulanmıştır. Sonuçlar, elektrikli araç şarj istasyonlarının dağıtım ağına hangi baralara konumlandırılabilirliğini göstermektedir. Bu ağ iki bölgeye ayrılmıştır. Birinci bölgede 2, 3, 4, 5, 8 ve 9 numaralı baralar bulunmaktadır. İkinci bölgede ise 1,6,7 ve 10 numaralı baralar bulunmaktadır. Hatay 10 baralı dağıtım ağının iki bölüme ayrılmış hali Şekil 4.12'de sunulmuştur.



**Şekil 4.12 :** Hatay dağıtım ağının 10 baralı sanal modeli.

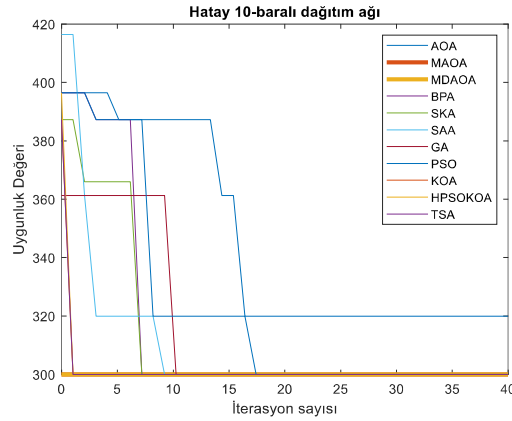
İki bölge için, elektrikli araç şarj istasyonlarının aktif güç değerleri 120 kW, 75 kW ve reaktif

güç değerleri 75 kVAR, 47 kVAR olarak kabul edilmiştir. Elektrikli araç şarj istasyonlarının 10 baralı Hatay dağıtım ağına yerleştirilmesi için AOA, MAOA, MDAOA ve sekiz diğer optimizasyon algoritmalarından elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırması Çizelge 4.23'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.23 :** Elektrikli araç şarj istasyonlarının IEEE-69 baralı dağıtım sistemine yerleştirilmesi için optimizasyon algoritmalarının sonuçlarının karşılaştırması.

|            | AOA      | MAOA            | MDAOA           | BPA      | SKA             | SAA             | GA       | PSO      | KOA             | HPSOKOA         | TSA      |
|------------|----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|----------|----------|-----------------|-----------------|----------|
| Ortalama   | 3.19E+02 | <b>3.00E+02</b> | <b>3.00E+02</b> | 3.07E+02 | <b>3.00E+02</b> | <b>3.00E+02</b> | 3.24E+02 | 3.48E+02 | <b>3.00E+02</b> | <b>3.00E+02</b> | 3.06E+02 |
| Std. Sapma | 3.06E+01 | 0               | 0               | 2.36E+00 | 0               | 0               | 4.05E+00 | 6.63E+00 | 0               | 0               | 5.2671   |
| Medyan     | 3.00E+02 | 3.00E+02        | 3.00E+02        | 3.00E+02 | 3.00E+02        | 3.00E+02        | 3.20E+02 | 3.00E+02 | 3.00E+02        | 3.00E+02        | 3.00E+02 |
| Maksimum   | 3.96E+02 | 3.00E+02        | 3.00E+02        | 3.96E+02 | 3.00E+02        | 3.00E+02        | 3.96E+02 | 4.07E+02 | 3.00E+02        | 3.00E+02        | 3.96E+02 |

AOA ile amaç fonksiyonunun 30 kez çalışması için minimum uygunluk değeri 3.00E+02, ortalama 3.19E+02, medyan 3.00E+02 ve maksimum 3.96E+02 hesaplanmıştır. Ayrıca AOA için standart sapma 3.06E+01 bulunmuştur. MAOA ve MDAOA ile aynı koşullar altında yapılan 30 kez çalışmada, amaç fonksiyonu için minimum 3.00E+02, ortalama 3.00E+02, medyan 3.00E+02 ve maksimum 3.00E+02 uygunluk değeri hesaplanmıştır. Ayrıca modifiye algoritmalar MAOA ve MDAOA için standart sapma 0 olarak hesaplanmıştır. 11 optimizasyon algoritmasının yakınsama eğrisi grafikleri karşılaştırması Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.13 :** Hatay dağıtım ağının 10 baralı sanal modeli için optimizasyon algoritmalarının uygunluk değeri yakınsama eğrisi grafikleri karşılaştırması.

Sonuçlar, MAOA ve MDAOA'nın diğer tekniklerle karşılaştırıldığında düşük standart sapma değerleri ile başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermektedir. Bu da MDAOA'nın güç sistem mühendisliğinde dağıtım sistemi açısından kritik öneme sahip elektrikli araç şarj istasyonu yerleşimi probleminde kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu bölümde, gerilim profilinin bozulması, aktif güç kayıplarının artması, maksimum yük talebi, iletim hatlarının ve trafoların aşırı yüklenmesi gibi gerilim kalitesi ile ilgili faktörleri azaltarak dağıtım ağında elektrikli araç şarj istasyonlarının optimum şekilde konumlandırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, şarj istasyonlarının yüksek maliyeti nedeniyle dağıtım sistemindeki en uygun konuma kurulmaları gerekmektedir. Bu bölümde, bir şarj istasyonunun dağıtım sisteminde uygun bir baraya yerleştirilmesi, güç kaybı, gerilim sapması ve gerilim kararlılık indeksi (GKİ) gibi parametrelerin kombinasyonuna dayalı olarak gerçekleştirilir. Bu indeks Newton-Raphson tipi yük akışı analizinde kullanılarak, IEEE-33 baralı, IEEE-69 baralı test dağıtım ağlarına ve 10 baralı Hatay dağıtım ağına uygulanmıştır. Ardından, yük akış analizinin sonucu, standart AOA, modifiye AOA(MAOA ve MDAOA), BPA, SKA, SAA, GA, PSO, KOA, HPSOKOA ve TSA kullanılarak en düşük maliyeti hesaplamak için bir amaç fonksiyonu haline getirilmiştir. Algoritmaların sonuçları, şarj istasyonlarının dağıtım sisteminde tam olarak hangi baraya konumlandıracağını hesaplamaktadır.

Ayrıca, AOA algoritmasının beş parametresi ( $C_3$ ,  $C_4$  ve üç olasılık katsayısı), daha iyi sonuçlar veren modifiye AOA'yı elde etmek için BPA algoritması kullanılarak değiştirilmiştir. Bu değişiklik, elektrikli araç şarj istasyonları yerleştirme problemine daha kesin ve doğru çözümler seti üretmektedir. Önerilen model ve çözüm yaklaşımı, diğer test edilen algoritmalarla karşılaştırıldığında, modifiye AOA ile birlikte şarj istasyonları yerleştirme probleminde daha iyi performans göstermektedir. Böylece dağıtım ağı, istasyonların devreye alınmasından daha az etkilenecek daha iyi işletme gerilimi kalitesi elde edilir. Bu bölümde yapılan çalışmanın sonuçları, bir algoritmanın modifiye versiyonunun, elektrikli araç şarj istasyonları yerleştirme problemi, elektrikli araç penetrasyonunun dağıtım ağı üzerindeki etkilerini azaltma ve gerilim profilini iyileştirme gibi belirli problemlerin çözümünde daha etkili olabileceğini göstermektedir.

Önerilen çalışma, dağıtım ağı sistem parametrelerini, sistemin kısıtlarını gözeterek, hem IEEE hem de gerçek test sistemlerinde test ederek sorunu yeni bir modifiye algoritma ile çözerek kolektif bir yaklaşım sağlaması açısından benzersizdir.

Bu bölümde yapılan çalışmanın katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleşim probleminde AOA ile elde edilen sonuçları iyileştirmek amacıyla Bölüm 3'te önerilen yeni, modifiye AOA (MAOA ve MDAOA) algoritmalarının etkinliği test edilmiştir.

- AOA'nın performansı, erken yakınsamaların önüne geçmek ve farklı mühendislik problemlerinin çözümünde keşif ve sömürü dengesini iyileştirmek için parametreler değiştirilerek geliştirilmiştir.
- Önerilen modifiye algoritmaların etkinliği çok amaçlı bir problem fonksiyonu ile test edilmiş ve sonuçlar literatürde önerilen diğer iyi bilinen algoritmalarla karşılaştırılmıştır.
- Önerilen yöntem hem IEEE hem de gerçek dağıtım sisteminde test edilmiştir.

#### 4.5 Problem 4: Elektrikli Otobüsler İçin Şarj İstasyonu Yerleşiminin AÇO İle Uygulanması

Elektrikli otobüslerin şarj olabileceği şarj istasyonlarının yerleşim probleminin çözümü için güncel optimizasyon algoritmaları karşılaştırılmıştır. Amaç fonksiyonu, hız ve doğruluk açısından 12 algoritma tarafından işlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.24'te verilmiştir.

**Çizelge 4.24 :** Amaç fonksiyonu için optimizasyon algoritmalarının karşılaştırılması.

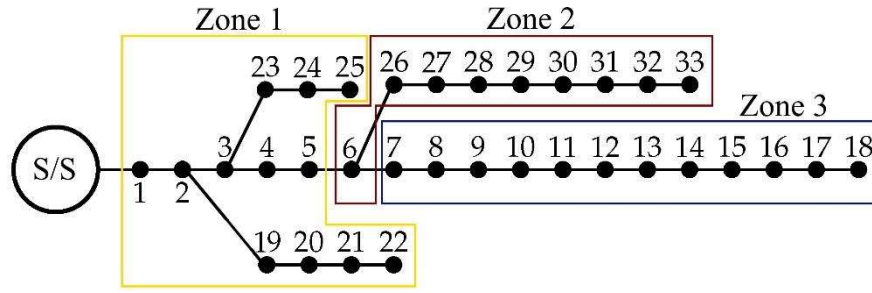
| No | Yıl  | Algoritma  | $t_{max}=100$ |     |                |
|----|------|------------|---------------|-----|----------------|
|    |      |            | Süre (s)      | Hız | Doğruluk Oranı |
| 1  | 1995 | PSO [116]  | 60.28         |     | √              |
| 2  | 2015 | GAO [189]  | 58.88         | √   | √              |
| 3  | 2015 | KAO [183]  | 59.59         |     |                |
| 4  | 2016 | SKA [123]  | 58.86         | √   | √              |
| 5  | 2016 | KOA [118]  | 58.93         |     |                |
| 6  | 2017 | SSOA [121] | 59.12         |     |                |
| 7  | 2019 | DO [185]   | 59.13         |     | √              |
| 8  | 2020 | TAA [190]  | 58.98         | √   |                |
| 9  | 2020 | KOO [191]  | 237.37        |     | √              |
| 10 | 2021 | AOA [119]  | 59.28         |     | √              |
| 11 | 2022 | BPA [122]  | 59.48         |     |                |
| 12 | 2022 | AÇO [125]  | 58.78         | √   | √              |

Çizelge 4.24'e göre AÇO algoritması, diğer algoritmalarla kıyasla hız ve doğruluk açısından daha iyi bir performans sergilemiştir. AÇO yazarları, algoritmayı tek modlu, çok modlu, sabit boyutlu çok modlu fonksiyonlarda ve mühendislik problemlerinde test etmişlerdir [30]. Sonuçların etkili ve iddialı olduğu görülmüştür. Algoritmanın tek modlu fonksiyonlardaki üstünlüğü keşif aşamasının etkinliğini göstermektedir. Bu arada multimodal fonksiyonların üstünlüğü sömürü aşamasının üstünlüğünü göstermektedir. Bu nedenlerle bu çalışmada optimizasyon algoritması olarak AÇO kullanılmıştır.

Önerilen yöntem MatLab 2019b programı kullanılarak geliştirilmiştir. IEEE-33 ve IEEE-69 baralı test dağıtım ağları elektrikli otobüslere uygun olarak modifiye edilmiş ve test edilmiştir. Test sistemlerinde baralar arası mesafe 1 km olarak kabul edilmektedir [192]. Şarj istasyonu gücünün [153]'teki gibi 300 kW olduğu varsayılmıştır. Her aday bara için bölgenin nüfusu, günlük trafikteki araç sayısı, yakın çevredeki İÇN sayısı (alışveriş merkezi, okul, üniversite, kamu binaları, organize sanayi bölgeleri, müzeler, sergiler, fuarlar, tarihi yerler, vb.), konumun yaklaşık maliyeti (\$/m<sup>2</sup>), yükseklik verileri (m), yol durumu (1-3), yolcu yoğunluğu (%0-100 arasında, max 5625 kg), durak yoğunluğu (durak sayısı/km) ve ortalama hız (km/saat) bilgisi kullanılmıştır.

#### 4.5.1 IEEE-33 baralı test dağıtım ağı

Dağıtım sistemi, [62,75,187,188] çalışmalarında olduğu gibi bölgelere ayrılmıştır. IEEE-33 baralı test sisteminin şeması ve bölgeleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14 : IEEE-33 baralı test sistemi ve üç bölge

Her bölgede bir otobüs güzergâhı olduğu varsayılmıştır. Bölgeler ve rotalar Çizelge 4.25'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.25 : Her bölge için rota bilgisi.

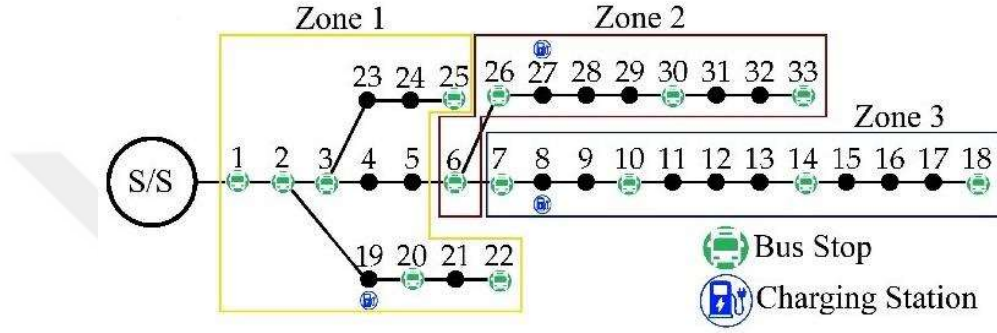
| Bölge   | Başlangıç / Bitiş<br>Terminal / Hareket<br>Noktası | Rota                          | Rota Uzunluğu<br>(km) |
|---------|----------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Bölge 1 | 1                                                  | 1-2-3-25-3-5-3-2-20-22-20-2-1 | 22                    |
| Bölge 2 | 6                                                  | 6-26-30-33-30-26-6            | 16                    |
| Bölge 3 | 7                                                  | 7-10-14-18-14-10-7            | 22                    |

Önerilen yöntemde, AÇO algoritması, optimum şarj istasyonu konumunu ararken, güç kaybı, gerilim sapması, GKİ, nüfus yoğunluğu, trafik yoğunluğu, İÇN'lere yakınlık ve şarj istasyonu konumu maliyet parametrelerini kullanarak çok amaçlı fonksiyonun uygunluk değerlerini hesaplar. Bu parametrelerin ağırlık katsayıları güç etkileri için  $w_1$  ve sosyal ve

Çevresel etkiler için  $w_2$  olmak üzere ikiye ayrılmıştır.  $w_1$  güç kaybı, gerilim sapması ve GK  katsayılarını temsil eder ve  $w_2$  nüfus, trafik,   N ve arazi maliyeti parametrelerinin katsayılarını temsil eder.

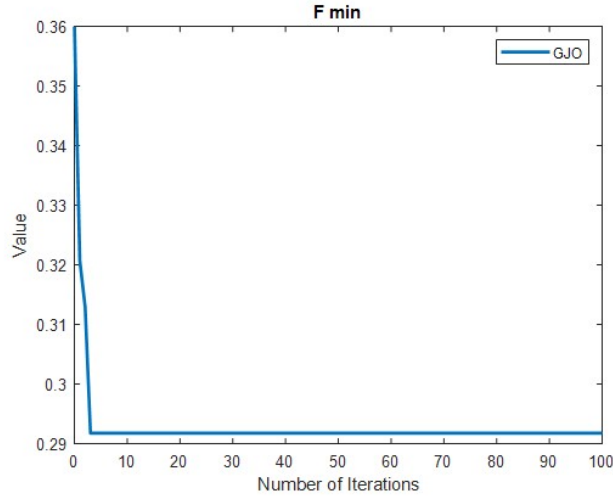
Ağırlık katsayılarına göre üç durum değerlendirilmiştir.

**Durum 1:** Birinci durumda ağırlık katsayısı 1 olarak ayarlanmış ve parametreler uygunluk puanını eşit olarak etkilemektedir. Tüm ağırlıkların eşit olduğu durum şekil 4.15'te gösterilmiştir.



**şekil 4.15 :** IEEE-33 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj istasyonu konumlarını gösteren diyagram.

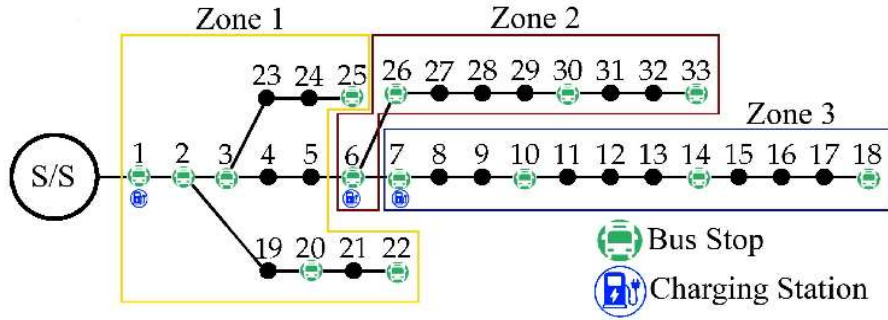
şekil 4.28'de şarj istasyonları 19, 27 ve 8 numaralı baralara yerleştirilmiştir. Optimizasyonun yakınsama grafiği şekil 4.16'da verilmiştir.



**şekil 4.16 :** IEEE-33 baralı test sistemi için 3.durumun yakınsama eğrisi.

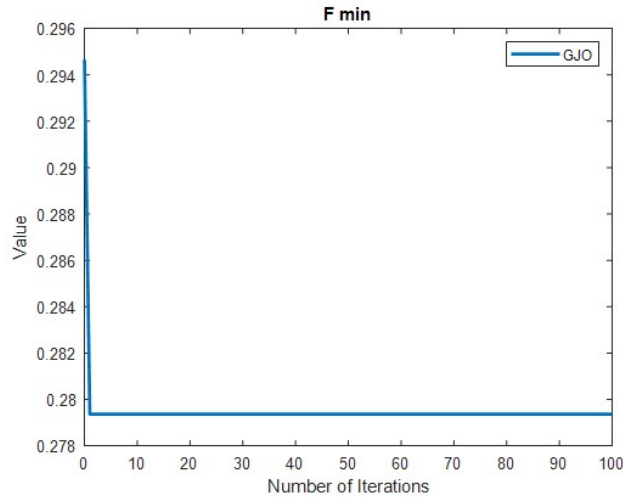
şarj istasyonu yerleşimi sonrası yük akış analizi yapıldığında minimum GK  değeri 0.8285, minimum gerilim değeri 0.9855 (p.u.) ve güç kaybı 863.0344 kW'dır.

**Durum 2:** Bu durum, amaç fonksiyonunda güç etkilerine öncelik vermek için sadece  $w_1$  ağırlığının yükseltildiği ve daha iyi güç kalitesine sahip baraların seçildiği durumdur. Yeni şarj istasyonu yerleşimi Şekil 4.17'de gösterildiği gibidir.



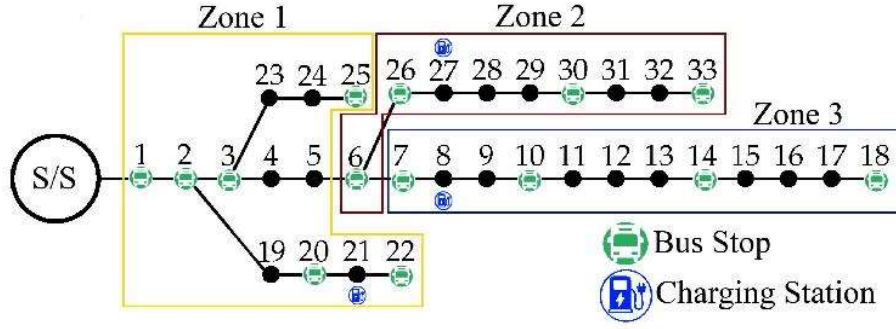
**Şekil 4.17 :** IEEE-33 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj istasyonlarını gösteren diyagram (Güç etkisi ağırlıklı).

Şekil 4.17'deki diyagrama göre şarj istasyonları 1, 6 ve 7 numaralı baralara yerleştirilmiştir. Güç kaybı 863.0344 kW'tan 713.4195 kW'a düşmüş ve minimum gerilim değeri 0.9855'ten 0.9874'e çıkmıştır. Optimizasyonun yakınsama grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir.



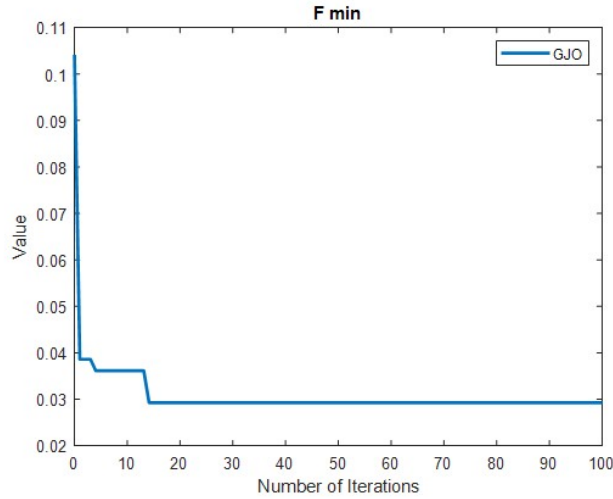
**Şekil 4.18 :** IEEE-33 baralı test sistemi için 2.durumun yakınsama eğrisi.

**Durum 3:** Bu durum ise amaç fonksiyonunda güç etkilerinin ağırlığının sabit tutulup çevresel ve sosyal etkilerin ağırlığı olan  $w_2$ 'nin artırıldığı durumdur. Oluşan yeni yerleşim Şekil 4.19'deki gibidir.



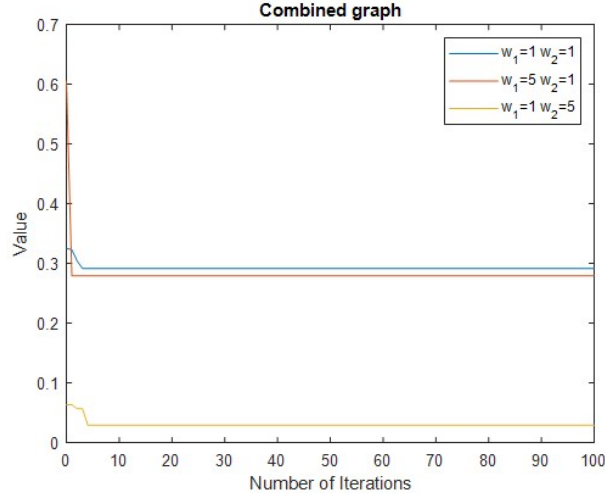
**Şekil 4.19 :** IEEE-33 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj istasyonlarını gösteren diyagram (Sosyal ve çevresel etki ağırlıklı).

Bu senaryo için, sosyal ve çevresel faktörlere öncelik verilir ve Şekil 4.19'da gösterilen 21, 27 ve 8 numaralı baralara şarj istasyonları yerleştirilir. Optimizasyonun yakınsama grafiği Şekil 4.20'de verilmiştir.



**Şekil 4.20 :** IEEE-33 baralı test sistemi için 3.durumun yakınsama eğrisi.

Üç durumu temsil eden birleşik grafik, Şekil 4.21'de gösterilmektedir.



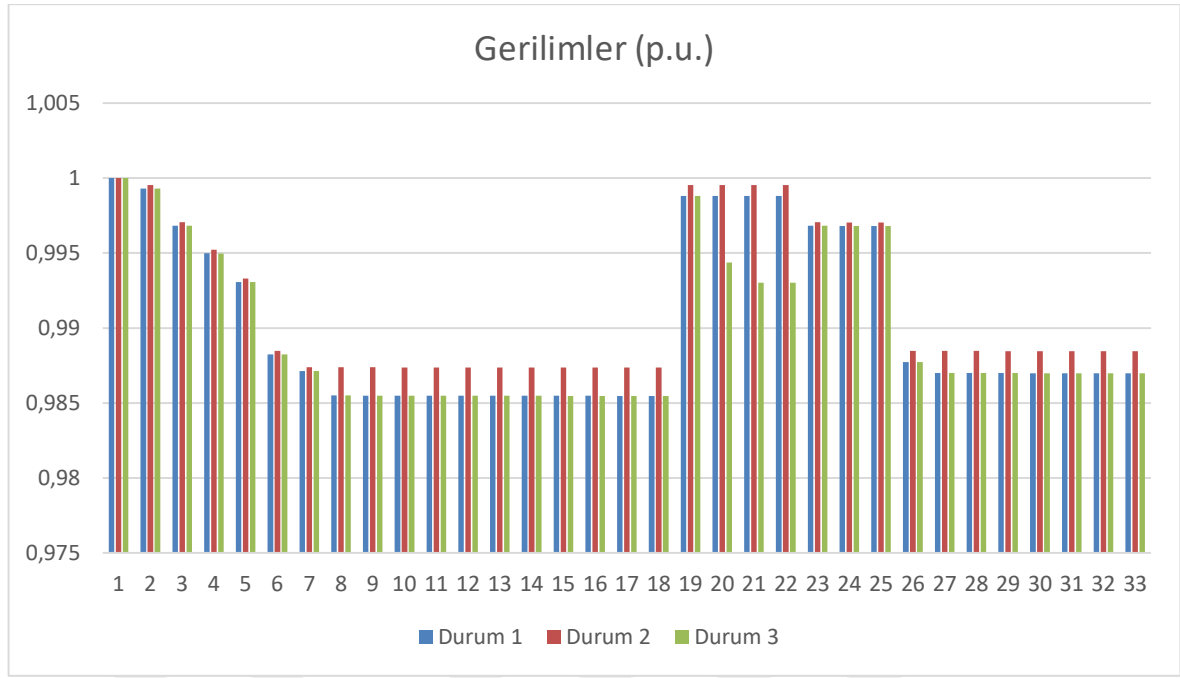
**Şekil 4.21** : IEEE-33 baralı test sistemi için tüm durumların birleştirilmiş yakınsama grafiği.

IEEE-33 baralı test dağıtım ağında üç farklı yerleştirme gerçekleştirilmiştir. Ağırlıklar, minimum GKİ, minimum gerilim, güç kaybı ve seçilen baralar Çizelge 4.26'da sunulmaktadır.

**Çizelge 4.26** : Farklı ağırlıklar için şarj istasyonu yerleşimi ve güç kalitesi (300 kW şarj gücü).

|         | Min GKİ | Min V (p.u.) | Güç kaybı<br>$P_{Loss}$ (kW) | Baralar<br>(Bölgelere<br>göre sıralanmış) |
|---------|---------|--------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| Durum 1 | 0.8285  | 0.9855       | 863.0344                     | 19, 27, 8                                 |
| Durum 2 | 0.5686  | 0.9874       | 713.4195                     | 1, 6, 7                                   |
| Durum 3 | 0.7192  | 0.9855       | 1016.1008                    | 21, 27, 8                                 |

Çizelge 4.26'dan, belirli bir parametrenin ağırlığının değiştirilmesinin, o parametre için en uygun baraları öne çıkardığı çıkarımı yapılabilir. Tüm baraların gerilim grafiği Şekil 4.22'de verilmiştir. Birinci durum ile ikinci durum karşılaştırıldığında gerilim kararlılığı iyileşmiştir. Güç kaybı %17.3359 azalmış ve minimum gerilim %0.1928 artmıştır. Sosyal etkilere öncelik verildiğinde, güç kaybı ikinci duruma göre %42.4268 oranında artmaktadır.



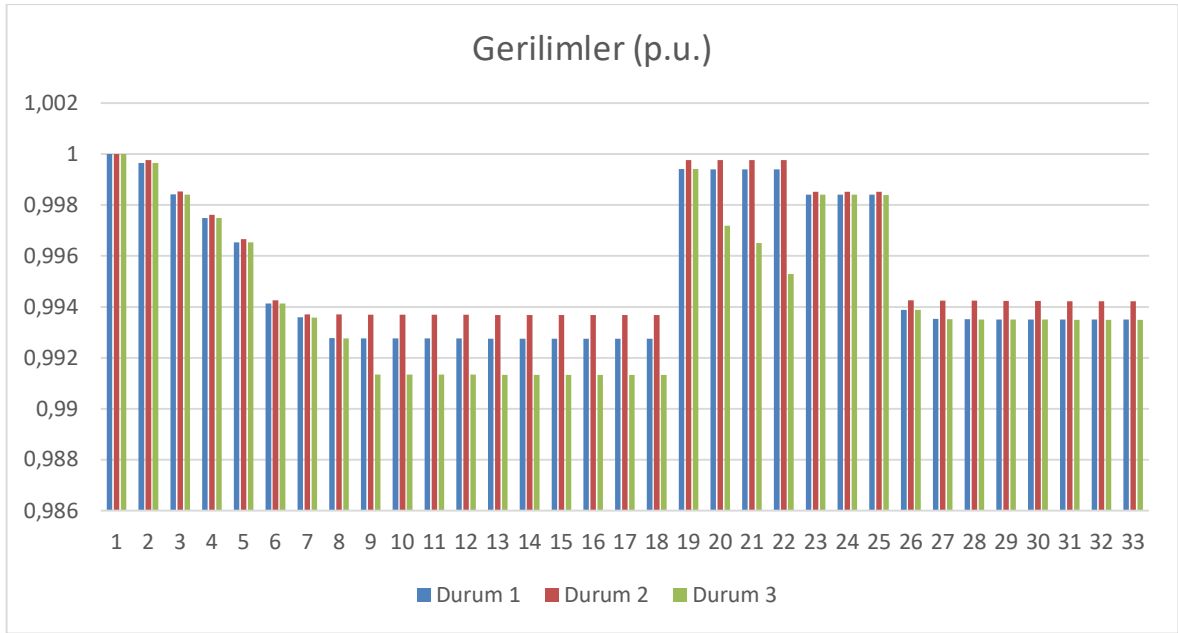
**Şekil 4.22 :** IEEE-33 baralı test dağıtım ağındaki gerilimler – 300 kW.

Karşılaştırma amacıyla şarj istasyonlarının şarj gücü [16]'daki gibi 150 kW'a düşürülmüş ve yöntem yeniden uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.27'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.27 :** Şarj istasyonu gücü 150 kW'a düşürüldüğünde farklı ağırlıklara sahip sonuçlar.

|         | Min GKİ | Min V (p.u.) | Güç kaybı<br>$P_{Loss}$ (kW) | Baralar<br>(Bölgelere<br>göre sıralanmış) |
|---------|---------|--------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| Durum 1 | 0.9152  | 0.9927       | 214.5425                     | 19, 27, 8                                 |
| Durum 2 | 0.8003  | 0.9937       | 177.6556                     | 1, 6, 7                                   |
| Durum 3 | 0.7329  | 0.9913       | 287.7862                     | 22, 7, 9                                  |

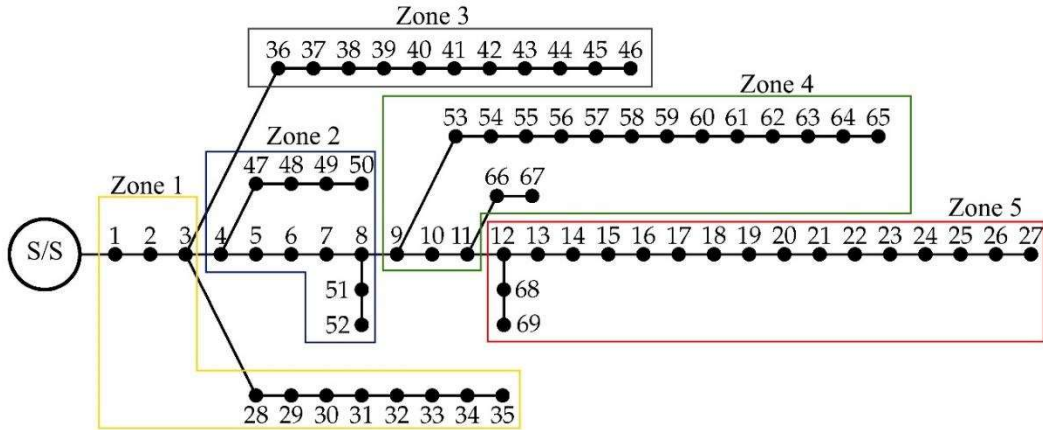
Tabloya göre şarj istasyonu şarj gücü %50 azaltıldığında ikinci durum için güç kaybı 713.4195 kW'tan 177.6556 kW'a düşmüştür. Düşüş oranı durumlar için sırasıyla yaklaşık %75.14, %75.10 ve %71.68'dir. Bu durumlara karşılık gelen gerilimler Şekil 4.23'te gösterilmektedir.



Şekil 4.23 : IEEE-33 baralı test dağıtım ağındaki gerilimler – 150 kW.

#### 4.5.2 IEEE-69 baralı test dağıtım ağı

Dağıtım sistemi, IEEE-33 bara test dağıtım ağında olduğu gibi bölgelere ayrılmıştır. IEEE-69 baralı test sisteminin şeması ve bölgeleri Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24 : IEEE-69 baralı test sistemi ve beş bölge.

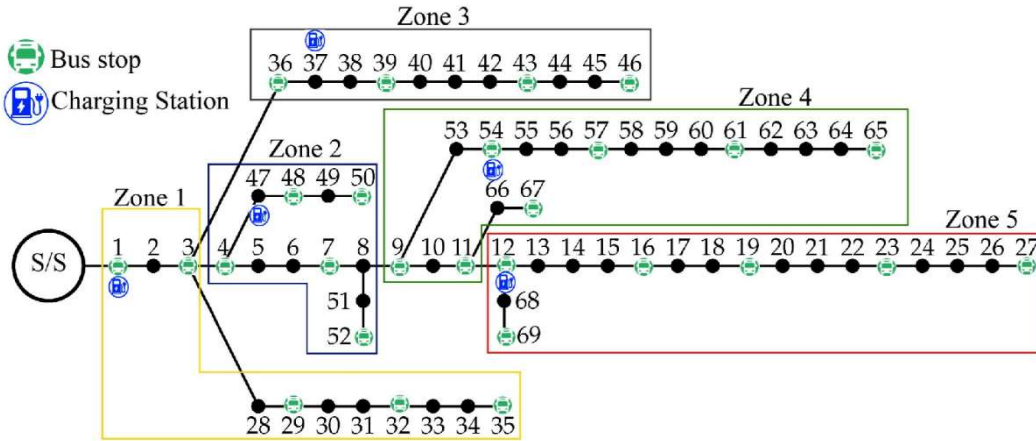
Simülasyonda kullanılan beş bölge için durak sayısına göre uzunluğu 20 ile 34 km arasında değişen rotalar oluşturulmuştur. Bölgeleri, hareket noktalarını, rota ve rota uzunlukları aşağıdaki Çizelge 4.28'de verilmiştir.

**Çizelge 4.28 : Her bölge için rota bilgisi.**

| Bölge   | Başlangıç / Bitiş<br>Terminal / Hareket<br>Noktası | Rota                                     | Rota Uzunluğu<br>(km) |
|---------|----------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|
| Bölge 1 | 1                                                  | 1-3-29-32-35-32-29-3-1                   | 20                    |
| Bölge 2 | 50                                                 | 50-48-4-7-52-7-4-48-50                   | 20                    |
| Bölge 3 | 36                                                 | 36-39-43-46-43-39-36                     | 20                    |
| Bölge 4 | 65                                                 | 65-61-57-54-9-11-67-11-9-54-<br>57-61-65 | 34                    |
|         | 69                                                 | 69-12-16-19-23-27-23-19-16-<br>12-69     | 34                    |
| Bölge 5 | 1                                                  | 1-3-29-32-35-32-29-3-1                   | 20                    |

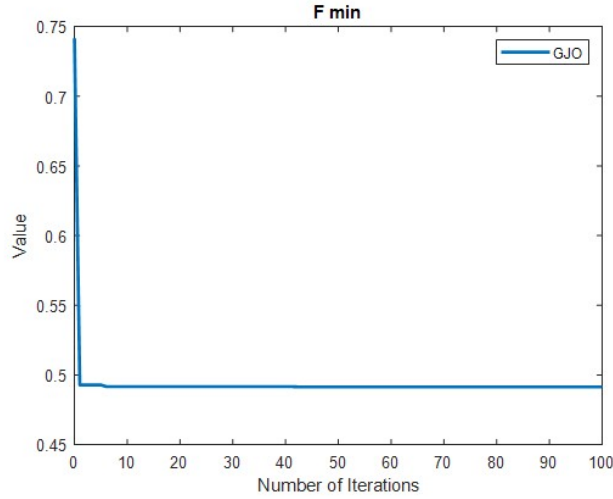
Bu bölümde de bir önceki 33-baralı test sisteminde olduğu gibi üç durum için ayrı ayrı yerleşim yapılmıştır.

**Durum 1:** Bu durum ise amaç fonksiyonunda güç etkilerinin ağırlığının, çevresel ve sosyal etkilerin ağırlıkları ile eşit olduğu durumdur. IEEE-69 baralı test dağıtım ağı için şarj istasyonları, Şekil 4.25'te gösterildiği gibi AÇO algoritması tarafından yerleştirilmiştir.



**Şekil 4.25 : IEEE-69 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj istasyonlarını gösteren diyagram.**

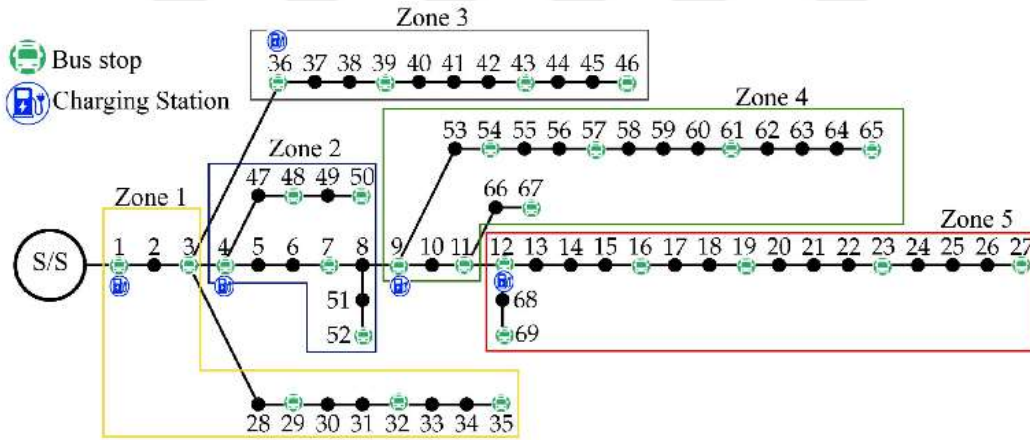
Şarj istasyonları 1, 47, 37, 54 ve 12 numaralı baralara yerleştirilmiştir. Optimizasyonun yakınsama grafiği Şekil 4.26'da verilmiştir.



**Şekil 4.26 :** IEEE-69 baralı test sistemi için 1.durumun yakınsama eğrisi.

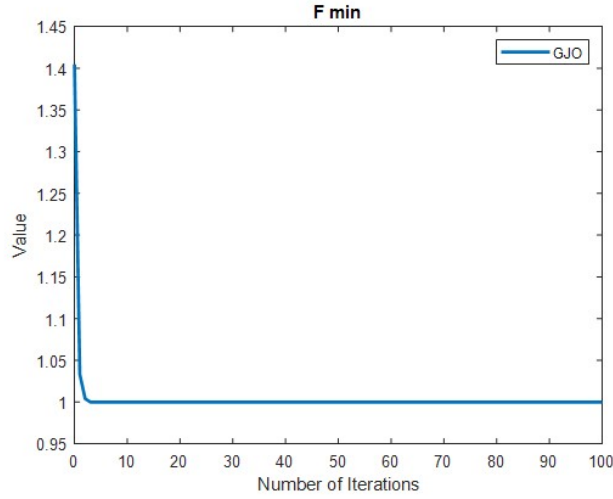
Şarj istasyonları yerleştirildikten sonra yük akış analizi yapıldığında minimum GKI değeri 0.8552 ve minimum gerilim değeri 0.9928 (p.u.) olarak hesaplanmıştır.

**Durum 2:** Bu durum ise amaç fonksiyonunda güç etkilerinin ağırlığının daha yüksek olduğu aynı zamanda çevresel ve sosyal etkilerin ağırlığının sabit olduğu durumdur. Oluşan yeni yerleşim Şekil 4.27'deki gibidir.



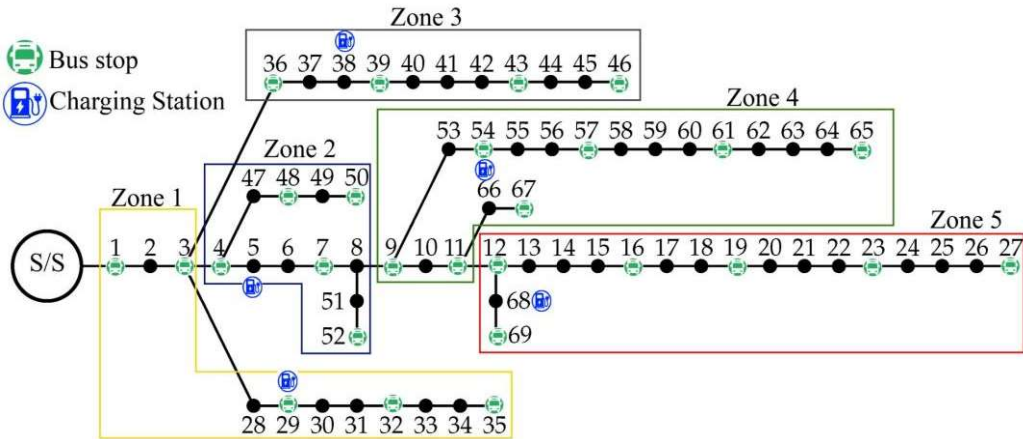
**Şekil 4.27 :** IEEE-69 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj istasyonlarını gösteren diyagram (Güç etkisi ağırlıklı).

Şekil 4.27'ye göre güç etkisi önceliklendirildiğinde şarj istasyonları 1, 4, 36, 9 ve 12 numaralı baralara yerleştirilir. Güç kaybı 410.0413 kW'tan 374.1574 kW'a düşmüştür. Optimizasyonun yakınsama grafiği Şekil 4.28'de verilmiştir.



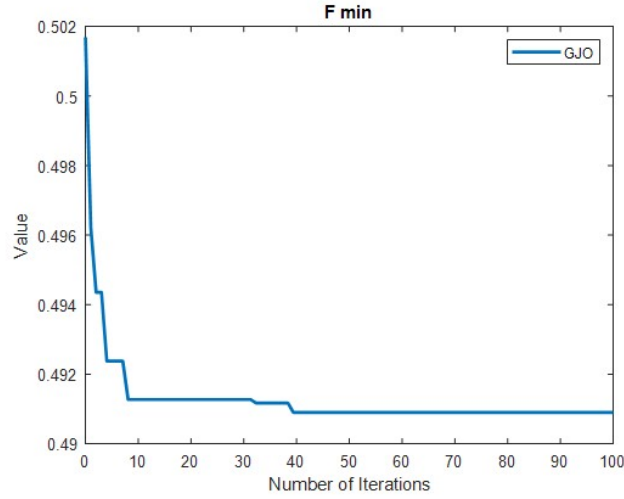
**Şekil 4.28 :** IEEE-69 baralı test sistemi için 2.durumun yakınsama eğrisi.

**Durum 3:** Bu durum ise amaç fonksiyonunda güç etkilerinin ağırlığının, çevresel ve sosyal etkilerin ağırlıklarından daha düşük olduğu durumdur. Ağırlık katsayısı artırılarak sosyal ve çevresel faktörlerin ön planda tutulduğu senaryo için şarj istasyonu yerleşimi Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



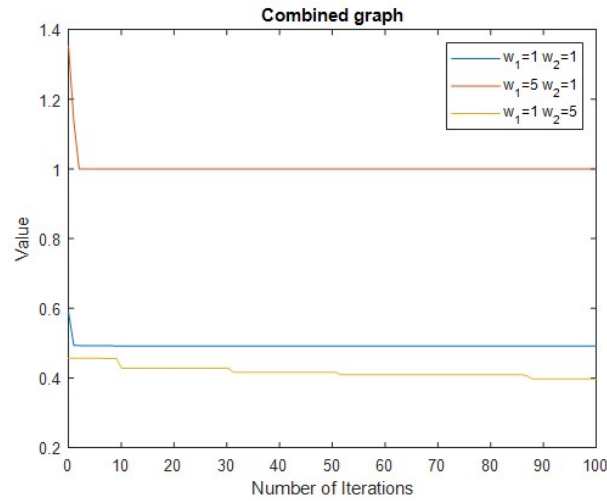
**Şekil 4.29 :** IEEE-69 baralı test sisteminde elektrikli otobüsler için önerilen şarj istasyonlarını gösteren diyagram (Sosyal ve çevresel etki ağırlıklı).

Bu senaryoda, şarj istasyonları 29, 5, 38, 54 ve 68 numaralı baralara yerleştirilmiştir. Optimizasyonun yakınsama grafiği Şekil 4.30'da verilmiştir.



**Şekil 4.30 :** IEEE-69 baralı test sistemi için 3.durumun yakınsama eğrisi.

Üç durumun tümünü temsil eden grafik, Şekil 4.31'de gösterilmektedir.



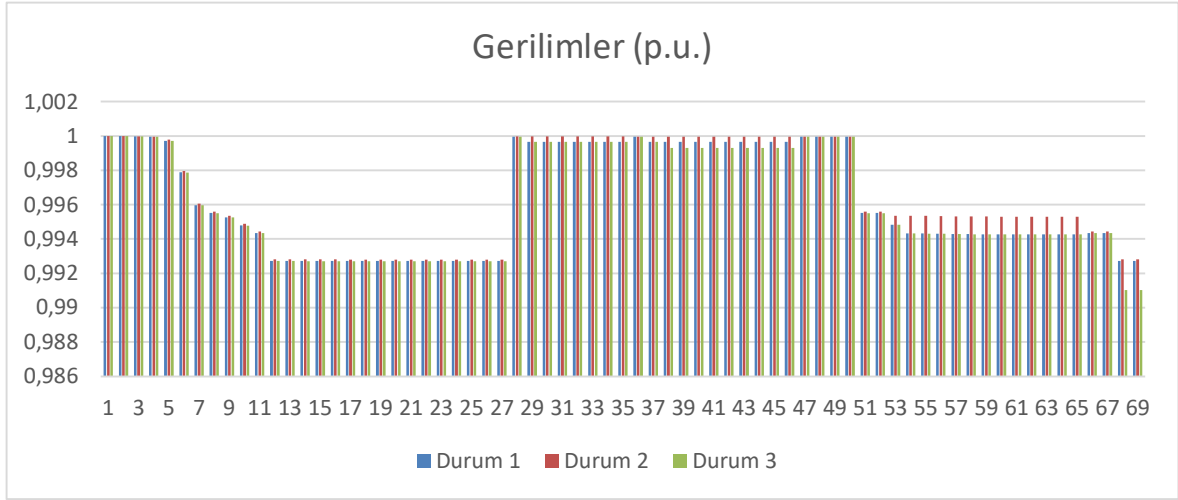
**Şekil 4.31 :** IEEE-69 baralı test dağıtım ağı için tüm durumların yakınsama grafiği.

Her üç durum için IEEE-69 baralı test dağıtım ağında yapılan şarj istasyonu yerleşimi sonuçları, minimum GKİ, minimum gerilim, güç kaybı ve seçilen baralar Çizelge 4.29'da sunulmuştur.

**Çizelge 4.29 :** Farklı ağırlıklar için şarj istasyonu yerleşimi ve güç kalitesi (300 kW şarj gücü).

|         | Min GKİ | Min V (p.u.) | Güç kaybı<br>$P_{Loss}$ (kW) | Baralar<br>(Bölgelere<br>göre sıralanmış) |
|---------|---------|--------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| Durum 1 | 0.8552  | 0.9928       | 410.0413                     | 1, 47, 37, 54, 12                         |
| Durum 2 | 0.8552  | 0.9928       | 374.1574                     | 1, 4, 36, 9, 12                           |
| Durum 3 | 0.8438  | 0.9910       | 494.1030                     | 29, 5, 38, 54, 68                         |

Çizelge 4.29'a göre güç etkilerinin ağırlık katsayısının amaç fonksiyonundaki etkisi artırılarak güç kalitesi açısından daha uygun bir şarj istasyonu yerleşimi gerçekleştirilir. Örneğin güç kaybı 410.0413 kW'tan 374.1574 kW'a %8.75 oranında düşmüştür. Son durumda, baraların sosyal ve çevresel özellikleri, elektrikli otobüs şarj istasyonlarının hangi baralara yerleştirileceğinin belirlenmesinde daha önemli bir rol oynamaktadır. Tüm baraların gerilim grafiği Şekil 4.32'de verilmiştir. Grafik, ikinci durumda özellikle 53 ile 65 arasındaki baralarda gerilimin iyileştiğini göstermektedir.



**Şekil 4.32 :** IEEE-69 baralı test dağıtım ağındaki gerilimler – 300 kW

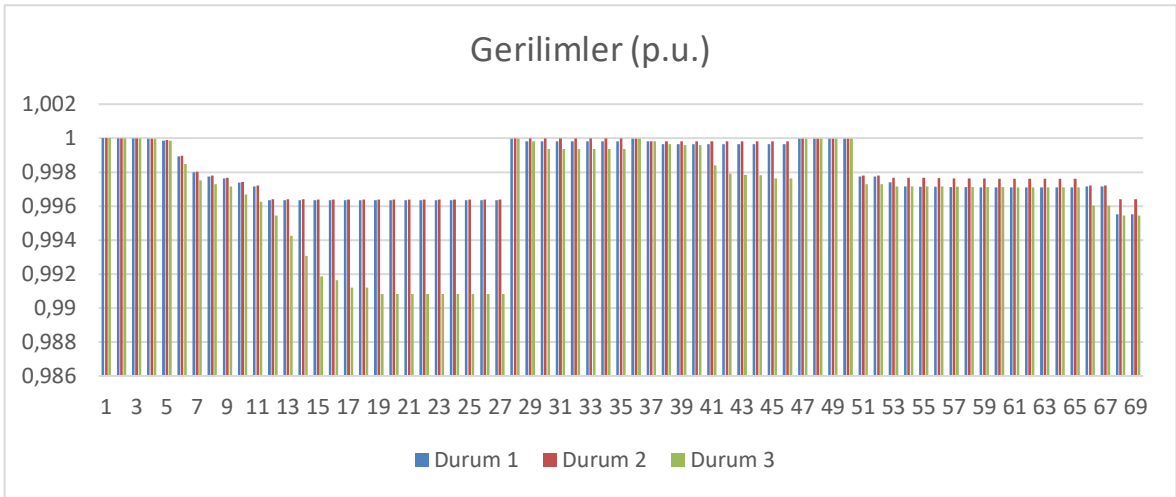
Şarj istasyonu şarj gücü 150 kW'a düşürüldüğünde, Çizelge 4.30'daki aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

**Çizelge 4.30 :** Şarj istasyonu gücü 150 kW'a düşürüldüğünde farklı ağırlıklara sahip sonuçlar.

|         | Min GKİ | Min V (p.u.) | Güç kaybı<br>$P_{Loss}$ (kW) | Baralar<br>(Bölgelere<br>göre sıralanmış) |
|---------|---------|--------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| Durum 1 | 0.9618  | 0.9955       | 121.4731                     | 29, 5, 37, 54, 69                         |
| Durum 2 | 0.9291  | 0.9964       | 95.0149                      | 1, 47, 37, 9, 12                          |
| Durum 3 | 0.9403  | 0.9913       | 258.8553                     | 30, 6, 45, 54, 19                         |

Çizelge 4.30'a göre, şarj istasyonu şarj gücü %50 azaltıldığında, ikinci durum için güç kaybı 374.1574 kW'tan 95.0149 kW'a düşmüştür. Güç kaybındaki azalma oranları durumlar için sırasıyla %70.38, %74.61 ve %47.61'dir. Karşılık gelen gerilimler Şekil 4.33'te

gösterilmiştir.



**Şekil 4.33 :** IEEE-69 baralı test dağıtım ağındaki gerilimler – 150 kW.

IEEE-33 ve 69 bara test dağıtım ağında uygulanan yöntemin sonuçlarına göre, elektrikli otobüs şarj istasyonlarının güç kalitesi, sosyal ve çevresel etkiler açısından en uygun baralara yerleştirilmesi için fonksiyon ağırlıklarının eşit olduğu bir durumda, tüm kısıtlamalar karşılanarak optimal bir çözüm elde edilir. Bu durumda, şarj istasyonu yerleşimi için her iki etki açısından en uygun baralar seçilir.

Fonksiyonların ve verilerin çıktıları 0 ile 1 arasında normalize edildiğinden, nüfus yoğunluğu gibi binlerle ifade edilen bir parametre, İÇN sayısı gibi çok düşük değerlere sahip diğer parametrelere göre sayısal bir avantaj sağlamamış olur. Sistem kararlılığını gösteren minimum GKİ değeri, güç kalitesi etki ağırlığı arttıkça artar ve güç kayıpları azalır. IEEE-33 ve IEEE 69- bara test dağıtım ağı karşılaştırıldığında, IEEE-69-bara test dağıtım ağı, IEEE-33- bara test dağıtım ağından daha fazla elektrik verimliliği artışı göstermiştir. 33 bara test dağıtım ağında güç kaybı yaklaşık %17.34 azalarak 863.0344'ten 713.4195'e düşmüş, 69 bara test dağıtım ağında ise güç kaybı %8.75 azalarak 410.0413 kW'tan 374.1574 kW'a düşmüştür. Bu sonuçlara göre, daha iyi güç kalitesi sağlayabilecek baraları bulmak için yapılan optimizasyonun 33 baralı sistemde daha etkili sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca karşılaştırma amacıyla şarj istasyonu şarj gücü 300 kW'tan 150 kW'a düşürülmüştür. Yöntem tekrar uygulandığında güç etkisinin önceliklendirildiği ikinci senaryoda 33 bara test sisteminde güç kaybı yaklaşık %75.10 oranında azaltılmıştır. 69 bara test dağıtım ağında azalma oranı %74.61 olarak hesaplanmıştır. Tüm baraların gerilim grafikleri incelendiğinde, güç kalitesi ağırlığı arttıkça bara gerilimlerinde iyileşme görülmektedir. 33 numaralı bara dağıtım ağında ise 1, 6 ve 7 numaralı baraların ikinci durum için etkin sonuçlar verdiği

gözlemlenmiştir. 69 baralı test dağıtım ağında 1, 4, 36, 9 ve 12 numaralı baralar etkili sonuçlar vermiştir. Yakınsama grafikleri incelendiğinde AÇO optimizasyonunun 33 bara dağıtım ağında daha hızlı yakınsadığı, 69 bara dağıtım ağında ise ilk ve son durumlarda daha fazla iterasyondan sonra yakınsamanın sağlandığı görülmektedir.

Elektrikli otobüslerin yaygınlaşması teknik, finansal, çevresel ve sürdürülebilirlik açısından ciddi faydalar sağlamaktadır. Elektrikli otobüs dönüşüm projelerinin başarılı bir şekilde uygulanması, önemli mühendislik çalışmaları, finansal yatırım ve altyapı geliştirmeleri gerektirir. Altyapıdaki şarj istasyonu yerleşimlerinin dağıtım sisteminin nominal çalışma koşullarını etkilememesi ve elektrikli otobüslerin SoC seviyelerinin planlanan rota için yeterli olması kritiktir. Bu nedenle, bu bölümde yapılan çalışmada, çok kriterli bir amaç fonksiyonu kullanarak elektrikli otobüsler için şarj istasyonlarının en uygun şekilde yerleştirilmesini sağlayan bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada kullanılan parametreler güç kaybı, gerilim saptması, GKİ, nüfus yoğunluğu, trafik yoğunluğu, İÇN'lere yakınlık ve şarj istasyonu konum maliyetidir. Şarj istasyonlarının yerleşimi bu parametreler tarafından oluşturulan indeks değerine göre gerçekleştirilmiştir. AÇO optimizasyonu, karar vericiler tarafından seçilen ağırlıklara bağlı olarak en uygun baraları arar. Otobüs filosu yöneticileri tarafından bu parametrelerin önem sırası farklı olabilir. Bu nedenle, şarj istasyonu yerleşimi yapılırken, ağırlıklar ihtiyaca göre ayarlanarak parametre grubunun önceliğine bağlı olarak değiştirilebilir. Tanımlanan sistem kısıtlamaları sayesinde ağırlıkların değişmesi sonucunda, güç kalitesi, minimum çalışma koşullarının altına düşmemiştir. Her yerleştirmeden sonra, sistem kararlılığını teyit etmek için yük akış analizi tekrarlanmıştır. Ayrıca elektrikli otobüslerin enerji tüketimleri, duraklar arasındaki yükseklik farkı, ağırlık ve hız gibi parametreler kullanılarak doğrusal modelleme yöntemiyle hesaplanmıştır. Her durakta otobüsün SoC seviyesi hesaplanmış ve duraklar arasında önceden karar vericiler tarafından tanımlanmış kritik seviyenin altına düşmemesi için elektrikli otobüs bataryasının SoC'si dikkate alınarak şarj istasyonu yerleştirmesi yapılmıştır. Bu durum elektrikli otobüslere operasyonel bir esneklik getirmektedir.

Bu bölümde yapılan çalışmada uluslararası kabul görmüş IEEE-33 ve IEEE-69 baralı test dağıtım ağları, elektrikli otobüslere göre modifiye edilmiş ve baralar arasındaki mesafeler güzergâh olarak tasarlanmıştır. Bu çalışma, içten yanmalı motora sahip otobüslerin tamamen elektrikli otobüslere dönüşümü için bir referans olabilir. Çalışmada paylaşılan veriler ile sonuçlar teyit edilebilir ve bu konuda yapılacak çalışmalar için bir kaynak olarak kullanılabilir.

Elde edilen sonuçlara göre güç dağıtım ağı değerleri nominal işletme limitlerinin altına düşmeden önerilen yöntem başarı ile uygulanabilmektedir. Güç etkilerinin ağırlığı arttırıldığında IEEE-33 baralı test sisteminde güç kalitesi IEEE-69 baralı test sistemine göre daha fazla iyileştirilmiş ve güç kaybı sırasıyla 149.6169 kW ve 35.8839 kW azalmıştır. Buna göre saatte 106 ve 25 kg CO<sub>2</sub> önlenebilmektedir [193]. Karşılaştırma amacıyla şarj istasyonunun gücü %50 oranında azaltıldığında, birinci ve ikinci senaryolar için güç kaybının %70.38 ile %75.14 aralıklarında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumdan düşük şarj gücüne sahip şarj istasyonları ihtiyacı karşılıyorsa, şarj gücü yüksek istasyonların güç kayıpları açısından tercih edilmemesi gerektiği sonucu çıkarılabilir. Ayrıca, önerilen yöntem elektriksel etkinin yanı sıra sosyal ve çevresel olarak verimli çözümler sunar.

Tez çalışmasının bu bölümünde yapılan çalışma ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Bu bölümde, enerji dağıtım sistemlerinde güç kaybını azaltmak ve sürdürülebilir ulaşımı sağlamak için Bölüm 3.6.4'te önerilen çok kriterli amaç fonksiyonu kullanarak elektrikli otobüsler için özel olarak tasarlanmış şarj istasyonlarının en uygun şekilde yerleştirilmesini sağlayan yöntem test edilmiştir. Çalışmadaki optimizasyon için Altın Çakal Optimizasyonu kullanılmış ve sonuçlar diğer 11 optimizasyon algoritmasıyla karşılaştırılmıştır.

Yöntemde güç kaybı, voltaj sapması GKİ gibi elektriksel faktörlerin yanı sıra nüfus yoğunluğu, trafik yoğunluğu, İÇN'lere yakınlık ve şarj istasyonu konum maliyeti dikkate alınmıştır. Elektrikli otobüslerin enerji tüketimi, hız, yolcu yükü, duraklar arasındaki yükseklik farkı ve iklimlendirme tüketimi gibi parametreler kullanılarak doğrusal modelleme yöntemiyle hesaplanmıştır. Elektrikli otobüsün iki durak arasında enerjisinin bitmesini önlemek amacıyla SoC parametresi kullanılmıştır.

Çalışmada önerilen yöntem ile güç dağıtım sisteminin operasyonel limitler dâhilinde sorunsuz çalışması sağlanırken elektrikli otobüslerin ulaşım sistemine entegrasyonu sağlanmıştır. Yöntemde belirtilen ağırlık katsayıları ihtiyaca göre ayarlanıp kuruma özgü önceliklerin sonuca etkisi değiştirilebilir. Önerilen yöntem sadece elektrikli otobüslerin çevresel sürdürülebilirliğini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda elektrikli toplu taşıma sistemlerinde güç dağıtımının daha verimli gerçekleşmesine de katkıda bulunur. Son olarak, bu bölümde yapılan çalışma, içten yanmalı motorlu otobüs filolarına sahip şehirlerin elektrikli otobüs dönüşümü yaparak nasıl karbon salınımını azaltabileceği ve şarj altyapılarını optimize edebileceklerine ışık tutmaktadır.

#### 4.6 Sonuçlar ve Tartışma

Bu tez çalışmasında ilk olarak deterministik yöntemlerle şarj istasyonu yerleşimi problemi çözümü önerilmiştir. Bu amaçlar başka çalışmalarda da kullanılabilecek Türkiye'deki dağıtım ağına benzer 42 baralı örnek dağıtım ağı önerilmiştir. Bu dağıtım ağına ait detaylar bölüm 3.5.1'de sunulmuş ve bölüm 4.2'de uygulanmıştır. Uygulama neticesinde elektrikli araç şarj istasyonları devrede değilken, tamamı devredeyken (kontROLSÜZ şarj) ve şebekenin maksimum kaldırabileceği elektrik araç sayısı tespit edilerek yapılan şarj (kontrollü şarj) durumları ele alınmış ve istasyon yerleşimi yapılmıştır. Yerleşim sonrasında gerçekleştirilen yük akış analizi sonucunda gerilim profilinde operasyonel olarak bir sorun olmadığı ve sistemin kararlı olduğu gözlenmiştir. Önerilen deterministik yöntem IEEE-33 bara test dağıtım ağına uygulanmış ve yerleşim yönteminde ayrıca GKİ parametresi kullanılmıştır. Sonrasında, deterministik olan bu yöntemi geliştirmek için optimizasyon algoritmalarının kullanılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, probleme özel çözüm sunmak için AOA algoritması modifiye edilmiştir. İki farklı yöntem kullanılan modifiye işleminde elde edilen iki yeni modifiye algoritmanın (MAOA ve MDAO) etkinliklerini test etmek için üç grup kıyaslama fonksiyonu (standart, CEC 2017 ve mühendislik) kullanılmıştır. Elde edilen bulgulara göre parametre optimizasyonu ile modifiye edilen MAOA ile, standart AOA'dan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. MAOA, kıyaslama fonksiyonlarında ise birçok algoritmadan daha iyi performans sergilemiştir. Parametre optimizasyonu ve boyut genişletme yöntemi ile modifiye edilen MDAOA ise genel olarak MAOA'dan daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Elde edilen bulgular incelendiğinde, parametre optimizasyonu yaparak bir algoritmanın etkinliğinin artırılabilceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, boyut genişletme yöntemi de eklendiğinde daha etkili sonuçlar ürettiği gözlenmiştir. Modifiye edilen algoritmalar şarj istasyonu yerleşimi probleminde kullanılmıştır. Bu yerleşim probleminde güç kaybı, gerilim kararlılık indeksi ve gerilim sapsması parametreleri kullanılmıştır. Yine bu problemde de modifiye algoritmalar diğer algoritmalarından genel olarak daha üstün yerleştirme yapmıştır. Devamında elektrikli otobüslerin şarj istasyonu yerleşimi için bir yöntem önerilmiştir. Buna göre hem yukarıda sayılan elektriksel parametreler hem de sosyal ve çevresel parametreler kullanılmıştır. Bu yerleşimde parametrelerin etkileri ağırlık katsayılarıyla ayarlanmıştır. Katsayılar parametrelere verilen önceliğe göre değiştirildiğinde güç kaybının belli oranda düştüğü ve gerilim profilinin iyileştiği görülmüştür.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuç

Elektrikli araçlar ve ilgili teknolojiler her geçen gün gelişmekte ve daha çok kullanıcı tarafından benimsenmektedir. Elektrikli araçların sağladığı faydalar içten yanmalı araçlar ile kıyaslandığında ciddi avantajlar olduğu görülmektedir. Son yıllarda batarya fiyatlarında görülen düşüş, elektrikli araç maliyetlerine olumlu etkisi olmuştur. Bu sayede elektrikli araç satın alma maliyetleri düşmüş ve her geçen yıl daha fazla araç satışı gerçekleşmiştir.

Batarya maliyetlerinin düşmesi beraberinde daha büyük batarya kullanımını mümkün kılmıştır. Günümüzdeki elektrikli araçlar son on yılda piyasaya sunulan araçlardan ortalama olarak daha fazla menzil sunmaktadır. Daha büyük batarya menzil olarak avantaj sağlamak fakat şarj etme süresi batarya kapasitesine ve kullanılan batarya kimyasına göre uzamaktadır. Bu yüzden bu süreci hızlandırmak için daha hızlı şarj olabilen bataryalar ve daha fazla şarj gücüne sahip şarj istasyonları geliştirilmiştir. Bu istasyonlar çok hızlı şarj işlemi gerçekleştirerek kullanıcılara zaman avantajı sağlamaktadır. Fakat bu kısa sürede yüksek enerji ile şarj işlemi enerji dağıtım ağı açısından potansiyel sorunları da beraberinde getirmektedir. DA istasyonlarında sağlanan hızlı şarj hizmeti, araçlar toplu halde şarj olduklarında yüksek güç talebi ile aktif güç tüketimine neden olur. Bu durum beraberinde dağıtım sisteminde güç kayıplarını getirir. Ayrıca, elektrikli araçlar yüksek enerji ile şarj olurken oluşan aşırı harmonikler, akım bozulmasına, sekonder dağıtım hattı ve trafo değerinin düşmesine, voltaj profilinin bozulmasına veya dağıtım ağından alınan hizmet kalitesinin düşmesine neden olabilir.

Elektrikli araç şarj istasyonları dağıtım ağı üzerinde en uygun noktalara konumlandırılması ile sistemdeki güç kayıpları en aza indirilebilir. Güç kayıplarının azaltılmasıyla karbon salınımı azaltılabilir ve çevrenin korunmasına doğrudan katkı sağlanabilir. Bu yüzden tez çalışmasında, elektrikli araç şarj istasyonlarının dağıtım ağlarına optimum entegrasyon için istasyonların dağıtım ağı üzerine etkisini azaltarak en uygun baralara yerleştirilmesini sağlayan bir yöntem önerilmiştir. Bu kapsamda, probleme özgü olarak şarj istasyonlarının en uygun şekilde yerleştirilmesi için iki adet yeni modifiye Arşimet optimizasyon algoritması (MAOA ve MDAOA) önerilmiştir. Modifiye algoritmalar ile klasik AOA'nın keşif ile sömürü arasındaki dengeyi ve yakınsamasını geliştirmek hedeflenmiştir. Önerilen modifiye algoritmaların performansı, standart kıyaslama fonksiyonu, CEC 2017 kıyaslama fonksiyonu ve gerçek hayat mühendislik problemi üzerinde test edilmiştir. Ayrıca, önerilen

modifiye algoritmanın sonuçları son yıllarda yayınlanan algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, MAOA ve MDAOA'nın, sürekli olarak düşük standart sapma değerlerini koruyarak çoğu durumda rakiplerinden daha iyi performans gösterdiğini işaret etmektedir. MDAOA, toplamda 47 problemin 46'sında en iyi sonucu sağlamıştır (genel başarı oranı %97.87). Elde edilen sonuçlara göre, yeni modifiye AOA'nın hem elektrikli araç şarj istasyonlarının yerleşimi probleminde hem de diğer gerçek hayat mühendislik problemlerinde etkin bir şekilde kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Şarj istasyonlarının dağıtım ağı açısından uygun konumlara yerleştirilmesiyle beraber kullanıcıların şarj esnasında ihtiyaç duyabileceği tesisler veya hizmetlerin bulunduğu yerlere konumlandırılması sürdürülebilirlik açısından operasyonel bir gerekliliktir. Bu yüzden sosyal ve çevresel faktörlerin etkili olduğu görülmektedir. Nüfus yoğunluğu, trafik yoğunluğu, cazibe noktalarına yakınlık ve elektrikli araç şarj istasyonunun kurulacağı konum maliyeti şarj istasyonlarının konumlandırılması yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlardandır. Bu yüzden bu tez çalışmasında elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılması için dağıtım ağına etki eden elektriksel etkiler ile sosyal ve çevresel etkiler incelenmiş ve bu alanlarda parametreler belirlenerek konumlandırma yapılmıştır.

Elektriksel etkide Bölüm 4'te sunulan bulgularda elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılmasında kullanılan yöntemler ile güç kaybı optimize edilmiş, gerilim kararlılık değerleri iyileştirilmiş ve gerilim sapsmaları azaltılmıştır. Ayrıca şarj gücünün yarıya düşürüldüğü durumda güç kaybının bu orandan daha fazla azaldığı görülmüştür. Bu durumda ihtiyacı karşılayacak kapasitede şarj istasyonu gücü seçilmesinin güç kayıplarını önleyebileceği değerlendirilmektedir. Öbür taraftan sosyal ve çevresel açıdan kullanılan parametreler ile şarj istasyonları nüfusun daha yoğun olduğu, trafik yoğunluğunun belli bir seviyenin üzerinde olduğu, insanların ziyaret edebileceği cazibe noktalarının bulunduğu ve kurulum maliyetlerinin kontrol edilebileceği bir konumlandırma yöntemi önerilmiştir. İlgili bölümlerde önerilen yöntemler ile salınımı önlenen CO<sub>2</sub> miktarı belirtilmiştir.

## 5.2 Öneriler

Bu tez çalışmasının sonuçlarından yola çıkarak, bu çalışmada geliştirilen yöntemlere ek olarak aşağıdaki öneriler değerlendirilebilir:

- Önerilen modifiye algoritma şarj istasyonlarının konumlandırılmasında iyi performans göstermiştir. Bu yöntem diğer dağıtım test sistemlerinde test edilebilir.

- Akü değişim istasyonlarının yerleşimi, kapasitör bankaları, dağıtık jeneratörler ve enerji depolama sistemleri, emisyon minimizasyonu, yük tahmini gibi mühendislik problemleri ve optimum röle koordinasyonu gibi problemlerin çözümünde kullanılabilir.
- Modifiye algoritma ile uygulanan problemler için yeni bir algoritma çiftiyle daha iyi sonuçlar aranabilir.
- Parametre optimizasyonu için diğer optimizasyon algoritmaları kullanılabilir.
- Önerilen yöntem orijinal AOA'nın performansını artırır; ancak bunun için bir ön işlem gerekir. Kendi kendine uyarlanabilir bir yaklaşım geliştirmek için bu adımı ortadan kaldırmak için gelecekte çalışmalar yapılabilir.
- Elektrikli ve içten yanmalı otobüs verileri kullanarak bir şehre maliyet ve verimlilik analizi uygulanabilir. Ayrıca bu çalışmada hafta içi ve hafta sonu ayrımı yapılmamıştır. Otobüs kullanım oranı, trafik yoğunluğu gibi parametreler bu zaman dilimlerinde farklılık gösterdiğinden ileriki çalışmalarda ek bir parametre olarak değerlendirilebilir.
- Gelecekteki çalışmalar DA ağları ve çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Chan, C.C.**, The rise & Fall of electric vehicles in 1828-1930: Lessons learned, Proc. IEEE 101 (2013) 206–212. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2228370>.
- [2] **Irle, R.**, Global BEV & PHEV Sales for 2019, Erişim: 7 Temmuz 2020, EV-Volumes.Com (2020). <https://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>.
- [3] **Kane, M.**, Passenger Plug-In Electric Car Sales In Europe In Q1-Q3 2020 By Country, Erişim: 24 Eylül 2020, (n.d.). <https://insideevs.com/news/452914/plugin-car-sales-europe-q1q3-2020-country/>.
- [4] **Liao, F., Molin, E., van Wee, B.**, Consumer preferences for electric vehicles: a literature review, Transp. Rev. 37 (2017) 252–275. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1230794>.
- [5] **Lin, B., Wu, W.**, Why people want to buy electric vehicle: An empirical study in first-tier cities of China, Energy Policy 112 (2018) 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.026>.
- [6] **TEİAŞ**, Türkiye ve Kişi Başına Kurulu Güç - Brüt Üretim - Arz - Net Tüketiminin Yıllar İtibariyle Gelişimi, 2018. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>.
- [7] **Lopes, J.A.P., Soares, F.J., Almeida, P.M.R.**, Integration of electric vehicles in the electric power system, Proc. IEEE 99 (2011) 168–183. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2066250>.
- [8] **TEAM, G.I.T.T.A.I.S.A.T.**, Summary Report on EVs at Scale and the U. S. Electric Power System, Washington, DC, 2019. [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/12/f69/GITTISATT EVs at Scale Grid Summary Report FINAL Nov2019.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/12/f69/GITTISATT%20EVs%20at%20Scale%20Grid%20Summary%20Report%20FINAL%20Nov2019.pdf).
- [9] **Shao, S., Pipattanasomporn, M., Rahman, S.**, Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network, 2009 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. PES '09 (2009) 1–8. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275806>.
- [10] **Denholm, P., Short, W.**, An Evaluation of Utility System Impacts and Benefits of Optimally Dispatched Plug-In Hybrid Electric Vehicles, NREL Rep. NoTP-620

- (2006) 41. <http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40293.pdf>.
- [11] Antalya Ticaret ve Sanayi Odası - Aylık göstergeler - Ocak 2015, Antalya, n.d. [www.atso.org.tr](http://www.atso.org.tr).
- [12] **T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Y. ve İ.G.M.**, 2019 Ocak Eylül Turizm İstatistikleri, 2019.
- [13] **IEA**, Global EV Outlook 2020: Technology Report, Glob. EV Outlook 2020 Technol. Rep. (2020) 39–85.
- [14] **ODD**, Pazar - Otomobil & Hafif Ticari, Genel Değerlendirme Aralık 2019 Erişim: 5 Ocak 2021, n.d. [http://www.odd.org.tr/web\\_2837\\_1/neuralnetwork.aspx?type=35](http://www.odd.org.tr/web_2837_1/neuralnetwork.aspx?type=35).
- [15] **ODD**, Pazar - Otomobil & Hafif Ticari, Genel Değerlendirme Aralık 2020 Erişim: 5 Ocak 2021, n.d. [http://www.odd.org.tr/web\\_2837\\_1/neuralnetwork.aspx?type=35](http://www.odd.org.tr/web_2837_1/neuralnetwork.aspx?type=35).
- [16] **Moslehi, K., Kumar, R.**, A reliability perspective of the smart grid, IEEE Trans. Smart Grid 1 (2010) 57–64. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2046346>.
- [17] **Ma, G., Jiang, L., Chen, Y., Dai, C., Ju, R.**, Study on the impact of electric vehicle charging load on nodal voltage deviation, Arch. Electr. Eng. 66 (2017) 495–505. <https://doi.org/10.1515/aee-2017-0037>.
- [18] **Singh, M., Kar, I., Kumar, P.**, Influence of EV on grid power quality and optimizing the charging schedule to mitigate voltage imbalance and reduce power loss, Proc. EPE-PEMC 2010 - 14th Int. Power Electron. Motion Control Conf. (2010) 196–203. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2010.5606657>.
- [19] **Ucer, E., Kisacikoglu, M.C., Cafer Gurbuz, A.**, Learning EV Integration Impact on a Low Voltage Distribution Grid, in: IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., IEEE, 2018: pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586208>.
- [20] **Nurmuhammed, M., Karadağ, T.**, Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Konumlandırılması ve Enerji Şebekesi Üzerine Etkisi Konulu Derleme Çalışması, Gazi Univ. J. Sci. PART A Eng. Innov. 8 (2021) 30–45.
- [21] **Tang, Z., Guo, C., Hou, P., Fan, Y.**, Optimal Siting of Electric Vehicle Charging Stations Based on Voronoi Diagram and FAHP Method, Energy Power Eng. 05

- (2013) 1404–1409. <https://doi.org/10.4236/epe.2013.54b266>.
- [22] **Phonrattanasak, P., Leeprechanon, N.**, Optimal Location of Fast Charging Station on Residential Distribution Grid, *Int. J. Innov. Manag. Technol.* 3 (2012) 675–681. <https://doi.org/10.7763/IJIMT.2012.V3.318>.
- [23] **Liu, Z., Wen, F., Ledwich, G.**, Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems, *IEEE Trans. Power Deliv.* 28 (2013) 102–110. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2223489>.
- [24] **Wang, Y.W.**, An optimal location choice model for recreation-oriented scooter recharge stations, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 12 (2007) 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.02.002>.
- [25] **Yang, J., Dong, J., Hu, L.**, A data-driven optimization-based approach for siting and sizing of electric taxi charging stations, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 77 (2017) 462–477. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.014>.
- [26] **Raposo, J., Rodrigues, A., Silva, C., Dentinho, T.**, A multi-criteria decision aid methodology to design electric vehicles public charging networks, *AIP Adv.* 5 (2015). <https://doi.org/10.1063/1.4921087>.
- [27] **Guo, S., Zhao, H.**, Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective, *Appl. Energy* 158 (2015) 390–402. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.082>.
- [28] **Wu, Y., Yang, M., Zhang, H., Chen, K., Wang, Y.**, Optimal site selection of electric vehicle charging stations based on a cloud model and the PROMETHEE method, *Energies* 9 (2016) 1–20. <https://doi.org/10.3390/en9030157>.
- [29] **Zhao, H., Li, N.**, Optimal siting of charging stations for electric vehicles based on fuzzy Delphi and hybrid multi-criteria decision making approaches from an extended sustainability perspective, *Energies* 9 (2016) 1–22. <https://doi.org/10.3390/en9040270>.
- [30] **Harighi, T., Bayindir, R.**, Load Estimation Use in Electric Vehicle Charge Station Coordination in Different Node and Definite Area, *6th IEEE Int. Conf. Smart Grid, IcSmartGrids* 2018 (2019) 264–271. <https://doi.org/10.1109/ISGWCP.2018.8634506>.
- [31] **Frade, I., Ribeiro, A., Gonçalves, G., Antunes, A.**, Optimal location of charging

- stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal, *Transp. Res. Rec.* (2011) 91–98. <https://doi.org/10.3141/2252-12>.
- [32] **Chen, T., Kockelman, K., Khan, M.**, Locating electric vehicle charging stations, *Transp. Res. Rec.* (2013) 28–36. <https://doi.org/10.3141/2385-04>.
- [33] **Jordán, J., Palanca, J., del Val, E., Julian, V., Botti, V.**, A multi-agent system for the dynamic emplacement of electric vehicle charging stations, *Appl. Sci.* 8 (2018). <https://doi.org/10.3390/app8020313>.
- [34] **Kong, W., Luo, Y., Feng, G., Li, K., Peng, H.**, Optimal location planning method of fast charging station for electric vehicles considering operators, drivers, vehicles, traffic flow and power grid, *Energy* 186 (2019) 115826. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.156>.
- [35] **Lin, Y., Zhang, K., Shen, Z.J.M., Ye, B., Miao, L.**, Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 107 (2019) 423–443. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.009>.
- [36] **Lam, A.Y.S., Leung, Y.W., Chu, X.**, Electric vehicle charging station placement: Formulation, complexity, and solutions, *IEEE Trans. Smart Grid* 5 (2014) 2846–2856. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2344684>.
- [37] **Gagarin, A., Corcoran, P.**, Multiple domination models for placement of electric vehicle charging stations in road networks, *Comput. Oper. Res.* 96 (2018) 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.03.014>.
- [38] **Erbaş, M., Kabak, M., Özceylan, E., Çetinkaya, C.**, Optimal siting of electric vehicle charging stations: A GIS-based fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis, *Energy* 163 (2018) 1017–1031. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.140>.
- [39] **Staats, P.T., Grady, W.M., Arapostathis, A., Thallam, R.S.**, A statistical method for predicting the net harmonic currents generated by a concentration of electric vehicle battery chargers, *IEEE Trans. Power Deliv.* 12 (1997) 1258–1264. <https://doi.org/10.1109/61.637002>.
- [40] **Orr, J.A., Emanuel, A.E., Oberg, K.W.**, Current Harmonics Generated By a Cluster of Electric Vehicle Battery Chargers., *SAE Prepr.* (1981) 584–589. <https://doi.org/10.1109/mpwr.1982.5520328>.

- [41] **Lo, E.W.C., Sustanto, D., Fok, C.C.**, Harmonic load flow study for electric vehicle chargers, *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.* 1 (1999) 495–500. <https://doi.org/10.1109/peds.1999.794613>.
- [42] **Huang, M., Huang, S., Jiang, J.**, Harmonic study of electric vehicle chargers, *Beijing Jiaotong Daxue Xuebao/Journal Beijing Jiaotong Univ.* 32 (2008) 85–88. <https://doi.org/10.1109/icems.2005.203002>.
- [43] **Balcells, J., García, J.**, Impact of plug-in electric vehicles on the supply grid, 2010 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2010 (2010) 5–9. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729217>.
- [44] **Guo, J., Zhao, H., Shen, Z., Wang, A., Cao, L., Hu, E., Wang, Z., Song, X.**, Research on Harmonic Characteristics and Harmonic Counteraction Problem of EV Charging Station, 2nd IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. EI2 2018 - Proc. (2018). <https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582095>.
- [45] **Bass, R., Harley, R., Lambert, F., Rajasekaran, V., Pierce, J.**, Residential harmonic loads and EV charging, *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.* 2 (2001) 803–808. <https://doi.org/10.1109/PESW.2001.916965>.
- [46] **Khalkhali, K., Abapour, S., Moghaddas-Tafreshi, S.M., Abapour, M.**, Application of data envelopment analysis theorem in plug-in hybrid electric vehicle charging station planning, *IET Gener. Transm. Distrib.* 9 (2015) 666–676. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0554>.
- [47] **Mwasilu, F., Justo, J.J., Kim, E.K., Do, T.D., Jung, J.W.**, Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34 (2014) 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.031>.
- [48] **Lund, H., Kempton, W.**, Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G, *Energy Policy* 36 (2008) 3578–3587. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.007>.
- [49] **Sortomme, E., El-Sharkawi, M.A.**, Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid, *IEEE Trans. Smart Grid* 2 (2011) 131–138. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2090910>.
- [50] **Kuzu, B., Nurmhammed, M., Akdag, O., Karadag, T.**, A Simulation Study on

Vehicle-to-Grid Implementation and Environmental Impacts., 6th Int. Artif. Intell. Data Process. Symp. (2022).

- [51] **Rigas, E.S., Ramchurn, S.D., Bassiliades, N.**, Managing Electric Vehicles in the Smart Grid Using Artificial Intelligence: A Survey, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 16 (2015) 1619–1635. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2376873>.
- [52] **Yang, Z., Li, K., Foley, A., Zhang, C.**, Optimal scheduling methods to integrate plug-in electric vehicles with the power system: A review, *IFAC*, 2014. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-za-1003.01804>.
- [53] **Galus, M.D., Vayá, M.G., Krause, T., Andersson, G.**, The role of electric vehicles in smart grids, *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.* 2 (2013) 384–400. <https://doi.org/10.1002/wene.56>.
- [54] **MSB, I.**, Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage White, 2012.
- [55] **Li, C.T., Ahn, C., Peng, H., Sun, J.**, Integration of plug-in electric vehicle charging and wind energy scheduling on electricity grid, 2012 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. ISGT 2012 (2012) 6–12. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175617>.
- [56] **Tan, K.M., Ramachandaramurthy, V.K., Yong, J.Y.**, Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 53 (2016) 720–732. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.012>.
- [57] **Tomić, J., Kempton, W.**, Using fleets of electric-drive vehicles for grid support, *J. Power Sources* 168 (2007) 459–468. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.03.010>.
- [58] **Tekdemir, I.G., Alboyaci, B., Gunes, D., Sengul, M.**, A probabilistic approach for evaluation of electric vehicles' effects on distribution systems, 2017 4th Int. Conf. Electr. Electron. Eng. ICEEE 2017 (2017) 143–147. <https://doi.org/10.1109/ICEEE2.2017.7935809>.
- [59] **Diaz, C., Ruiz, F., Patino, D.**, Smart Charge of an Electric Vehicles Station: A Model Predictive Control Approach, 2018 IEEE Conf. Control Technol. Appl. CCTA 2018 (2018) 54–59. <https://doi.org/10.1109/CCTA.2018.8511498>.

- [60] **Liu, Z., Xie, Y., Feng, D., Zhou, Y., Shi, S., Fang, C.**, Load forecasting model and day-ahead operation strategy for city-located EV quick charge stations, IET Conf. Publ. 2019 (2019) 1–6. <https://doi.org/10.1049/cp.2019.0492>.
- [61] **Güneş, D., Tekdemir, İ.G., Karaarslan, M.Ş., Alboyacı, B.**, Elektrikli araç şarj istasyonu yüklerinin güvenilirlik indisleri üzerine etkilerinin incelenmesi, J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ. (2018). <https://doi.org/https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416408>.
- [62] **Phonrattanasak, P., Leeprechanon, N.**, Optimal placement of EV fast charging stations considering the impact on electrical distribution and traffic condition, in: Proc. 2014 Int. Conf. Util. Exhib. Green Energy Sustain. Dev. ICUE 2014, Asian Institute of Technology, 2014: pp. 19–21.
- [63] **Bai, X., Wang, Z., Zou, L., Liu, H., Sun, Q., Alsaadi, F.E.**, Electric vehicle charging station planning with dynamic prediction of elastic charging demand: a hybrid particle swarm optimization algorithm, Complex Intell. Syst. (2021). <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00575-8>.
- [64] **Nissan LEAF™ Charges up With SunPower**, Erişim: 11 Ekim 2020, (n.d.). <https://newsroom.sunpower.com/press-releases?item=122812>.
- [65] **Tesla and SolarCity**, (2016) Erişim: 10 Ekim 2020, (n.d.). <https://www.tesla.com/blog/tesla-and-solarcity?redirect=no>.
- [66] **Liu, L., Kong, F., Liu, X., Peng, Y., Wang, Q.**, A review on electric vehicles interacting with renewable energy in smart grid, Renew. Sustain. Energy Rev. 51 (2015) 648–661. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.036>.
- [67] **Vaya, M.G., Andersson, G.**, Integrating renewable energy forecast uncertainty in smart-charging approaches for plug-in electric vehicles, 2013 IEEE Grenoble Conf. PowerTech, 2013 (2013). <https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652150>.
- [68] **Li, C.T., Ahn, C., Peng, H., Sun, J.**, Synergistic control of plug-in vehicle charging and wind power scheduling, IEEE Trans. Power Syst. 28 (2013) 1113–1121. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2211900>.
- [69] **Sehar, F., Pipattanasomporn, M., Rahman, S.**, Demand management to mitigate impacts of plug-in electric vehicle fast charge in buildings with renewables, Energy 120 (2017) 642–651. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.118>.

- [70] **Kempton, W., Tomić, J.**, Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy, *J. Power Sources* 144 (2005) 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.022>.
- [71] **Long, Y.L., Li, Y., Wang, Y.H., Cao, Y.J., Jiang, L., Zhou, Y.C., Deng, Y.Y., Nakanishi, Y.**, Impact of EV load uncertainty on optimal planning for electric vehicle charging station, *Sci. China Technol. Sci.* 64 (2021) 2469–2476. <https://doi.org/10.1007/s11431-021-1897-x>.
- [72] **Etezadi-amoli, M., Member, S., Choma, K., Stefani, J., Member, S.**, Rapid-Charge Electric-Vehicle Stations, *IEEE Trans. Power Deliv.* 25 (2010) 1883–1887. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2047874>.
- [73] **Zeb, M.Z., Imran, K., Khattak, A., Janjua, A.K., Pal, A., Nadeem, M., Zhang, J., Khan, S.**, Optimal Placement of Electric Vehicle Charging Stations in the Active Distribution Network, *IEEE Access* 8 (2020) 68124–68134. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984127>.
- [74] **Deb, S., Tammi, K., Gao, X.Z., Kalita, K., Mahanta, P.**, A Hybrid Multi-Objective Chicken Swarm Optimization and Teaching Learning Based Algorithm for Charging Station Placement Problem, *IEEE Access* 8 (2020) 92573–92590. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994298>.
- [75] **Suganya, S., Raja, S.C., Venkatesh, P.**, Simultaneous coordination of distinct plug-in Hybrid Electric Vehicle charging stations: A modified Particle Swarm Optimization approach, *Energy* 138 (2017) 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.036>.
- [76] **Hadian, E., Akbari, H., Farzinfar, M., Saeed, S.**, Optimal allocation of electric vehicle charging stations with adopted smart charging/discharging schedule, *IEEE Access* 8 (2020) 196908–196919. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033662>.
- [77] **Wu, W., Lin, Y., Liu, R., Jin, W.**, The multi-depot electric vehicle scheduling problem with power grid characteristics, *Transp. Res. Part B Methodol.* 155 (2022) 322–347. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.11.007>.
- [78] **Pilz, M., Al-Fagih, L.**, Selfish energy sharing in prosumer communities: A demand-side management concept, 2019 *IEEE Int. Conf. Commun. Control. Comput.*

- Technol. Smart Grids, SmartGridComm 2019 (2019).  
<https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2019.8909791>.
- [79] **Pilz, M., Nebel, J.C., Ai-Fagih, L.**, A Practical Approach to Energy Scheduling: A Game Worth Playing?, Proc. - 2018 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT-Europe 2018 (2018).  
<https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2018.8571522>.
- [80] **Ahmad, F., Khalid, M., Panigrahi, B.K.**, An enhanced approach to optimally place the solar powered electric vehicle charging station in distribution network, J. Energy Storage 42 (2021) 103090. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103090>.
- [81] **Sadhukhan, A., Ahmad, M.S., Sivasubramani, S.**, Optimal Allocation of EV Charging Stations in a Radial Distribution Network Using Probabilistic Load Modeling, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 23 (2022) 11376–11385.  
<https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3103419>.
- [82] **Le-ob-gbo, O., Station, C., Raval, S., Natarajan, T.**, A Novel Levy-Enhanced Opposition-Based Gradient-Based, (2023) 1–16.
- [83] **Houssein, E.H., Deb, S., Oliva, D., Rezk, H., Alhumade, H., Said, M.**, Performance of gradient-based optimizer on charging station placement problem, Mathematics 9 (2021) 1–16. <https://doi.org/10.3390/math9212821>.
- [84] **Dharavat, N., Sudabattula, S.K., Velamuri, S., Mishra, S., Sharma, N.K., Bajaj, M., Elgamli, E., Shouran, M., Kamel, S.**, Optimal Allocation of Renewable Distributed Generators and Electric Vehicles in a Distribution System Using the Political Optimization Algorithm, Energies 15 (2022).  
<https://doi.org/10.3390/en15186698>.
- [85] **Yuvaraj, T., Devabalaji, K.R., Thanikanti, S.B., Pamshetti, V.B., Nwulu, N.I.**, Integration of Electric Vehicle Charging Stations and DSTATCOM in Practical Indian Distribution Systems Using Bald Eagle Search Algorithm, IEEE Access 11 (2023) 55149–55168. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3280607>.
- [86] **Mohanty, A.K., Suresh Babu, P., Salkuti, S.R.**, Optimal Allocation of Fast Charging Station for Integrated Electric-Transportation System Using Multi-Objective Approach, Sustain. 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/su142214731>.
- [87] **Bilal, M., Rizwan, M.**, Integration of electric vehicle charging stations and capacitors

- in distribution systems with vehicle-to-grid facility, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 00 (2021) 1–30. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1923870>.
- [88] **Golla, N.K., Sudabattula, S.K.**, Impact of Plug-in electric vehicles on grid integration with distributed energy resources: A comprehensive review on methodology of power interaction and scheduling, *Mater. Today Proc.* (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.306>.
- [89] **Galiveeti, H.R., Goswami, A.K., Dev Choudhury, N.B.**, Impact of plug-in electric vehicles and distributed generation on reliability of distribution systems, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.* 21 (2018) 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.01.005>.
- [90] **Green, R.C., Wang, L., Alam, M.**, The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: A review and outlook, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 544–553. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.015>.
- [91] **Bompard, E., Ragazzi, E., Tenconi, A.**, The Greening of the Automotive Industry, n.d.
- [92] **Clement-Nyns, K., Haesen, E., Driesen, J.**, Analysis of the impact of plug-in hybrid electric vehicles on residential distribution grids by using quadratic and dynamic programming, *World Electr. Veh. J.* 3 (2009) 214–224. <https://doi.org/10.3390/wevj3020214>.
- [93] **Clement-Nyns, K., Haesen, E., Driesen, J.**, The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid, *Electr. Power Syst. Res.* 81 (2011) 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.08.007>.
- [94] **Clement-Nyns, K.**, Impact of plug-in hybrid electric vehicles on Electricity systems, 2010. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666121>.
- [95] **Deb, S., Tammi, K., Kalita, K., Mahanta, P.**, Impact of electric vehicle charging station load on distribution network, *Energies* 11 (2018) 1–25. <https://doi.org/10.3390/en11010178>.
- [96] **Wu, F., Sioshansi, R.**, A stochastic flow-capturing model to optimize the location of fast-charging stations with uncertain electric vehicle flows, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 53 (2017) 354–376. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.035>.

- [97] **Zhang, H., Moura, S.J., Hu, Z., Song, Y.**, PEV Fast-Charging Station Siting and Sizing on Coupled Transportation and Power Networks, *IEEE Trans. Smart Grid* 9 (2018) 2595–2605. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2614939>.
- [98] **Gong, D., Tang, M., Buchmeister, B., Zhang, H.**, Solving location problem for electric vehicle charging stations - A sharing charging model, *IEEE Access* 7 (2019) 138391–138402. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943079>.
- [99] **Liu, X., Bie, Z.**, Optimal Allocation Planning for Public EV Charging Station Considering AC and DC Integrated Chargers, *Energy Procedia* 159 (2019) 382–387. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.072>.
- [100] **Khan Babar, A.H., Yousaf, A.**, Optimization of charging infrastructure planning for plug-in electric vehicles based on a dynamic programming model, *Transp. Plan. Technol.* (2021). <https://doi.org/10.1080/03081060.2021.2017207>.
- [101] **Lee, B.H., Jung, S.J., Sung, J.H., Kwon, O. kyu, Kim, B.S.**, Selection of charging sites for electric vehicles in the Republic of Korea based on fuzzy analytic hierarchy process, *J. Korean Phys. Soc.* 79 (2021) 217–229. <https://doi.org/10.1007/s40042-021-00128-9>.
- [102] **Deb, S., Gao, X.Z., Tammi, K., Kalita, K., Mahanta, P.**, Nature-Inspired Optimization Algorithms Applied for Solving Charging Station Placement Problem: Overview and Comparison, *Arch. Comput. Methods Eng.* 28 (2021) 91–106. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09374-4>.
- [103] **Jamian, J.J., Mustafa, M.W., Mokhlis, H., Baharudin, M.A.**, Simulation study on optimal placement and sizing of Battery Switching Station units using Artificial Bee Colony algorithm, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 55 (2014) 592–601. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.10.009>.
- [104] **Gampa, S.R., Das, D.**, Optimum placement of shunt capacitors in a radial distribution system for substation power factor improvement using fuzzy GA method, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 77 (2016) 314–326. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.056>.
- [105] **Bečejac, V., Stefanov, P.**, Groebner bases algorithm for optimal PMU placement, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 115 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105427>.

- [106] **Ahmadi, M., Hosseini, S.H., Farsadi, M.,** Optimal Allocation of Electric Vehicles Parking Lots and Optimal Charging and Discharging Scheduling using Hybrid Metaheuristic Algorithms, *J. Electr. Eng. Technol.* 16 (2021) 759–770. <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00634-z>.
- [107] **Asna, M., Shareef, H., Achikkulath, P., Mokhlis, H., Errouissi, R., Wahyudie, A.,** Analysis of an Optimal Planning Model for Electric Vehicle Fast-Charging Stations in Al Ain City, United Arab Emirates, *IEEE Access* 9 (2021) 73678–73694. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3081020>.
- [108] **Palani, V., Gomathi, S., Aruna, P., Veeramani, V.P., Manathunainathan, V.,** Optimal sizing and smart charging abilities of electric vehicle charging station by considering quality of service using hybrid technique, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 00 (2022) 1–17. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2032879>.
- [109] **Romo, R., Micheloud, O.,** Power quality of actual grids with plug-in electric vehicles in presence of renewables and micro-grids, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 46 (2015) 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.014>.
- [110] **Islam, M.R., Lu, H., Hossain, M.J., Li, L.,** Mitigating unbalance using distributed network reconfiguration techniques in distributed power generation grids with services for electric vehicles: A review, *J. Clean. Prod.* 239 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117932>.
- [111] **Yenchamchalit, K., Kongjeen, Y., Prabpal, P., Bhumkittipich, K.,** Optimal Placement of Distributed Photovoltaic Systems and Electric Vehicle Charging Stations Using Metaheuristic, (2021).
- [112] **Battapothula, G., Yammani, C., Maheswarapu, S.,** Multi-objective simultaneous optimal planning of electrical vehicle fast charging stations and DGs in distribution system, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 7 (2019) 923–934. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0493-2>.
- [113] **Reddy, M.S.K., Selvajyothi, K.,** Optimal placement of electric vehicle charging station for unbalanced radial distribution systems, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 00 (2020) 1–15. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1731017>.

- [114] **VOSviewer**, (2022) Erişim: 05 Mayıs 2022, n.d. <https://www.vosviewer.com/>.
- [115] **Holland, J.H.**, Genetic algorithms, SCIENTIFIC AMERICAN, 1992.
- [116] **Kennedy, J., Eberhart, R.**, Particle swarm optimization, in: Proc. ICNN'95 - Int. Conf. Neural Networks, 1995: pp. 1942–1948 vol.4. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.
- [117] **Glover, F.**, Tabu search methods in artificial intelligence and operations research, ORSA Artificial Intelligence Newsletter, 1987.
- [118] **Mirjalili, S., Lewis, A.**, The Whale Optimization Algorithm, Adv. Eng. Softw. 95 (2016) 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>.
- [119] **Hashim, F.A., Hussain, K., Houssein, E.H., Mabrouk, M.S., Al-Atabany, W.**, Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems, Appl. Intell. 51 (2021) 1531–1551. <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z>.
- [120] **Matoušová, I., Trojovský, P., Dehghani, M., Trojovská, E., Kostra, J.**, Mother optimization algorithm: a new human-based metaheuristic approach for solving engineering optimization, Sci. Rep. 13 (2023) 1–26. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37537-8>.
- [121] **Mirjalili, S., Gandomi, A.H., Mirjalili, S.Z., Saremi, S., Faris, H., Mirjalili, S.M.**, Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems, Adv. Eng. Softw. 114 (2017) 163–191. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.07.002>.
- [122] **Hashim, F.A., Houssein, E.H., Hussain, K., Mabrouk, M.S., Al-Atabany, W.**, Honey Badger Algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems, Math. Comput. Simul. 192 (2022) 84–110. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2021.08.013>.
- [123] **Mirjalili, S.**, SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems, Knowledge-Based Syst. 96 (2016) 120–133. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022>.
- [124] **Arora, S., Singh, S.**, Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization, Soft Comput. 23 (2019) 715–734. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3102-4>.

- [125] **Chopra, N., Mohsin Ansari, M.,** Golden jackal optimization: A novel nature-inspired optimizer for engineering applications, *Expert Syst. Appl.* 198 (2022) 116924. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116924>.
- [126] **Trojovska, E., Dehghani, M., Trojovsky, P.,** Fennec Fox Optimization: A New Nature-Inspired Optimization Algorithm, *IEEE Access* 10 (2022) 84417–84443. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3197745>.
- [127] **Zeidabadi, F.A., Doumari, S.A., Dehghani, M., Montazeri, Z., Trojovský, P., Dhiman, G.,** MLA: A new mutated leader algorithm for solving optimization problems, *Comput. Mater. Contin.* 70 (2022) 5631–5649. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.021072>.
- [128] **Doumari, S.A., Givi, H., Dehghani, M., Montazeri, Z., Leiva, V., Guerrero, J.M.,** A new two-stage algorithm for solving optimization problems, *Entropy* 23 (2021) 1–17. <https://doi.org/10.3390/e23040491>.
- [129] **Azizi, M.,** Atomic orbital search: A novel metaheuristic algorithm, *Appl. Math. Model.* 93 (2021) 657–683. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.021>.
- [130] **Wolpert, D.H., Macready, W.G.,** No Free Lunch Theorems for Optimization, 1 (1997) 67–82.
- [131] **Liu, H., Duan, S., Luo, H.,** A hybrid engineering algorithm of the seeker algorithm and particle swarm optimization, *Mater. Test.* 64 (2022) 1051–1089. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2138>.
- [132] **Luo, J., Shi, B.,** A hybrid whale optimization algorithm based on modified differential evolution for global optimization problems, *Appl. Intell.* 49 (2019) 1982–2000. <https://doi.org/10.1007/s10489-018-1362-4>.
- [133] **Zhang, M., Long, D., Qin, T., Yang, J.,** A chaotic hybrid butterfly optimization algorithm with particle swarm optimization for high-dimensional optimization problems, *Symmetry* (Basel). 12 (2020) 1–27. <https://doi.org/10.3390/sym12111800>.
- [134] **Neggaz, I., Neggaz, N., Fizazi, H.,** Boosting Archimedes optimization algorithm using trigonometric operators based on feature selection for facial analysis, *Neural Comput. Appl.* 8 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07925-8>.
- [135] **Niu, P., Ma, Y., Yan, S.,** A modified teaching–learning-based optimization algorithm

- for numerical function optimization, *Int. J. Mach. Learn. Cybern.* 10 (2019) 1357–1371. <https://doi.org/10.1007/s13042-018-0815-8>.
- [136] **Ma, Y., Zhang, X., Song, J., Chen, L.,** A modified teaching–learning-based optimization algorithm for solving optimization problem, *Knowledge-Based Syst.* 212 (2021) 106599. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106599>.
- [137] **Zhang, Y., Zhou, X., Shih, P.C.,** Modified Harris Hawks Optimization Algorithm for Global Optimization Problems, *Arab. J. Sci. Eng.* 45 (2020) 10949–10974. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04896-7>.
- [138] **Kumar, S., Apu, S., Saha, K., Nama, S., Masdari, M.,** An improved moth flame optimization algorithm based on modified dynamic opposite learning strategy, Springer Netherlands, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10218-0>.
- [139] **Sharma, S., Chakraborty, S., Kumar, A., Sukanta, S., Saroj, N., Sahoo, K.,** mLBOA: A Modified Butterfly Optimization Algorithm with Lagrange Interpolation for Global Optimization, *J. Bionic Eng.* 19 (2022) 1161–1176. <https://doi.org/10.1007/s42235-022-00175-3>.
- [140] **Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., Gandomi, A.H.,** The Arithmetic Optimization Algorithm, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 376 (2021) 113609. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609>.
- [141] **Zhou, Y., Ge, F., Dai, G., Yang, Q., Zhu, H., Youssefi, N.,** Modified Arithmetic Optimization Algorithm: A New Approach for Optimum Modeling of the CCHP system, *J. Electr. Eng. Technol.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01140-0>.
- [142] **Shaheen, A.M., Elsayed, A.M., El-Sehiemy, R.A., Ghoneim, S.S.M., Alharthi, M.M., Ginidi, A.R.,** Multi-dimensional energy management based on an optimal power flow model using an improved quasi-reflection jellyfish optimization algorithm, *Eng. Optim.* (2022). <https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2051021>.
- [143] **Kumar, S., Sikander, A.,** A modified probabilistic roadmap algorithm for efficient mobile robot path planning, *Eng. Optim.* (2022). <https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2104840>.
- [144] **Thi, L.M., Mai Anh, T.T., Van Hop, N.,** An improved hybrid metaheuristics and

- rule-based approach for flexible job-shop scheduling subject to machine breakdowns, *Eng. Optim.* (2022).  
<https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2098283>.
- [145] **Gan, X., Pei, J., Wang, W., Yuan, S., Lin, B.**, Application of a modified MOPSO algorithm and multi-layer artificial neural network in centrifugal pump optimization, *Eng. Optim.* (2022).  
<https://doi.org/10.1080/0305215X.2021.2015585>.
- [146] **Tang, Z., Peng, L., Dai, G., Wang, P., Zhao, Y., Yang, H., Pu, Z., Zuo, M.**, Enhancing the search ability of a hybrid LSHADE for global optimization of interplanetary trajectory design, *Eng. Optim.* (2022).  
<https://doi.org/10.1080/0305215X.2021.2019250>.
- [147] **Jelovica, J., Cai, Y., Jelovica, J.**, Improved multi-objective structural optimization with adaptive repair-based constraint handling repair-based constraint handling, *Eng. Optim.* (2022). <https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2147518>.
- [148] **Huang, K.W., Wu, Z.X., Jiang, C.L., Huang, Z.H., Lee, S.H.**, WPO: A Whale Particle Optimization Algorithm, *Int. J. Comput. Intell. Syst.* 16 (2023).  
<https://doi.org/10.1007/s44196-023-00295-6>.
- [149] **Yassami, M., Ashtari, P.**, A novel hybrid optimization algorithm: Dynamic hybrid optimization algorithm, *Multimed. Tools Appl.* (2023) 31947–31979.  
<https://doi.org/10.1007/s11042-023-14444-8>.
- [150] **Akdag, O.**, A Improved Archimedes Optimization Algorithm for multi/single-objective Optimal Power Flow, *Electr. Power Syst. Res.* 206 (2022) 107796.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107796>.
- [151] **Alzubi, Q.M., Anbar, M., Sanjalawe, Y., Al-Betar, M.A., Abdullah, R.**, Intrusion detection system based on hybridizing a modified binary grey wolf optimization and particle swarm optimization, *Expert Syst. Appl.* 204 (2022) 117597.  
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117597>.
- [152] **Nurmuhammed, M., Akdag, O., Karadag, T.**, A novel modified Archimedes optimization algorithm for optimal placement of electric vehicle charging stations in distribution networks, *Alexandria Eng. J.* 84 (2023) 81–92.  
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.055>.

- [153] **Kunith, A., Mendelevitch, R., Goehlich, D.**, Electrification of a city bus network—An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems, *Int. J. Sustain. Transp.* 11 (2017) 707–720. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1310962>.
- [154] **Wang, Y., Huang, Y., Xu, J., Barclay, N.**, Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 100 (2017) 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001>.
- [155] **Liu, X.C., Wei, R.**, Strategic Planning and Design for Electric Bus Systems, DOT Natl. Transp. Integr. Search - ROSA P (2018). <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/36704>.
- [156] **Li, L., Lo, H.K., Xiao, F.**, Mixed bus fleet scheduling under range and refueling constraints, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 104 (2019) 443–462. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.05.009>.
- [157] **Wang, X., Yuen, C., Hassan, N.U., An, N., Wu, W.**, Electric Vehicle Charging Station Placement for Urban Public Bus Systems, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 18 (2017) 128–139. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2563166>.
- [158] **Wei, R., Liu, X., Ou, Y., Kiavash Fayyaz, S.**, Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system, *J. Transp. Geogr.* 68 (2018) 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>.
- [159] **An, K.**, Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 111 (2020) 572–587. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.009>.
- [160] **Bitencourt, L., Abud, T.P., Dias, B.H., Borba, B.S.M.C., Maciel, R.S., Quirós-Tortós, J.**, Optimal location of EV charging stations in a neighborhood considering a multi-objective approach, *Electr. Power Syst. Res.* 199 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107391>.
- [161] **Jefferies, D., Göhlich, D.**, A comprehensive TCO evaluation method for electric bus systems based on discrete-event simulation including bus scheduling and charging infrastructure optimisation, *World Electr. Veh. J.* 11 (2020) 1–43. <https://doi.org/10.3390/WEVJ11030056>.
- [162] **Guschinsky, N., Kovalyov, M.Y., Rozin, B., Brauner, N.**, Fleet and charging

- infrastructure decisions for fast-charging city electric bus service, *Comput. Oper. Res.* 135 (2021) 105449. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105449>.
- [163] **Zhang, K., Chen, Y., Cui, C., Wu, P., Miao, L., Chen, B.**, Electric-bus charging stations multi-objective optimization planning on coupled power and traffic networks, *IET Intell. Transp. Syst.* (2022) 1–11. <https://doi.org/10.1049/itr2.12215>.
- [164] **Wu, X., Feng, Q., Bai, C., Lai, C.S., Jia, Y., Lai, L.L.**, A novel fast-charging stations locational planning model for electric bus transit system, *Energy* 224 (2021) 120106. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120106>.
- [165] **Clairand, J.M., González-Rodríguez, M., Cedeño, I., Escrivá-Escrivá, G.**, A charging station planning model considering electric bus aggregators, *Sustain. Energy, Grids Networks* 30 (2022) 100638. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100638>.
- [166] **Herron, D.**, Charging levels - Level 1, Level 2, DC Fast Charging, Erişim: 24 Aralık 2020, (2017). <https://greentransportation.info/ev-charging/range-confidence/chap4-charging/4-charging-levels.html>.
- [167] **Ashique, R.H., Salam, Z., Bin Abdul Aziz, M.J., Bhatti, A.R.**, Integrated photovoltaic-grid dc fast charging system for electric vehicle: A review of the architecture and control, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69 (2017) 1243–1257. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.245>.
- [168] **SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler**, (2017) Erişim: 22 Temmuz 2018, n.d. [https://saemobilus.sae.org/content/J1772\\_201710/](https://saemobilus.sae.org/content/J1772_201710/).
- [169] **IONITY orders 324 350kW EV chargers from ABB for second phase of expansion**, (2020) Erişim: 31 Ağustos 2020, n.d. <https://www.greencarcongress.com/2020/01/20200110-abb.html>.
- [170] **Supercharger**, Erişim 23 Aralık 2023, (2023). <https://www.tesla.com/supercharger>.
- [171] **Kane, M.**, Repsol Launches The Most Powerful Charging Station In Europe: 400 kW, Erişim: 1 Eylül 2020, (n.d.). <https://insideevs.com/news/375020/repsol-most-powerful-charging-station-europe/>.
- [172] **Chakravorty, M., Das, D.**, Voltage stability analysis of radial distribution networks,

- Int. J. Electr. Power Energy Syst. 23 (2001) 129–135.  
<https://doi.org/10.1080/15325000390127011>.
- [173] **PowerFactory**, [Computer Software], (n.d.). <https://www.digsilent.de/>.
- [174] **MATLAB**, [Computer Software], (2022). <https://www.mathworks.com>.
- [175] **Kaur, N.**, DLHO- : An Enhanced Version of Harris Hawks Optimization By Dimension Learning-Based Hunting For Breast Cancer And Other Serious Diseases Detection, (2021) 0–40.
- [176] **Nadimi-shahraki, M.H., Taghian, S., Mirjalili, S.**, An improved grey wolf optimizer for solving engineering problems, *Expert Syst. Appl.* 166 (2021) 113917. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113917>.
- [177] **Awad, N.H., Ali, M.Z., Suganthan, P.N., Liang, J.J., Qu, B.Y.**, Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2017, 2017.
- [178] **Wu, M.E.B. and F.F.**, Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, *IEEE Trans. Power Deliv.* 4 (1989) 1401–1407.
- [179] **Savier, J.S., Das, D.**, Impact of Network Reconfiguration on Loss Allocation of Radial Distribution Systems, 22 (2007) 2473–2480.
- [180] **Akdag, O., Yeroglu, C.**, Optimal directional overcurrent relay coordination using MRFO algorithm: A case study of adaptive protection of the distribution network of the Hatay province of Turkey, *Electr. Power Syst. Res.* 192 (2021) 106998. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106998>.
- [181] **Abdelaty, H., Al-Obaidi, A., Mohamed, M., Farag, H.E.Z.**, Machine learning prediction models for battery-electric bus energy consumption in transit, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 96 (2021) 102868. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102868>.
- [182] **Friedman, M.**, The Use of Ranks to Avoid the Assumption of Normality Implicit in the Analysis of Variance, *J. Am. Stat. Assoc.* 32 (1937) 675–701. <https://doi.org/10.1080/01621459.1937.10503522>.
- [183] **Mirjalili, S.**, The ant lion optimizer, *Adv. Eng. Softw.* 83 (2015) 80–98. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.01.010>.
- [184] **Cheng, M.Y., Prayogo, D.**, Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic

- optimization algorithm, *Comput. Struct.* 139 (2014) 98–112.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.03.007>.
- [185] **Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S.**, Equilibrium Optimizer : A Novel Optimization Algorithm, *Knowledge-Based Syst.* (2019).  
<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105190>.
- [186] **EEA (European Environment Agency)**, CO2 performance of new passenger cars in Europe., (2021). <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/average-co2-emissions-from-motor-vehicles-1/assessment>.
- [187] **Li, Y., Sun, Y., Li, K., Zhuang, J., Liang, Y., Pang, Y.**, Analysis and suppression of voltage violation and fluctuation with distributed photovoltaic integration, *Symmetry (Basel)*. 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/sym13101894>.
- [188] **Liu, J. peng, Zhang, T. xi, Zhu, J., Ma, T. nan**, Allocation optimization of electric vehicle charging station (EVCS) considering with charging satisfaction and distributed renewables integration, *Energy* 164 (2018) 560–574.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.028>.
- [189] **Mirjalili, S.**, Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm, *Knowledge-Based Syst.* 89 (2015) 228–249.  
<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.07.006>.
- [190] **Kaur, S., Awasthi, L.K., Sangal, A.L., Dhiman, G.**, Tunicate Swarm Algorithm: A new bio-inspired based metaheuristic paradigm for global optimization, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 90 (2020) 103541.  
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103541>.
- [191] **Talatahari, S., Azizi, M.**, Chaos Game Optimization: a novel metaheuristic algorithm, Springer Netherlands, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09867-w>.
- [192] **Vita, V.**, Development of a decision-making algorithm for the optimum size and placement of distributed generation units in distribution networks, *Energies* 10 (2017). <https://doi.org/10.3390/en10091433>.
- [193] **United States Environmental Protection Agency (EPA)**, Greenhouse Gas Emissions, Erişim: 25 şubat 2023, (2023).  
<https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>.

## **EKLER**

**EK A : CEC 2017 kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları**

**EK A**



**Çizelge A.1 : 29 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

| Fon. | Ölçüm        | AOA      | MAOA            | MDAOA           | BPA             | SKA      | KOA      | HPSOKOA  | AÇO      | BOA      | KAO             | SSA             | AYAA     |
|------|--------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------|-----------------|----------|
| 1    | Ort.         | 4,38E+09 | 1,04E+03        | <b>5,97E+02</b> | 2,45E+03        | 7,47E+08 | 3,30E+09 | 2,93E+09 | 2,76E+08 | 1,23E+06 | 1,82E+03        | 3,36E+03        | 1,92E+05 |
|      | Std. Sapma   | 1,98E+09 | 1,16E+03        | 6,23E+02        | 2,35E+03        | 2,46E+08 | 1,95E+09 | 1,62E+09 | 3,70E+08 | 1,42E+06 | 2,05E+03        | 3,39E+03        | 1,14E+05 |
|      | Medyan       | 4,24E+09 | 6,92E+02        | 4,17E+02        | 2,56E+03        | 7,51E+08 | 3,39E+09 | 2,56E+09 | 3,46E+07 | 8,79E+05 | 1,01E+03        | 2,40E+03        | 1,81E+05 |
|      | Maksimum     | 8,42E+09 | 5,63E+03        | 2,59E+03        | 1,08E+04        | 1,39E+09 | 8,11E+09 | 7,64E+09 | 1,58E+09 | 7,73E+06 | 8,12E+03        | 1,21E+04        | 5,22E+05 |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |                 | 0,09            | 0,005           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,178           | <,001           | <,001    |
| 3    | P (Wilcoxon) | <,001    | 0,09            |                 | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,006           | <,001           | <,001    |
|      | Ort.         | 1,16E+03 | 3,01E+02        | <b>3,00E+02</b> | <b>3,00E+02</b> | 1,43E+03 | 6,96E+03 | 1,50E+04 | 3,50E+03 | 2,06E+03 | <b>3,00E+02</b> | <b>3,00E+02</b> | 3,03E+02 |
|      | Std. Sapma   | 1,74E+03 | 2,57E+00        | 1,53E-04        | 7,77E-12        | 5,35E+02 | 2,13E+03 | 1,91E+03 | 2,66E+03 | 2,43E+03 | 6,21E-09        | 9,13E-10        | 2,22E+00 |
|      | Medyan       | 3,82E+02 | 3,00E+02        | 3,00E+02        | 3,00E+02        | 1,28E+03 | 6,92E+03 | 1,53E+04 | 2,78E+03 | 1,09E+03 | 3,00E+02        | 3,00E+02        | 3,02E+02 |
|      | Maksimum     | 7,38E+03 | 3,14E+02        | 3,00E+02        | 3,00E+02        | 2,79E+03 | 1,14E+04 | 1,80E+04 | 1,06E+04 | 1,13E+04 | 3,00E+02        | 3,00E+02        | 3,12E+02 |
| 4    | P (Wilcoxon) | <,001    |                 | <,001           | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001           | <,001           | <,001    |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    | <,001           |                 | 0,002           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,002           | 0,002           | <,001    |
|      | Ort.         | 6,00E+02 | 4,05E+02        | <b>4,02E+02</b> | 4,03E+02        | 4,53E+02 | 1,25E+03 | 2,10E+03 | 4,33E+02 | 4,40E+02 | 4,04E+02        | 4,07E+02        | 4,11E+02 |
|      | Std. Sapma   | 1,24E+02 | 7,02E+00        | 1,32E+00        | 9,96E+00        | 3,13E+01 | 3,29E+02 | 7,60E+02 | 2,41E+01 | 4,70E+01 | 1,85E+00        | 1,18E+01        | 1,69E+01 |
|      | Medyan       | 5,48E+02 | 4,04E+02        | 4,02E+02        | 4,01E+02        | 4,41E+02 | 1,21E+03 | 2,26E+03 | 4,25E+02 | 4,09E+02 | 4,05E+02        | 4,05E+02        | 4,08E+02 |
| 5    | Maksimum     | 9,65E+02 | 4,39E+02        | 4,05E+02        | 4,56E+02        | 5,38E+02 | 2,02E+03 | 3,25E+03 | 4,96E+02 | 5,61E+02 | 4,06E+02        | 4,69E+02        | 4,77E+02 |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |                 | 0,005           | 0,003           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,254           | 0,069           | <,001    |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    | 0,005           |                 | 0,032           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001           | <,001           | <,001    |
|      | Ort.         | 5,45E+02 | 5,16E+02        | <b>5,10E+02</b> | 5,15E+02        | 5,47E+02 | 5,81E+02 | 6,19E+02 | 5,28E+02 | 5,59E+02 | 5,22E+02        | 5,23E+02        | 5,25E+02 |
|      | Std. Sapma   | 1,03E+01 | 7,50E+00        | 3,71E+00        | 7,20E+00        | 4,54E+00 | 1,24E+01 | 1,61E+01 | 9,86E+00 | 2,04E+01 | 1,03E+01        | 1,57E+01        | 1,11E+01 |
| 6    | Medyan       | 5,46E+02 | 5,14E+02        | 5,09E+02        | 5,14E+02        | 5,47E+02 | 5,81E+02 | 6,20E+02 | 5,28E+02 | 5,58E+02 | 5,20E+02        | 5,19E+02        | 5,22E+02 |
|      | Maksimum     | 5,77E+02 | 5,35E+02        | 5,20E+02        | 5,32E+02        | 5,56E+02 | 6,08E+02 | 6,45E+02 | 5,54E+02 | 5,99E+02 | 5,46E+02        | 5,89E+02        | 5,48E+02 |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |                 | 0,001           | 0,959           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,018           | 0,003           | 0,001    |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    | 0,001           |                 | 0,005           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001           | <,001           | <,001    |
|      | Ort.         | 6,18E+02 | <b>6,00E+02</b> | <b>6,00E+02</b> | <b>6,00E+02</b> | 6,19E+02 | 6,29E+02 | 6,61E+02 | 6,08E+02 | 6,36E+02 | 6,07E+02        | 6,08E+02        | 6,12E+02 |
| 6    | Std. Sapma   | 9,10E+00 | 1,14E+00        | 1,79E-03        | 2,90E-01        | 3,50E+00 | 9,12E+00 | 4,89E+00 | 6,07E+00 | 1,55E+01 | 4,17E+00        | 9,21E+00        | 6,83E+00 |
|      | Medyan       | 6,17E+02 | 6,00E+02        | 6,00E+02        | 6,00E+02        | 6,18E+02 | 6,28E+02 | 6,62E+02 | 6,06E+02 | 6,35E+02 | 6,06E+02        | 6,05E+02        | 6,11E+02 |
|      | Maksimum     | 6,36E+02 | 6,06E+02        | 6,00E+02        | 6,02E+02        | 6,28E+02 | 6,49E+02 | 6,69E+02 | 6,24E+02 | 6,71E+02 | 6,16E+02        | 6,36E+02        | 6,32E+02 |

**Çizelge A.1 (devam) : 29 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

| Fon. | Ölçüm        | AOA      | MAOA     | MDAOA           | BPA      | SKA      | KOA      | HPSOKOA  | AÇO      | BOA      | KAO      | SSA      | AYAA     |
|------|--------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 6    | P (Wilcoxon) | <,001    |          | <,001           | 0,004    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |          |                 | 0,002    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
| 7    | Ort.         | 7,56E+02 | 7,27E+02 | <b>7,19E+02</b> | 7,29E+02 | 7,73E+02 | 7,87E+02 | 8,29E+02 | 7,48E+02 | 7,78E+02 | 7,40E+02 | 7,36E+02 | 7,55E+02 |
|      | Std. Sapma   | 1,41E+01 | 1,02E+01 | 5,41E+00        | 9,20E+00 | 1,13E+01 | 1,01E+01 | 8,12E+00 | 1,23E+01 | 2,64E+01 | 1,35E+01 | 1,27E+01 | 1,60E+01 |
|      | Medyan       | 7,56E+02 | 7,25E+02 | 7,19E+02        | 7,29E+02 | 7,71E+02 | 7,90E+02 | 8,29E+02 | 7,48E+02 | 7,77E+02 | 7,41E+02 | 7,35E+02 | 7,55E+02 |
|      | Maksimum     | 8,00E+02 | 7,53E+02 | 7,31E+02        | 7,60E+02 | 7,98E+02 | 8,06E+02 | 8,40E+02 | 7,72E+02 | 8,52E+02 | 7,67E+02 | 7,57E+02 | 7,98E+02 |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |          | 0,005           | 0,329    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,007    | <,001    |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    | 0,005    |                 | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
| 8    | Ort.         | 8,18E+02 | 8,09E+02 | <b>8,07E+02</b> | 8,14E+02 | 8,43E+02 | 8,49E+02 | 8,52E+02 | 8,28E+02 | 8,44E+02 | 8,21E+02 | 8,22E+02 | 8,21E+02 |
|      | Std. Sapma   | 3,80E+00 | 3,81E+00 | 2,61E+00        | 4,67E+00 | 7,34E+00 | 6,71E+00 | 3,87E+00 | 1,10E+01 | 1,80E+01 | 9,70E+00 | 1,08E+01 | 7,47E+00 |
|      | Medyan       | 8,17E+02 | 8,08E+02 | 8,07E+02        | 8,15E+02 | 8,43E+02 | 8,49E+02 | 8,53E+02 | 8,25E+02 | 8,44E+02 | 8,20E+02 | 8,18E+02 | 8,20E+02 |
|      | Maksimum     | 8,26E+02 | 8,16E+02 | 8,12E+02        | 8,25E+02 | 8,63E+02 | 8,60E+02 | 8,59E+02 | 8,61E+02 | 8,90E+02 | 8,41E+02 | 8,49E+02 | 8,42E+02 |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |          | 0,185           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    | 0,185    |                 | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
| 9    | Ort.         | 1,01E+03 | 9,01E+02 | <b>9,00E+02</b> | 9,01E+02 | 1,00E+03 | 1,14E+03 | 1,81E+03 | 9,66E+02 | 1,36E+03 | 9,35E+02 | 9,30E+02 | 1,05E+03 |
|      | Std. Sapma   | 7,21E+01 | 3,18E+00 | 8,40E-02        | 1,25E+00 | 4,67E+01 | 1,24E+02 | 1,64E+02 | 7,56E+01 | 2,87E+02 | 7,68E+01 | 6,41E+01 | 1,64E+02 |
|      | Medyan       | 1,01E+03 | 9,00E+02 | 9,00E+02        | 9,00E+02 | 1,00E+03 | 1,13E+03 | 1,85E+03 | 9,48E+02 | 1,31E+03 | 9,00E+02 | 9,03E+02 | 1,01E+03 |
|      | Maksimum     | 1,22E+03 | 9,15E+02 | 9,00E+02        | 9,06E+02 | 1,17E+03 | 1,37E+03 | 2,11E+03 | 1,21E+03 | 2,31E+03 | 1,19E+03 | 1,17E+03 | 1,69E+03 |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |          | <,001           | 0,807    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,029    | 0,001    | <,001    |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    | <,001    |                 | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
| 10   | Ort.         | 1,99E+03 | 1,50E+03 | <b>1,32E+03</b> | 1,92E+03 | 2,33E+03 | 2,49E+03 | 2,84E+03 | 1,84E+03 | 2,08E+03 | 1,89E+03 | 1,79E+03 | 1,68E+03 |
|      | Std. Sapma   | 2,60E+02 | 2,17E+02 | 2,47E+02        | 5,43E+02 | 2,16E+02 | 1,69E+02 | 1,64E+02 | 3,93E+02 | 3,99E+02 | 2,53E+02 | 2,59E+02 | 2,65E+02 |
|      | Medyan       | 1,98E+03 | 1,49E+03 | 1,26E+03        | 1,73E+03 | 2,37E+03 | 2,50E+03 | 2,83E+03 | 1,80E+03 | 2,04E+03 | 1,88E+03 | 1,77E+03 | 1,67E+03 |
|      | Maksimum     | 2,54E+03 | 1,93E+03 | 1,86E+03        | 3,31E+03 | 2,69E+03 | 2,86E+03 | 3,13E+03 | 2,74E+03 | 2,91E+03 | 2,32E+03 | 2,30E+03 | 2,25E+03 |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |          | 0,006           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,023    |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    | 0,006    |                 | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
| 11   | Ort.         | 1,20E+03 | 1,11E+03 | <b>1,10E+03</b> | 1,11E+03 | 1,20E+03 | 1,30E+03 | 1,44E+03 | 1,32E+03 | 1,20E+03 | 1,19E+03 | 1,17E+03 | 1,17E+03 |
|      | Std. Sapma   | 1,73E+02 | 5,04E+00 | 2,39E+00        | 2,27E+01 | 3,26E+01 | 1,16E+02 | 2,79E+02 | 8,23E+02 | 7,99E+01 | 5,64E+01 | 5,34E+01 | 5,08E+01 |

**Çizelge A.1 (devam) : 29 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

| Fon.         | Ölçüm        | AOA      | MAOA     | MDAOA           | BPA      | SKA      | KOA      | HPSOKOA  | AÇO      | BOA      | KAO      | SSA      | AYAA     |
|--------------|--------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 11           | Medyan       | 1,15E+03 | 1,11E+03 | 1,10E+03        | 1,11E+03 | 1,19E+03 | 1,26E+03 | 1,35E+03 | 1,15E+03 | 1,17E+03 | 1,17E+03 | 1,16E+03 | 1,18E+03 |
|              | Maksimum     | 2,08E+03 | 1,13E+03 | 1,11E+03        | 1,23E+03 | 1,32E+03 | 1,72E+03 | 2,40E+03 | 5,66E+03 | 1,41E+03 | 1,35E+03 | 1,32E+03 | 1,29E+03 |
|              | P (Wilcoxon) | <.001    |          | <.001           | 0,544    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    |
|              | P (Wilcoxon) | <.001    | <.001    |                 | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    |
|              | Ort.         | 4,50E+06 | 6,50E+05 | <b>1,43E+04</b> | 1,75E+04 | 1,35E+07 | 1,24E+07 | 5,04E+06 | 7,41E+05 | 5,75E+06 | 1,55E+06 | 1,87E+06 | 1,46E+06 |
| 12           | Std. Sapma   | 1,08E+07 | 3,13E+06 | 3,20E+04        | 1,80E+04 | 9,58E+06 | 8,59E+06 | 4,45E+06 | 8,35E+05 | 6,12E+06 | 1,56E+06 | 2,18E+06 | 2,08E+06 |
|              | Medyan       | 1,24E+06 | 1,38E+04 | 8,05E+03        | 1,21E+04 | 1,05E+07 | 1,01E+07 | 3,87E+06 | 3,29E+05 | 3,22E+06 | 1,16E+06 | 7,52E+05 | 2,95E+05 |
|              | Maksimum     | 5,80E+07 | 1,71E+07 | 1,82E+05        | 6,05E+04 | 3,96E+07 | 3,39E+07 | 1,94E+07 | 2,61E+06 | 2,31E+07 | 6,80E+06 | 7,16E+06 | 7,19E+06 |
|              | P (Wilcoxon) | <.001    |          | 0,086           | 0,629    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    |
|              | P (Wilcoxon) | <.001    | 0,086    |                 | 0,102    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    |
| 13           | Ort.         | 7,33E+03 | 4,13E+03 | <b>2,57E+03</b> | 5,01E+03 | 3,38E+04 | 5,81E+04 | 3,73E+04 | 9,54E+03 | 1,70E+04 | 1,77E+04 | 1,37E+04 | 1,29E+04 |
|              | Std. Sapma   | 2,13E+03 | 2,91E+03 | 7,48E+02        | 6,22E+03 | 2,61E+04 | 3,94E+04 | 2,16E+04 | 5,07E+03 | 1,38E+04 | 1,40E+04 | 9,35E+03 | 1,01E+04 |
|              | Medyan       | 6,74E+03 | 2,81E+03 | 2,43E+03        | 3,08E+03 | 2,61E+04 | 4,82E+04 | 2,96E+04 | 8,95E+03 | 1,29E+04 | 1,24E+04 | 1,19E+04 | 1,18E+04 |
|              | Maksimum     | 1,13E+04 | 1,38E+04 | 4,03E+03        | 3,49E+04 | 1,22E+05 | 1,36E+05 | 1,06E+05 | 2,74E+04 | 5,47E+04 | 5,38E+04 | 3,16E+04 | 3,71E+04 |
|              | P (Wilcoxon) | <.001    |          | 0,017           | 0,704    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    |
| 14           | P (Wilcoxon) | <.001    | 0,017    |                 | 0,002    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    |
|              | Ort.         | 1,47E+03 | 1,46E+03 | <b>1,44E+03</b> | 1,49E+03 | 1,75E+03 | 2,70E+03 | 2,55E+03 | 2,24E+03 | 1,97E+03 | 1,61E+03 | 1,52E+03 | 1,59E+03 |
|              | Std. Sapma   | 1,85E+01 | 2,90E+01 | 1,47E+01        | 5,36E+01 | 6,47E+02 | 7,93E+02 | 8,82E+02 | 1,42E+03 | 1,00E+03 | 2,58E+02 | 7,70E+01 | 5,63E+02 |
|              | Medyan       | 1,46E+03 | 1,45E+03 | 1,44E+03        | 1,48E+03 | 1,60E+03 | 2,64E+03 | 2,25E+03 | 1,50E+03 | 1,58E+03 | 1,53E+03 | 1,50E+03 | 1,49E+03 |
|              | Maksimum     | 1,53E+03 | 1,54E+03 | 1,48E+03        | 1,61E+03 | 5,09E+03 | 4,20E+03 | 4,47E+03 | 5,18E+03 | 5,23E+03 | 2,56E+03 | 1,77E+03 | 4,57E+03 |
| 15           | P (Wilcoxon) | 0,075    |          | 0,006           | 0,006    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | 0,001    |
|              | P (Wilcoxon) | <.001    | 0,006    |                 | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    |
|              | Ort.         | 1,67E+03 | 1,65E+03 | <b>1,57E+03</b> | 1,59E+03 | 2,99E+03 | 6,45E+03 | 5,10E+03 | 3,78E+03 | 5,74E+03 | 4,90E+03 | 2,85E+03 | 3,78E+03 |
|              | Std. Sapma   | 2,54E+02 | 1,06E+02 | 3,92E+01        | 7,61E+01 | 1,94E+03 | 4,39E+03 | 2,99E+03 | 1,77E+03 | 4,01E+03 | 4,46E+03 | 1,77E+03 | 2,02E+03 |
|              | Medyan       | 1,59E+03 | 1,63E+03 | 1,57E+03        | 1,56E+03 | 2,13E+03 | 5,40E+03 | 4,33E+03 | 3,90E+03 | 5,00E+03 | 2,95E+03 | 2,22E+03 | 2,94E+03 |
| P (Wilcoxon) | Maksimum     | 2,57E+03 | 1,88E+03 | 1,66E+03        | 1,82E+03 | 8,98E+03 | 2,51E+04 | 1,37E+04 | 9,36E+03 | 2,03E+04 | 2,39E+04 | 8,34E+03 | 1,07E+04 |
|              | P (Wilcoxon) | 0,428    |          | 0,001           | 0,01     | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    |
|              | P (Wilcoxon) | 0,024    | 0,001    |                 | 0,453    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    |

**Çizelge A.1 (devam) : 29 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

| Fon. | Ölçüm        | AOA      | MAOA            | MDAOA           | BPA      | SKA      | KOA      | HPSOKOA  | AÇO      | BOA      | KAO      | SSA      | AYAA     |
|------|--------------|----------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 16   | Ort.         | 1,84E+03 | 1,66E+03        | <b>1,61E+03</b> | 1,72E+03 | 1,72E+03 | 1,87E+03 | 2,25E+03 | 1,72E+03 | 1,87E+03 | 1,78E+03 | 1,73E+03 | 1,74E+03 |
|      | Std. Sapma   | 7,57E+01 | 6,93E+01        | 2,26E+01        | 1,07E+02 | 6,76E+01 | 8,81E+01 | 1,18E+02 | 1,12E+02 | 1,30E+02 | 1,47E+02 | 1,03E+02 | 9,19E+01 |
|      | Medyan       | 1,84E+03 | 1,64E+03        | 1,60E+03        | 1,73E+03 | 1,69E+03 | 1,89E+03 | 2,22E+03 | 1,67E+03 | 1,87E+03 | 1,75E+03 | 1,73E+03 | 1,75E+03 |
|      | Maksimum     | 1,98E+03 | 1,89E+03        | 1,73E+03        | 1,97E+03 | 1,93E+03 | 2,05E+03 | 2,53E+03 | 2,02E+03 | 2,14E+03 | 2,12E+03 | 1,95E+03 | 2,06E+03 |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |                 | <,001           | 0,024    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,005    | <,001    | <,001    | 0,004    | 0,001    |
| 17   | P (Wilcoxon) | <,001    | <,001           |                 | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | Ort.         | 1,75E+03 | 1,74E+03        | <b>1,73E+03</b> | 1,75E+03 | 1,77E+03 | 1,79E+03 | 1,83E+03 | 1,76E+03 | 1,81E+03 | 1,79E+03 | 1,77E+03 | 1,77E+03 |
|      | Std. Sapma   | 1,28E+01 | 1,34E+01        | 1,12E+01        | 2,52E+01 | 1,45E+01 | 1,48E+01 | 3,11E+01 | 1,53E+01 | 5,39E+01 | 5,38E+01 | 4,43E+01 | 3,11E+01 |
|      | Medyan       | 1,75E+03 | 1,75E+03        | 1,73E+03        | 1,74E+03 | 1,77E+03 | 1,79E+03 | 1,82E+03 | 1,76E+03 | 1,80E+03 | 1,77E+03 | 1,75E+03 | 1,76E+03 |
|      | Maksimum     | 1,80E+03 | 1,77E+03        | 1,75E+03        | 1,81E+03 | 1,80E+03 | 1,82E+03 | 1,95E+03 | 1,81E+03 | 1,94E+03 | 1,92E+03 | 1,94E+03 | 1,87E+03 |
| 18   | P (Wilcoxon) | 0,003    |                 | <,001           | 0,417    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,001    | <,001    |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    | <,001           |                 | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | Ort.         | 2,86E+03 | 2,66E+06        | <b>3,00E+03</b> | 1,30E+04 | 1,45E+05 | 5,06E+05 | 6,04E+04 | 3,54E+04 | 1,73E+04 | 1,55E+04 | 1,84E+04 | 2,46E+04 |
|      | Std. Sapma   | 8,64E+02 | 1,45E+07        | 8,61E+02        | 1,04E+04 | 1,54E+05 | 6,80E+05 | 3,77E+04 | 1,26E+04 | 1,10E+04 | 1,23E+04 | 1,32E+04 | 1,71E+04 |
|      | Medyan       | 2,76E+03 | 3,02E+03        | 2,72E+03        | 8,04E+03 | 1,19E+05 | 2,07E+05 | 5,13E+04 | 3,59E+04 | 1,61E+04 | 1,18E+04 | 1,46E+04 | 2,13E+04 |
| 19   | Maksimum     | 4,73E+03 | 7,97E+07        | 5,28E+03        | 3,51E+04 | 8,88E+05 | 3,17E+06 | 1,49E+05 | 5,55E+04 | 3,91E+04 | 4,53E+04 | 4,81E+04 | 5,46E+04 |
|      | P (Wilcoxon) | 0,229    |                 | 0,405           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | P (Wilcoxon) | 0,572    | 0,405           |                 | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | Ort.         | 2,40E+03 | 2,05E+03        | <b>1,92E+03</b> | 2,04E+03 | 4,30E+03 | 3,12E+04 | 2,32E+04 | 8,59E+03 | 5,45E+04 | 8,67E+03 | 3,01E+03 | 4,89E+03 |
|      | Std. Sapma   | 1,02E+03 | 3,46E+02        | 1,25E+01        | 2,03E+02 | 3,74E+03 | 2,20E+04 | 3,29E+04 | 6,05E+03 | 1,01E+05 | 6,86E+03 | 1,63E+03 | 4,00E+03 |
| 20   | Medyan       | 1,93E+03 | 1,94E+03        | 1,92E+03        | 2,00E+03 | 2,40E+03 | 3,41E+04 | 1,03E+04 | 1,21E+04 | 1,89E+04 | 7,44E+03 | 2,13E+03 | 3,01E+03 |
|      | Maksimum     | 5,56E+03 | 3,76E+03        | 1,95E+03        | 2,81E+03 | 1,31E+04 | 9,49E+04 | 1,43E+05 | 1,71E+04 | 4,62E+05 | 2,38E+04 | 7,71E+03 | 1,51E+04 |
|      | P (Wilcoxon) | 0,704    |                 | <,001           | 0,329    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,002    | <,001    |
|      | P (Wilcoxon) | 0,002    | <,001           |                 | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | Ort.         | 2,07E+03 | <b>2,02E+03</b> | <b>2,02E+03</b> | 2,06E+03 | 2,09E+03 | 2,15E+03 | 2,25E+03 | 2,09E+03 | 2,15E+03 | 2,13E+03 | 2,09E+03 | 2,08E+03 |
| 20   | Std. Sapma   | 5,43E+01 | 1,41E+01        | 1,05E+01        | 6,98E+01 | 1,97E+01 | 3,54E+01 | 1,97E+01 | 5,61E+01 | 8,50E+01 | 7,54E+01 | 5,33E+01 | 4,96E+01 |
|      | Medyan       | 2,05E+03 | 2,02E+03        | 2,02E+03        | 2,04E+03 | 2,09E+03 | 2,14E+03 | 2,25E+03 | 2,06E+03 | 2,13E+03 | 2,11E+03 | 2,07E+03 | 2,07E+03 |
|      | Maksimum     | 2,19E+03 | 2,06E+03        | 2,05E+03        | 2,28E+03 | 2,14E+03 | 2,21E+03 | 2,28E+03 | 2,23E+03 | 2,36E+03 | 2,31E+03 | 2,22E+03 | 2,20E+03 |

**Çizelge A.1 (devam) : 29 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

| Fon. | Ölçüm        | AOA      | MAOA     | MDAOA           | BPA      | SKA      | KOA             | HPSOKOA  | AÇO      | BOA      | KAO      | SSA      | AYAA     |
|------|--------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 20   | P (Wilcoxon) | <,001    |          | 0,12            | 0,004    | <,001    | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
| 21   | P (Wilcoxon) | <,001    | 0,12     |                 | <,001    | <,001    | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | Ort.         | 2,31E+03 | 2,25E+03 | <b>2,21E+03</b> | 2,30E+03 | 2,25E+03 | <b>2,21E+03</b> | 2,32E+03 | 2,33E+03 | 2,31E+03 | 2,30E+03 | 2,29E+03 | 2,22E+03 |
|      | Std. Sapma   | 5,32E+01 | 5,99E+01 | 2,51E+01        | 4,62E+01 | 6,11E+01 | 1,55E+01        | 6,66E+01 | 1,06E+01 | 6,12E+01 | 5,43E+01 | 5,44E+01 | 3,58E+01 |
|      | Medyan       | 2,33E+03 | 2,21E+03 | 2,20E+03        | 2,32E+03 | 2,22E+03 | 2,21E+03        | 2,30E+03 | 2,33E+03 | 2,34E+03 | 2,32E+03 | 2,32E+03 | 2,21E+03 |
|      | Maksimum     | 2,35E+03 | 2,34E+03 | 2,32E+03        | 2,34E+03 | 2,35E+03 | 2,23E+03        | 2,43E+03 | 2,35E+03 | 2,40E+03 | 2,34E+03 | 2,34E+03 | 2,32E+03 |
|      | P (Wilcoxon) | 0,001    |          | 0,086           | 0,015    | 0,213    | 0,102           | <,001    | <,001    | <,001    | 0,01     | 0,035    | 0,072    |
| 22   | P (Wilcoxon) | <,001    | 0,086    |                 | <,001    | <,001    | 0,063           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | 0,975    |
|      | Ort.         | 2,34E+03 | 2,30E+03 | <b>2,24E+03</b> | 2,30E+03 | 2,36E+03 | 2,33E+03        | 3,05E+03 | 2,36E+03 | 2,34E+03 | 2,30E+03 | 2,35E+03 | 2,30E+03 |
|      | Std. Sapma   | 3,73E+01 | 9,92E+00 | 4,42E+01        | 1,16E+01 | 2,63E+01 | 1,67E+01        | 2,70E+02 | 4,89E+01 | 1,59E+02 | 1,44E+01 | 2,44E+02 | 1,32E+01 |
|      | Medyan       | 2,32E+03 | 2,30E+03 | 2,22E+03        | 2,30E+03 | 2,36E+03 | 2,33E+03        | 3,09E+03 | 2,34E+03 | 2,31E+03 | 2,30E+03 | 2,30E+03 | 2,30E+03 |
|      | Maksimum     | 2,45E+03 | 2,31E+03 | 2,30E+03        | 2,30E+03 | 2,41E+03 | 2,37E+03        | 3,59E+03 | 2,52E+03 | 3,18E+03 | 2,31E+03 | 3,64E+03 | 2,31E+03 |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |          | <,001           | 0,039    | <,001    | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | 0,03     | 0,026    | <,001    |
| 23   | P (Wilcoxon) | <,001    | <,001    |                 | <,001    | <,001    | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | Ort.         | 2,67E+03 | 2,62E+03 | <b>2,61E+03</b> | 2,63E+03 | 2,66E+03 | 2,66E+03        | 2,78E+03 | 2,63E+03 | 2,65E+03 | 2,62E+03 | 2,62E+03 | 2,63E+03 |
|      | Std. Sapma   | 3,19E+01 | 9,09E+00 | 5,03E+00        | 2,31E+01 | 8,26E+00 | 3,73E+01        | 4,19E+01 | 1,03E+01 | 2,72E+01 | 9,10E+00 | 7,81E+00 | 1,52E+01 |
|      | Medyan       | 2,66E+03 | 2,62E+03 | 2,61E+03        | 2,62E+03 | 2,66E+03 | 2,67E+03        | 2,79E+03 | 2,63E+03 | 2,65E+03 | 2,62E+03 | 2,62E+03 | 2,63E+03 |
|      | Maksimum     | 2,75E+03 | 2,65E+03 | 2,62E+03        | 2,71E+03 | 2,67E+03 | 2,68E+03        | 2,86E+03 | 2,65E+03 | 2,72E+03 | 2,65E+03 | 2,64E+03 | 2,66E+03 |
|      | P (Wilcoxon) | <,001    |          | 0,006           | 0,254    | <,001    | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | 0,12     | 0,045    | <,001    |
| 24   | P (Wilcoxon) | <,001    | 0,006    |                 | 0,001    | <,001    | <,001           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | Ort.         | 2,63E+03 | 2,76E+03 | <b>2,55E+03</b> | 2,74E+03 | 2,77E+03 | 2,57E+03        | 2,86E+03 | 2,76E+03 | 2,77E+03 | 2,73E+03 | 2,74E+03 | 2,69E+03 |
|      | Std. Sapma   | 1,50E+02 | 1,40E+01 | 1,00E+02        | 4,75E+01 | 4,85E+01 | 2,14E+01        | 4,92E+01 | 4,06E+01 | 5,28E+01 | 6,40E+01 | 4,59E+01 | 1,16E+02 |
|      | Medyan       | 2,52E+03 | 2,76E+03 | 2,50E+03        | 2,75E+03 | 2,79E+03 | 2,57E+03        | 2,85E+03 | 2,77E+03 | 2,78E+03 | 2,75E+03 | 2,75E+03 | 2,75E+03 |
|      | Maksimum     | 2,84E+03 | 2,79E+03 | 2,74E+03        | 2,78E+03 | 2,80E+03 | 2,62E+03        | 2,94E+03 | 2,79E+03 | 2,84E+03 | 2,77E+03 | 2,76E+03 | 2,79E+03 |
|      | P (Wilcoxon) | 0,001    |          | <,001           | 0,026    | <,001    | <,001           | <,001    | 0,6      | 0,011    | <,001    | <,001    | 0,012    |
| 25   | P (Wilcoxon) | 0,005    | <,001    |                 | <,001    | <,001    | 0,371           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | Ort.         | 3,05E+03 | 2,91E+03 | <b>2,89E+03</b> | 2,93E+03 | 2,96E+03 | 3,33E+03        | 3,76E+03 | 2,95E+03 | 2,96E+03 | 2,93E+03 | 2,92E+03 | 2,92E+03 |
|      | Std. Sapma   | 7,24E+01 | 1,81E+01 | 4,27E+01        | 2,34E+01 | 2,00E+01 | 1,80E+02        | 2,75E+02 | 3,17E+01 | 2,25E+01 | 2,22E+01 | 2,35E+01 | 6,46E+01 |

**Çizelge A.1 (devam) : 29 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

| Fon. | Ölçüm        | AOA      | MAOA            | MDAOA           | BPA      | SKA      | KOA      | HPSOKOA  | AÇO      | BOA      | KAO      | SSA             | AYAA     |
|------|--------------|----------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------|----------|
| 25   | Medyan       | 3,06E+03 | 2,90E+03        | 2,90E+03        | 2,94E+03 | 2,96E+03 | 3,32E+03 | 3,77E+03 | 2,94E+03 | 2,96E+03 | 2,94E+03 | 2,90E+03        | 2,94E+03 |
|      | Maksimum     | 3,20E+03 | 2,95E+03        | 2,90E+03        | 2,95E+03 | 3,01E+03 | 3,78E+03 | 4,23E+03 | 3,05E+03 | 3,03E+03 | 2,95E+03 | 2,95E+03        | 3,02E+03 |
|      | P (Wilcoxon) | <.001    |                 | <.001           | 0,009    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | 0,006    | 0,417           | 0,063    |
|      | P (Wilcoxon) | <.001    | <.001           |                 | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001           | <.001    |
| 26   | Ort.         | 3,21E+03 | 2,97E+03        | <b>2,82E+03</b> | 2,93E+03 | 3,07E+03 | 3,05E+03 | 4,23E+03 | 3,07E+03 | 3,51E+03 | 2,97E+03 | 2,95E+03        | 3,10E+03 |
|      | Std. Sapma   | 3,80E+02 | 2,10E+02        | 5,24E+01        | 1,07E+02 | 2,89E+01 | 9,34E+01 | 4,26E+02 | 1,21E+02 | 5,46E+02 | 2,93E+02 | 2,03E+02        | 1,67E+02 |
|      | Medyan       | 3,12E+03 | 2,94E+03        | 2,82E+03        | 2,95E+03 | 3,07E+03 | 3,03E+03 | 4,19E+03 | 3,02E+03 | 3,25E+03 | 2,90E+03 | 2,90E+03        | 3,11E+03 |
|      | Maksimum     | 4,20E+03 | 3,41E+03        | 2,90E+03        | 3,16E+03 | 3,14E+03 | 3,32E+03 | 4,86E+03 | 3,41E+03 | 4,60E+03 | 4,06E+03 | 4,01E+03        | 3,47E+03 |
| 27   | P (Wilcoxon) | 0,004    |                 | 0,001           | 0,371    | 0,022    | 0,057    | <.001    | 0,072    | <.001    | 0,478    | 0,339           | 0,024    |
|      | P (Wilcoxon) | <.001    | 0,001           |                 | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001           | <.001    |
|      | Ort.         | 3,19E+03 | <b>3,09E+03</b> | <b>3,09E+03</b> | 3,11E+03 | 3,10E+03 | 3,12E+03 | 3,37E+03 | 3,10E+03 | 3,13E+03 | 3,10E+03 | <b>3,09E+03</b> | 3,12E+03 |
|      | Std. Sapma   | 4,70E+01 | 8,57E+00        | 1,12E+00        | 3,39E+01 | 2,24E+00 | 1,88E+01 | 9,30E+01 | 1,77E+01 | 4,03E+01 | 1,53E+01 | 2,93E+00        | 2,32E+01 |
| 28   | Medyan       | 3,19E+03 | 3,09E+03        | 3,09E+03        | 3,10E+03 | 3,10E+03 | 3,11E+03 | 3,38E+03 | 3,10E+03 | 3,12E+03 | 3,10E+03 | 3,09E+03        | 3,10E+03 |
|      | Maksimum     | 3,31E+03 | 3,14E+03        | 3,09E+03        | 3,21E+03 | 3,11E+03 | 3,21E+03 | 3,57E+03 | 3,19E+03 | 3,26E+03 | 3,18E+03 | 3,10E+03        | 3,17E+03 |
|      | P (Wilcoxon) | <.001    |                 | <.001           | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | 0,734           | <.001    |
|      | P (Wilcoxon) | <.001    | <.001           |                 | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | 0,002           | <.001    |
| 29   | Ort.         | 3,62E+03 | 3,28E+03        | <b>3,19E+03</b> | 3,41E+03 | 3,29E+03 | 3,58E+03 | 3,94E+03 | 3,36E+03 | 3,37E+03 | 3,33E+03 | 3,18E+03        | 3,28E+03 |
|      | Std. Sapma   | 1,13E+02 | 1,75E+02        | 2,74E+01        | 1,78E+02 | 7,23E+01 | 2,69E+02 | 9,94E+01 | 1,13E+02 | 1,08E+02 | 1,33E+02 | 8,21E+01        | 1,17E+02 |
|      | Medyan       | 3,63E+03 | 3,20E+03        | 3,19E+03        | 3,41E+03 | 3,26E+03 | 3,62E+03 | 3,94E+03 | 3,41E+03 | 3,41E+03 | 3,41E+03 | 3,16E+03        | 3,25E+03 |
|      | Maksimum     | 3,75E+03 | 3,73E+03        | 3,22E+03        | 3,84E+03 | 3,44E+03 | 3,94E+03 | 4,12E+03 | 3,58E+03 | 3,73E+03 | 3,57E+03 | 3,41E+03        | 3,41E+03 |
| 29   | P (Wilcoxon) | <.001    |                 | 0,153           | 0,054    | 0,504    | <.001    | <.001    | 0,026    | 0,032    | 0,339    | 0,006           | 0,943    |
|      | P (Wilcoxon) | <.001    | 0,153           |                 | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | 0,054           | 0,001    |
|      | Ort.         | 3,25E+03 | 3,18E+03        | <b>3,16E+03</b> | 3,26E+03 | 3,24E+03 | 3,30E+03 | 3,49E+03 | 3,21E+03 | 3,34E+03 | 3,26E+03 | 3,19E+03        | 3,23E+03 |
|      | Std. Sapma   | 2,99E+01 | 4,77E+01        | 1,50E+01        | 7,16E+01 | 4,46E+01 | 3,64E+01 | 8,02E+01 | 5,99E+01 | 7,51E+01 | 7,37E+01 | 4,26E+01        | 6,08E+01 |
| 29   | Medyan       | 3,24E+03 | 3,17E+03        | 3,16E+03        | 3,26E+03 | 3,23E+03 | 3,30E+03 | 3,49E+03 | 3,19E+03 | 3,34E+03 | 3,24E+03 | 3,18E+03        | 3,23E+03 |
|      | Maksimum     | 3,33E+03 | 3,35E+03        | 3,20E+03        | 3,40E+03 | 3,38E+03 | 3,38E+03 | 3,67E+03 | 3,47E+03 | 3,54E+03 | 3,44E+03 | 3,32E+03        | 3,33E+03 |
|      | P (Wilcoxon) | <.001    |                 | 0,001           | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | 0,028    | <.001    | <.001    | 0,614           | 0,004    |
|      | P (Wilcoxon) | <.001    | 0,001           |                 | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001    | <.001           | <.001    |

**Çizelge A.1 (devam) : 29 CEC 2017 kıyaslama fonksiyonunun sayısal sonuçları.**

| Fon. | Ölçüm         | AOA      | MAOA     | MDAOA           | BPA      | SKA      | KOA      | HPSOKOA  | AÇO      | BOA      | KAO      | SSA      | AYAA     |
|------|---------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30   | Ort.          | 1,07E+06 | 4,94E+04 | <b>1,39E+04</b> | 2,49E+06 | 8,29E+05 | 2,69E+06 | 1,80E+06 | 7,48E+05 | 1,26E+06 | 1,13E+05 | 2,55E+05 | 1,77E+06 |
|      | Std. Sapma    | 2,49E+06 | 2,27E+05 | 1,06E+04        | 3,75E+06 | 4,88E+05 | 2,70E+06 | 1,47E+06 | 9,12E+05 | 1,39E+06 | 3,83E+05 | 5,29E+05 | 2,52E+06 |
|      | Medyan        | 2,40E+05 | 6,12E+03 | 9,69E+03        | 1,07E+06 | 6,86E+05 | 2,57E+06 | 1,50E+06 | 1,38E+05 | 6,93E+05 | 2,41E+04 | 2,84E+04 | 4,13E+05 |
|      | Maksimum      | 1,32E+07 | 1,25E+06 | 4,58E+04        | 1,84E+07 | 1,89E+06 | 1,40E+07 | 6,25E+06 | 2,99E+06 | 4,40E+06 | 2,11E+06 | 2,06E+06 | 8,11E+06 |
|      | P (Wilcoxon)  | <,001    |          | 0,024           | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | P (Wilcoxon)  | <,001    | 0,024    |                 | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    | <,001    |
|      | Friedman Rank | 7,12     | 3,32     | <b>1,35</b>     | 4,28     | 7,98     | 9,72     | 11,25    | 7,02     | 9,32     | 5,72     | 4,95     | 5,98     |

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad : Mustafa NURMUHAMMED**

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2004, Michigan Üniversitesi – Dearborn (University of Michigan – Dearborn), Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği
- **Yüksek Lisans:** 2015, İnönü Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Program
- **Doktora :** 2024, İnönü Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Program

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2020-Devam ediyor İnönü Üniversitesi Malatya OSB MYO’da Öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.
- 2019-2020 yılları arasında Malatya Turgut Özal Üniversitesi’nde Öğretim görevlisi olarak çalıştı.
- 2011-2019 yılları arasında İnönü Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı’nda Mühendis olarak çalıştı.
- 2009-2011 yılları arasında AES-IC İctaş Enerji Üretim ve Tic A.Ş.’de Sistem Mühendisi / Bilgi İşlem sorumlusu olarak çalıştı.
- 2006-2008 yılları arasında ICOMM Inc’de Ağ Mühendisi olarak çalıştı.
- 2006-2006 yılları arasında Computer Integrated Solutions Inc’de Ağ Yöneticisi olarak çalıştı.
- 2004-2006 yılları arasında Fusion Tek Inc’de Sistem Analiz Uzmanı olarak çalıştı.

### DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

#### Makaleler

- **Nurmuhammed, M., Akdağ, O. & Karadağ, T. (2023).** Modified Archimedes optimization algorithm for global optimization problems: a comparative study. Neural Comput & Applic (2024). <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09497-1>

- **Nurmuhammed, M., Akdağ, O., & Karadağ, T. (2023)** A novel modified Archimedes optimization algorithm for optimal placement of electric vehicle charging stations in distribution networks, Alexandria Engineering Journal, Volume 84, 2023, Pages 81-92, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.055>.
- **Nurmuhammed, M., Akdağ, O., & Karadağ, T. (2022).** A Novel Newton Raphson-Based Method for Integrating Electric Vehicle Charging Stations to Distribution Network. *Electrica*, 23(2), 310–317. <https://doi.org/10.5152/electrica.2022.22112>
- **Nurmuhammed, M., & Karadağ, T. (2021).** Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Konumlandırılması ve Enerji Şebekesi Üzerine Etkisi Konulu Derleme Çalışması. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering And Innovation*, 8(2), 30–45.

#### Bildiriler

- **Nurmuhammed, M., Akdağ, O., & Karadağ, T. (2021).** Modeling and Load Flow Analysis of Electric Vehicle Charging Stations in Power Distribution Systems. *The International Conference on Advanced Engineering, Technology and Applications (ICAETA-2021)*.

#### Projeler

- **İsmail Can DİKMEN, Teoman KARADAĞ, Serdar Ethem HAMAMCI, Teymuraz ABBASOV, Adıgüzel Mehmet YÜCEER, Yunus Emre EKİCİ, Mustafa NURMUHAMMED ve Dursun ÇİÇEK.** Elektrikli Araçlarda Yeni Nesil Batarya ve Güç Yönetim Sistemlerinin Modellenmesi Geliştirilmesi ve Bataryaların Geri Dönüşüm Süreçlerinin Analizi. İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi. Proje No: FOA-2018-1358
- **Mustafa NURMUHAMMED & Teoman KARADAĞ.** Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Elektromanyetik Uyumluluk Problemlerinin İncelenmesi, Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Optimum Yerleşiminin Sağlanması. İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi. Proje No: FDK-2023-3163

### **Diğer Çalışmalar**

- **Ekici, Y.E., Dikmen, İ.C., Nurmhammed M., & Karadag, T. (2021).** Efficiency Analysis of Various Batteries with Real-time Data on a Hybrid Electric Vehicle. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 214–223. <https://doi.org/10.30939/ijastech..946047>
- **Ekici, Y.E., Dikmen, İ.C., Nurmhammed M., & Karadag, T. (2021).** "A Review on Electric Vehicle Charging Systems and Current Status in Turkey", *International Journal of Automotive Science And Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 316-330, Dec. 2021, doi:10.30939/ijastech..958368
- **Kuzu, B., Nurmhammed, M., Akdag, O., & Karadag, T. (2022).** A Simulation Study on Vehicle-to-Grid Implementation and Environmental Impacts. 6th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP'22)