**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN ARIZA AKIM SINIRLAYICI OPTİMİZASYONU

**Fırat AKIN**

DOKTORA TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Temmuz, 2025

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN ARIZA AKIM SINIRLAYICI OPTİMİZASYONU

Fırat AKIN tarafından hazırlanan tez çalışması 24.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Oktay ARIKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Barış KÜÇÜKAYDIN, Üye
Kırklareli Üniversitesi _____

Doç. Dr. Altuğ BOZKURT Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Suat İLHAN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Oktay ARIKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Güç Sistemleri İçin Arıza Akım Sınırlayıcı Optimizasyonu” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Fırat AKIN

İmza

Bu çalışma, 125E050 nolu ve “Dağıtık Üretim Birimleri İçeren Güç Sistemleri İçin Arıza Akımı Sınırlayıcı Optimizasyonu” isimli proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

*Kıymetli Eşim*

*ve*

*Tüm Sevdiklerime*

# TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinde artan arıza akımlarının etkin kontrolü amacıyla, arıza akım sınırlayıcıların optimal yerleşimi ve boyutlandırılmasının yanı sıra, bu ekipmanların kritik bileşenlerine yönelik Sonlu Elemanlar Yöntemi tabanlı performans analizlerini kapsayan kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Lisans eğitimimden itibaren, mesleki ve kişisel gelişimimde, sayısız destek ve yönlendirmeleriyle, büyük etkisi olan değerli danışmanım Doç. Dr. Oktay ARIKAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez süreci boyunca sundukları önemli katkılardan dolayı, Tez İzleme Komitesi üyeleri, Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi Barış KÜÇÜKAYDIN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmalarım sırasında yorumları ve fikirleri ile desteklerini sunan Dr. Öğr. Üyesi Cihat Çağdaş UYDUR ve Arş. Gör. Hilmi Cihan GÜLDORUM'a teşekkür ederim.

Hayatımın başlangıç aşamasından itibaren Elektrik Mühendisliği ve Elektrik Tesisleri alanlarına ilgi duymamı sağlayan, en önemlisi de bu günlere gelmemde en büyük pay sahibi olan sevgili annem, Elektrik Mühendisi Filiz AKIN ve şu an aramızda olmayan, kıymetli babam, Elektrik Mühendisi Mehmet Kemal AKIN'a en derin teşekkürleri bir borç bilirim.

Diğer her şeyde olduğu gibi bu süreçte de desteğe, moral ve motivasyona ihtiyacım olduğunda her zaman yanımda olan Elektrik Müh. Murat AKIN ve Arş. Gör. Dr. Başak BÜLBÜL AKIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte, bana neşe kaynağı olan, moralimi yükselten ve zihnimi yenilememi sağlayan, değerli dostlarım; Alp BOZDAĞ, Ecem ERDEN BOZDAĞ, Levent MİRZA ve Göker KIRATLI'ya teşekkür ederim.

Son olarak, doktora sürecim boyunca herhangi bir zorluk yaşadığımda veya motivasyonumu kaybettiğimde, her zaman olduğu gibi, elimden tutan ve bana güç veren sevgili eşim, Cemre UYGUN AKIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Fırat AKIN

# İÇİNDEKİLER

**SİMGE LİSTESİ** **ix**
**KISALTMA LİSTESİ** **xiv**
**ŞEKİL LİSTESİ** **xv**
**TABLO LİSTESİ** **xviii**
**ÖZET** **xx**
**ABSTRACT** **xxii**
**1 GİRİŞ** **1**
1.1 Literatür Özeti ..... 3
1.1.1 Güç Sistemlerinde Arıza Akım Sınırlayıcılarının Optimal Konum, Boyut ve Sayılarının Belirlenmesine Yönelik Literatür Çalışmaları 3
1.1.2 KHAAS Bünyesinde Çalışan Hava Çekirdekli Reaktör İçin Optimal Tasarım Uygulamasına Yönelik Literatür Çalışmaları 7
1.2 Tezin Amacı ..... 10
1.3 Katkı ve Özgün Değer ..... 11
**2 ARIZA AKIM SINIRLAYICILAR** **15**
2.1 Arıza Akım Sınırlayıcıların Sınıflandırılması ..... 16
2.1.1 Geleneksel Yöntem ve Cihazlar 19
2.1.2 Modern Arıza Akım Sınırlayıcıları 23
**3 META-SEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE GÜÇ SİSTEMLERİNDE AAS OPTİMİZASYONU** **34**
3.1 Meta-Sezgisel Algoritmalar ..... 35
3.1.1 Meta-Sezgisel Algoritmaların Sınıflandırılması 35
3.1.2 Tez Çalışmasında Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları 39
3.2 Test Sistemleri ..... 48
3.2.1 IEEE 30 Baralı Test Sistemi 48
3.2.2 IEEE 118 Baralı Test Sistemi 49

3.3 Optimizasyon Uygulaması ..... 51
3.3.1 Matematiksel Altyapı 51
3.3.2 Optimizasyon Amaç Fonksiyonları ve Kısıtları 58
3.3.3 Optimizasyon Prosedürü 61
3.3.4 AAS Yerleşim ve Boyutlandırma Stratejisinin Uygulamalı Tanıtımı ve AAS Çeşitlerinin Ekonomik Karşılaştırılması 70
3.3.5 Senaryo Bazlı Optimizasyon Çalışmaları 75
3.3.6 Sonuçlar 78
3.3.7 Değerlendirme 96
**4 KHAAS BÜNYESİNDE ÇALIŞAN HAVA ÇEKİRDEKLİ REAKTÖR İÇİN OPTİMAL TASARIM UYGULAMASI VE PERFORMANS ANALİZİ 99**
4.1 Matematik Altyapısı ..... 99
4.1.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi 99
4.1.2 Temel Alan Denklemleri 103
4.2 SPRAAS Topolojisinin ve Test Sistemlerinin Tanıtılması ..... 106
4.3 Yüksek Gerilim Seviyesi İçin Hava Çekirdekli Reaktör Tasarım Parametrelerinin İncelenmesi ve Optimal Yapının Belirlenmesi ..... 109
4.3.1 HÇR Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi 112
4.4 Alçak Gerilim Prototipi ile SEY Modeli Doğrulaması ..... 124
4.4.1 Sonuçlar 124
4.5 Yüksek Gerilim Simülasyon Uygulaması ..... 127
4.6 Değerlendirme ..... 132
**5 SONUÇ 135**
**KAYNAKÇA 143**
**A MATLAB KODLARI 163**
A.1 Bölüm 3 – Ardışık DÜ ve AAS Optimizasyonunda Kullanılan Hassasiyet Analizi Matlab Kodu ..... 163
A.2 Bölüm 3 – Ardışık Optimizasyon Yaklaşımında AAS Yerleşimi ve AAS Maliyetinin Hesaplanması İçin Matlab Fonksiyonu ..... 165
A.3 Bölüm 3 – Ardışık Optimizasyon Yaklaşımında DÜ Yerleşimi ve Aktif Güç kaybı Hesabı İçin Matlab Fonksiyonu ..... 167

A.4 Bölüm 3 – Eş zamanlı (Çok Amaçlı) DÜ ve AAS Yerleşiminde Kullanılan Hassasiyet Fonksiyonu.....168
A.5 Bölüm 3 – Eş zamanlı (Çok Amaçlı) DÜ ve AAS Yerleşiminde Kullanılan AAS Maliyeti ve Aktif Güç Kaybı Hesap Fonksiyonu.....171
**TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR** **177**

# SİMGE LİSTESİ

| | |
|---|---|
| $Q_{yük,j}$ | j barasındaki toplam reaktif güç tüketimi |
| $x^a, x^b$ | Optimizasyon a ve b çözümleri |
| $\mathcal{L}_{aday}$ | AAS aday lokasyonlar kümesi |
| $C_{İB,AAS}$ | AAS birimlerinin işletme bakım maliyeti |
| $I_{fault,i}^{AAS}(Z_{AAS})$ | AAS devredeyken i numaralı baradaki arıza akımı değeri |
| $Z_{AAS}$ | AAS empedans değeridir |
| $Z_a$ | AAS empedansı |
| $y_{AAS}, y_p$ | AAS eşdeğer paralel admittansı |
| $Z_a$ | AAS eşdeğer paralel empedansı |
| EM | AAS kurulumu için empedans başına maliyet |
| SM | AAS kurulumu için sabit maliyet |
| $Y_0$ | Admittans matrisi |
| J | Akım yoğunluğu |
| μ | Akışkan dinamik vizkozitesi |
| u | Akışkan hızı |
| p | Akışkan sabit basıncı |
| ρ | Akışkan yoğunluğu |
| $P_k$ | Aktif güç kaybı |
| $\vec{X}_\alpha, \vec{X}_\beta, \vec{X}_\delta$ | Alfa, beta, gama kurtları |
| $U_0$ | Arıza öncesi bara gerilimi |
| $\vec{X}_p(t)$: | Avın (en iyi çözüm) pozisyonu |
| $\varepsilon_r$ | Bağıl dielektrik sabiti |
| $\theta_{jk}$ | Bara j ile bara k arasındaki admittansın faz açısı |
| $\mathcal{B}$ | Bara kümesi |
| $Z_{nn}$ | Bara self empedansı |

| | |
|---|---|
| $I_{fault,i}^{Baz}$ | Baz durum için i numaralı baradaki arıza akımı değeri |
| $\mathrm{H_{yıllık}}$ | Bir yıldaki toplam saat |
| $P_c$ | Çaprazlama oranı |
| $u(x)$ | Çözüm alanındaki bağımlı değişkenin bilinmeyen dağılımı |
| $N^{max}$ | Değişken sayısı için maksimum DÜ veya AAS sayısı |
| $I_{DK}^{Kapasite}$ | Devre kesicisi kesme kapasitesi |
| $\mathcal{B}_{DÜ}$ | DÜ bağlı bara kümesi |
| $P_{DÜ,i}^{min}, P_{DÜ,i}^{maks}$ | DÜ birimi izin verilen maksimum ve minimum aktif güç değerleri |
| $Q_{DÜ,i}^{min}, Q_{DÜ,i}^{maks}$ | DÜ birimi izin verilen maksimum ve minimum reaktif güç değerleri |
| $N_{DÜ}^{min}$, $N_{DÜ}^{maks}$ | DÜ birimi izin verilen maksimum ve minimum sayı |
| $\mathrm{C_{yat,\ DÜ}}$ | DÜ birimlerine ait ilk yatırım maliyeti |
| $\mathrm{C_{İB,DÜ}}$ | DÜ birimlerinin işletme bakım maliyeti |
| $\mathcal{N}_{DÜ}$ | DÜ kümesi |
| $\mathrm{P_{kayıp}^{opt}}$ | DÜ optimizasyonu sonrasında toplam aktif güç kaybı |
| $\mathrm{N_{yıl}}$ | Ekonomik ömür |
| $E$ | Elektrik alan |
| $\mathrm{C_{enerji}}$ | Elektrik enerjisi birim maliyeti |
| $D$ | Elektriksel deplasman |
| σ | Elektriksel iletkenlik |
| $Z_n$ | Empedans matrisi |
| $X$ | Genetik Algoritma kromozomu |
| $x_{ga,i}$ | Genetik Algoritma kromozomunu oluşturan genler |
| $\vec{A}, \vec{C}$: | GKO Katsayı vektörleri |
| $P_{Tüm\ Kaynaklar}^{maksimum}$ | Güç sistemindeki kaynaklar arasından maksimum güç değeri |
| $\mathrm{C_{AAS}}$ | Güç sistemine bağlanan AAS birimlerinin toplam ilk yatırım maliyeti |
| $\mathrm{P_{DÜ}}$ | Güç sistemine bağlanan DÜ birimlerinin toplam aktif gücü |
| $\mathrm{P_{kayıp}^{Baz}}$ | Güç sisteminin baz durumu için toplam aktif güç kaybı |
| $\vec{X}(t+1)$ | Güncellenmiş kurt pozisyonu |
| $V$ | Hacim |
| $\mathrm{J_e}$ | Harici akım yoğunluğu |

| | |
|---|---|
| $Z_{min}$, $Z_{max}$ | Hassasiyet analizi için minimum ve maksimum empedans değerleri |
| $\Delta Y_{AAS_{Hat}}$ | Hat başlarına bağlanan AAS'ler için kompanzasyon matrisi |
| $z_{12}$ | Hat empedansı |
| $\mathcal{L}_{hat}$ | Hat kümesi |
| $r_{dış}$ | HÇR dış yarıçap |
| $L_{HÇR}$ | HÇR endüktansı |
| $r_{iç}$ | HÇR iç yarıçap |
| $N_{sarım}$ | HÇR sarım sayısı |
| $l$ | HÇR yüksekliği |
| $\mathcal{B}_{hedeflenen}$ | Hedef baralar kümesi |
| $q$ | Isı akısı yoğunluğu |
| K | Isıl iletkenlik |
| $q_{ışınım}$ | Işıma ile ısı transferi |
| $C_i^{AAS}$ | i numaralı AAS optimizasyonu kısıtı |
| $Z_i$ | i numaralı AAS'nin empedans değeri |
| $L_{AAS}$ | i numaralı AAS'nin lokasyonu |
| $I_{arıza,i}$ | i numaralı baradaki arıza akımı |
| $N_{DÜ,i}$ | i numaralı baradaki DÜ sayısı |
| $P_{DÜ,i}$ | i numaralı DÜ biriminin aktif güç kapasitesi |
| $C_i^{DÜ}$ | i numaralı DÜ optimizasyonu kısıtı |
| $C_i^{GA}$ | i numaralı güç akışı kısıtı |
| $f_i$ ve $f_j$ | i ve j amaç fonksiyonları |
| $r_{ij}$ | i ve j baraları arasındaki hattın direnci |
| $P_i, P_j, Q_i, Q_j$ | i ve j numaralı baradaki aktif ve reaktif güç enjeksiyonları |
| $V_i\angle\delta_i, V_j\angle\delta_j$ | i ve j numaralı baradaki fazör gerilim değerleri |
| $P_{Kaynak,i}$ | i. kaynağın aktif gücü |
| $d_0$ | İlk iterasyondaki mutasyon aralığı |
| $P_{DÜ}^{maks}$ | İzin verilen maksimum DÜ aktif güç kapasitesi |
| $V_j^{min}, V_j^{maks}$ | j barası için izin verilen minimum ve maksimum gerilim değeri |
| $P_{yük,j}$ | j barasındaki toplam aktif güç tüketimi |
| $P_{üretim,j}$ | j barasındaki toplam aktif güç üretimi |

| | |
|---|---|
| $Q_{\text{üretim},j}$ | j barasındaki toplam reaktif güç üretimi |
| $\text{Hassasiyet}_j$ | j numaralı AAS aday lokasyonu için hesaplanan hassasiyet değeri |
| $Y_{jk}$ | j ve k baraları arasındaki admittans büyüklüğü |
| $V_j, V_k$ | j ve k baralarındaki gerilim büyüklüğü |
| $\delta_j, \delta_k$ | j ve k baralarının gerilim faz açıları |
| N | Karar değişkeni sayısı |
| $\Delta Y_{AAS_{Gen}}$ | Kaynak ucuna bağlanan AAS'ler için kompanzasyon matrisi |
| $\vec{D}$ | Kurtların ile av arası olan mesafe |
| $dF_L$ | Kuvvet yoğunluğu |
| $F_L$ | Lorentz kuvveti |
| T | Maksimum iterasyon sayısı |
| $\epsilon$ | Malzemelerin ışıma yayınım katsayısı |
| B | Manyetik akı yoğunluğu |
| H | Manyetik alan |
| $Q_{ml}$ | Manyetik kayıplar |
| t | Mevcut iterasyon sayısı |
| $\vec{X}(t)$ | Mevcut kurt pozisyonu |
| $Z_{AAS,i}^{min}, Z_{AAS,i}^{maks}$ | Minimum ve maksimum AAS empedansı |
| $N_{AAS}^{min}$, $N_{AAS}^{maks}$ | Minimum ve maksimum AAS sayısı |
| $x_i^{(L)}$ | Mutasyon alt sınırı |
| $P_m$ | Mutasyon olasılığı |
| $x_i^{(U)}$ | Mutasyon üst sınırı |
| $x_i^m$ | Mutasyona uğramış gen |
| Cp | Özgül ısı kapasitesi |
| $M$ | Popülasyon büyüklüğü |
| V | Potansiyel |
| $\omega$ | PSO atalet ağırlığı |
| $c_1, c_2$ | PSO bilişsel ve sosyal hızlanma katsayıları |
| $p_{best}$ | PSO parçacığının bireysel en iyi pozisyonu |
| $v_i^t$ | PSO parçacığının t. iterasyondaki hızı |

| | |
|---|---|
| $x_{pso,i}^{t}$ | PSO parçacığının t. iterasyondaki konumu |
| $r_1, r_2$ | PSO rastlantısal sayılar |
| $g_{best}$ | PSO sürüsünün global en iyi pozisyonu |
| $u_i^r(x)$ | r. eleman için yaklaşık çözüm |
| $K^r$ | r. elemana ait sertlik matrisi |
| $F^r$ | r. elemana ait yük vektörü (kaynak terimi) |
| $u^r$ | r. elemanın bilinmeyen düğüm noktası değeri |
| $Q_{rh}$ | Rezistif kayıplar |
| $\varphi_i$ | SEY düğüm noktası değerleri |
| $N_i$ | SEY şekil fonksiyonları |
| $\psi_j^r(x)$ | SEY şekil fonksiyonu |
| $\nabla T$ | Sıcaklık gradyanı |
| $\sigma_b$ | Stefan–Boltzmann sabiti |
| $X_i''$ | Subtransient reaktans |
| $E_n$ | Sütun birim matrisi |
| $M_{AF}$ | Toplam amaç fonksiyonu |
| $N_{bus}$ | Toplam bara sayısı |
| $\Pi_{toplam}$ | Toplam ekonomik kazanç – net kar |
| $Q_e$ | Toplam ısı kaynağı |
| $n_{var}$ | Toplam karar değişkeni sayısı |
| $\rho$ | Uzay yükü |
| $\varepsilon_0$ | Vakum ortamının dielektrik sabiti |
| A | Vektör potansiyeli |
| g | Yerçekimi ivmesi |
| $S_{Yıllık}$ | Yıllık gelir |
| $C_{İ\&B_{Yıllık}}$ | Yıllık işletme bakım giderleri |
| $\Pi_{yıllık}$ | Yıllık kar |

# KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---|---|
| AAS | Arıza Akım Sınırlayıcı |
| ÇAGA | Çok Amaçlı Genetik Algoritma |
| ÇAGKO | Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyonu |
| ÇAPSO | Çok Amaçlı Parçacık Sürüsü Optimizasyonu |
| DEÇ | Domine Edilemeyen Çözüm |
| DK | Devre Kesicisi |
| DÜ | Dağıtık Üretim |
| EA | Evrimsel Algoritmalar |
| EKAA | Elitist Kütleçekimsel Arama Algoritması |
| GA | Genetik Algoritma |
| GGKO | Geliştirilmiş Gri Kurt Optimizasyonu |
| GKO | Gri Kurt Optimizasyonu |
| HÇR | Hava Çekirdekli Reaktör |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| KHAAS | Katı-hal Arıza Akım Sınırlayıcı |
| MAAS | Manyetik Arıza Akım Sınırlayıcı |
| MMK | Manyeto Motor Kuvvet |
| PSO | Parçacık Sürüsü Optimizasyonu |
| R-AAS | Rezistif Arıza Akım Sınırlayıcı |
| SAAS | Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılar |
| SEY | Sonlu Elemanlar Yöntemi |
| SPRAAS | Seri-Paralel Rezonans Arıza Akım Sınırlayıcı |
| X-AAS | Endüktif Arıza Akım Sınırlayıcı |

# ŞEKİL LİSTESİ

**Şekil 1.1** Elektrik enerjisi üretimi ve kurulu gücün yıllara göre değişimi (a) Dünya (b) Türkiye (1982-2023) ..... 1

**Şekil 2.1** İdeal AAS Çalışma Prensibi ve Arıza Akımlarının Değişimi ..... 15

**Şekil 2.2** AAS Yöntem ve Cihazlarının Sınıflandırılması ..... 18

**Şekil 2.3** Kesiciler İçin Ardışık Açma Örneği ..... 21

**Şekil 2.4** SAAS Sınıflandırması ..... 23

**Şekil 2.5** Seri Anahtarlamalı KHAAS Devre Yapısı ..... 29

**Şekil 2.6** DC Ön Gerilim Kaynaklı Köprü Tipi KHAAS Yapısı ..... 31

**Şekil 2.7** Rezonans Tipi KHAAS (a) Seri Rezonans (b) Paralel Rezonans ..... 31

**Şekil 2.8** Manyetik AAS'lerin Temel Yapısı (a) Normal İşletme (b) Arıza Durumu ..... 32

**Şekil 3.1** Meta-Sezgisel Algoritmaların Sınıflandırılması ve Yaygın Olarak Kullanılan Algoritmalar ..... 36

**Şekil 3.2** Farklı Çaprazlama Yaklaşımları (a) Tek Noktalı Çaprazlama (b) İki Noktalı Çaprazlama (c) Düzgün Çaprazlama ..... 43

**Şekil 3.3** IEEE 30 Baralı Test Sistemi ..... 49

**Şekil 3.4** IEEE 118 Baralı Test Sistemi ..... 50

**Şekil 3.5** AAS Bağlantı Şekilleri (a) Hat Başına (b) Kaynak Ucuna Bağlı ..... 52

**Şekil 3.6** AAS Hat Bağlantısı (a) Seri (b) Paralel Eşdeğeri (c) Paralel Admittans Eşdeğeri ..... 52

**Şekil 3.7** Çok Amaçlı Optimizasyon Çalışmalarında Takip Edilen Prosedür ..... 65

**Şekil 3.8** Pareto Cephesi Örnekleri (a) 12 Çözüm ve 4 Pareto Cephesinden Oluşan Örnek Çözüm Kümesi (b) Analizlerde Kullanılan Çözümlere Ait Örnek Gösterim ..... 66

**Şekil 3.9** Karar Değişkeni Yapısı (a) Tek Amaçlı Optimizasyon (b) Çok Amaçlı Optimizasyon ..... 69

**Şekil 3.10** X-AAS Öncesi ve Sonrası Bara Arıza Akımları ..... 72

**Şekil 3.11** Senaryo 1'de IEEE 30 Baralı Sisteme Ait Arıza Akımları (GKO) ..... 80

**Şekil 3.12** IEEE 30 Baralı Test Sisteminde GKO, PSO VE GA Algoritmalarının Yakınsama Performansı (a) DÜ (b) AAS ..... 81

**Şekil 3.13** IEEE 30-Baralı Test Sistemi için 2. Senaryoda Elde Edilen Pareto-Optimal Çözümler (a) Bireysel Algoritmalar (b) Final DEÇ ..... 82

**Şekil 3.14** IEEE 30-Baralı Test Sistemi için 2. Senaryoda Minimum Güç Kaybı Çalışma Noktasına ait Arıza Akımları ..... 84

**Şekil 3.15** IEEE 30-Baralı Test Sistemi için 3. Senaryoya Ait Domine Edilemeyen Çözümler (a) Bireysel algoritma sonuçları (b) Final DEÇ Kümesi .... 85

**Şekil 3.16** IEEE 30-Baralı Test Sistemi için 3. Senaryoda ÇAGKO Algoritması ile Elde Edilen En Karlı Senaryoya Ait Arıza Akımları Değişimi ..... 86

**Şekil 3.17** IEEE 118 Baralı Test Sisteminde Senaryo 1 Sırasında Arıza Akımlarının Değişimi – GA Sonuçları (a) Bara 1-59 (b) 60-118 ..... 89

**Şekil 3.18** IEEE 118 Baralı Test Sisteminde GKO, PSO VE GA Algoritmalarının Yakınsama Performansı (a) DÜ (b) AAS ..... 89

**Şekil 3.19** IEEE 118-Baralı Test Sistemi için 2. Senaryoda Elde Edilen Pareto-Optimal Çözümler (a) Bireysel Algoritmalar (b) Final DEÇ ..... 90

**Şekil 3.20** IEEE 118-Baralı Test Sistemi için 3. Senaryoya Ait Domine Edilemeyen Çözümler (a) Bireysel algoritma sonuçları (b) Final DEÇ Kümesi .... 94

**Şekil 3.21** IEEE 118 Baralı Test Sisteminde Senaryo 3 Sırasında Arıza Akımlarının Değişimi (a) Bara 1-59 (b) 60-118 ..... 95

**Şekil 3.22** Uygulanan Optimizasyon Senaryoları için 25 yıllık Ekonomik Ömür Boyunca Net Kar Karşılaştırması: (a) IEEE 30-Baralı Test Sistemi (b) IEEE 118-Baralı Test Sistemi ..... 98

**Şekil 4.1** SEY İçin Örnek Eleman ve Düğüm Yapıları ..... 101

**Şekil 4.2** SPRAAS (a) Topoloji (b) SEY Entegrasyonu ..... 106

**Şekil 4.3** İki Baralı Test Sistemi (a) Bağlantı Şeması (b) Alçak Gerilim Prototipi ..... 108

**Şekil 4.4** Örnek 2B Eksenel Simetrik Simülasyon Görüntüsü ..... 110

**Şekil 4.5** HÇR Genel Yapısı ..... 111

**Şekil 4.6** Hava Çekirdekli Reaktör İçin Çok Fizikli Simülasyon Yaklaşımı ..... 112

**Şekil 4.7** HÇR Tasarım Parametreleri ..... 112

**Şekil 4.8** Metre Cinsinden Mylar Kalınlığı ve Epoksi Sargı Muhafazası Dış Kalınlığı ..... 113

**Şekil 4.9** İletken Yarıçaplarına Göre HÇR Sıcaklık Dağılımı (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm ..... 114

**Şekil 4.10** İletken Yarıçaplarına Göre Manyetik Akı Yoğunluğu Dağılımı (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm ..... 115

**Şekil 4.11** İletken Yarıçaplarına Göre Elektrik Alan Dağılımı (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm ..... 116

**Şekil 4.12** Farklı İletken Yarıçaplarının HÇR Performansına Etkisi (a) Maksimum Sıcaklık (b) Maksimum Manyetik Akı Yoğunluğu (c) Maksimum Elektrik Alan ..... 116

**Şekil 4.13** Farklı Katman Sayısına Sahip Hava Çekirdekli Reaktör Tasarımlarının 2B Geometrik Gösterimleri (a) 2 Katmanlı (b) 3 Katmanlı (c) 4 Katmanlı ..... 118

**Şekil 4.14** Katman Sayılarına Göre Sıcaklık Dağılımları (a) 2 Katman (b) 3 Katman (c) 4 Katman ..... 118

**Şekil 4.15** Katman Sayılarına Göre Maksimum Sıcaklık Değişimi ..... 119

**Şekil 4.16** Katman Sayılarına Göre Manyetik Akı Yoğunluğu Dağılımları (a) 2 Katmanlı (b) 3 Katmanlı (c) 4 Katmanlı ..... 119

**Şekil 4.17** Katman Sayılarına Göre Elektrik Alan Dağılımları (a) 2 Katmanlı (b) 3 Katmanlı (c) 4 Katmanlı ..... 120

**Şekil 4.18** Farklı Katman Sayılarının HÇR Performansına Etkisi (a) Maksimum Sıcaklık (b) Maksimum Manyetik Akı (c) Maksimum Elektrik Alan Değişimi ..... 120

**Şekil 4.19** Hava Kanalı Mesafelerine Göre Sıcaklık Dağılımları (a) 0,5 cm (b) 1 cm (c) 1,5 cm ..... 121

**Şekil 4.20** Hava Kanalı Boşluklarına Göre Elektrik Alan Dağılımları (a) 0,5 cm (b) 1 cm (c) 1,5 cm ..... 122

**Şekil 4.21** Farklı Hava Kanalı Mesafelerinin HÇR Performansına Etkisi (a) Maksimum Sıcaklık (b) Maksimum Elektrik Alan ..... 123

**Şekil 4.22** HÇR Döner Geometrisi ..... 123

**Şekil 4.23** AAS Olmayan Durumda Alçak Gerilim Prototipi Akım Değerleri (a) Normal Durum (b) Arıza Durumu ..... 125

**Şekil 4.24** Faz-Toprak Arızası Sırasında Akım Değişimleri (a) Hat akımı (b) $L_{sp}$ / HÇR Akımı ..... 126

**Şekil 4.25** Yüksek Gerilim Test Sistemine Ait Hat Akımı (a) SPRAAS Yok (b) SPRAAS Var ..... 128

**Şekil 4.26** Yüksek Gerilim Uygulamasında HÇR'ye Ait Akım Değişimi ..... 129

**Şekil 4.27** HÇR'nin Manyetik Akı Yoğunluğu Dağılımı (a) normal çalışma sırasında (b) faz-toprak arızası sırasında ..... 130

**Şekil 4.28** HÇR Elektrik Alan Dağılımı (a) Normal Çalışma (b) Şebeke Arızası ..... 130

**Şekil 4.29** Normal Çalışma Koşullarında HÇR'nin Termal Analizi (a) Zamana Bağlı Sıcaklık Değişimi (b) Kararlı Hal için Sıcaklık Dağılımı ..... 131

**Şekil 4.30** Normal Çalışma ve Şebeke Arızası Durumu İçin HÇR Merkezinin Sıcaklık Değerleri (a) Karşılaştırma Grafiği (b) Veri Çizgisi ..... 132

# TABLO LİSTESİ

**Tablo 2.1** SAAS Yapılarının Avantaj ve Dezavantajları ..... 26

**Tablo 3.1** PSO Ayar Parametreleri ..... 70

**Tablo 3.2** X-AAS Yerleşimi İçin Hassasiyet Analizi Sonuçları ..... 71

**Tablo 3.3** AAS Maliyet Değerleri ..... 71

**Tablo 3.4** Kurulan AAS'ler ve Literatürdeki Çalışmalar ile Maliyet Karşılaştırması ..... 71

**Tablo 3.5** Bara Arıza Akımlarının X-AAS Yerleşimi Öncesi ve Sonrası Karşılaştırması ..... 72

**Tablo 3.6** R-AAS Yerleşimi İçin Hassasiyet Analizi Sonuçları ..... 73

**Tablo 3.7** Kurulan AAS'lerin Konum ve Empedans Bilgileri ..... 73

**Tablo 3.8** X-AAS ve R-AAS için Hassasiyet Analizi Sonuçları ..... 74

**Tablo 3.9** Kurulan X-AAS ve R-AAS'lere Ait Konum, Empedans ve Maliyet Değerleri ..... 74

**Tablo 3.10** Bara Arıza Akımlarının X-AAS ve R-AAS Yerleşimi Öncesi ve Sonrası Karşılaştırması ..... 75

**Tablo 3.11** Optimizasyon Senaryoları ..... 78

**Tablo 3.12** Ekonomik Parametreler ..... 78

**Tablo 3.13** IEEE 30 Baralı Test Sistemine Senaryo 1'de Yerleştirilen AAS'ler ..... 80

**Tablo 3.14** 1. Senaryoda IEEE 30-Baralı Test Sistemine Ait Teknik ve Ekonomik Parametreleri ..... 81

**Tablo 3.15** IEEE 30 Baralı Sistemde Senaryo 2 İçin Algoritmalara Ait Pareto Cephesi Uç ve Denge Noktaları ..... 82

**Tablo 3.16** IEEE 30-Baralı Sistem için 2. Senaryoda Elde Edilen Çözümler ..... 83

**Tablo 3.17** IEEE 30-Baralı Test Sistemi İçin 3. Senaryoda Algoritmalara Göre En Karlı Senaryolara Ait Teknik ve Ekonomik Parametreler ..... 85

**Tablo 3.18** 1. Senaryo İçin IEEE 118 Baralı Test Sistemine Yerleştirilen DÜ Birimleri ..... 87

**Tablo 3.19** 1. Senaryoda IEEE 118-Baralı Sisteme Yerleştirilen AAS'ler ..... 88

**Tablo 3.20** 1. Senaryoda IEEE 118-Baralı Test Sistemine Çözümlerin Teknik ve Ekonomik Parametreleri ..... 88

**Tablo 3.21** IEEE 118 Baralı Sistemde Senaryo 2 İçin Algoritmalara Ait Pareto Cephesi Uç ve Denge Noktaları ..... 90

**Tablo 3.22** IEEE 118-Baralı Sistem için 2. Senaryoda Elde Çözümler ..... 92
**Tablo 3.23** IEEE 118-Baralı Test Sistemi İçin 3. Senaryoda Algoritmalara Göre En Karlı Senaryolara Ait Teknik ve Ekonomik Parametreler ..... 94
**Tablo 3.24** Uygulanan Senaryolar İçin 25 Yıllık Net Kar Karşılaştırması ..... 98
**Tablo 4.1** SEY Kavramları ..... 102
**Tablo 4.2** SPRAAS Parametreleri ..... 107
**Tablo 4.3** Kullanılan Test Sistemlerine Ait Devre Parametreleri ..... 108
**Tablo 4.4** Farklı Katman Sayılarına Sahip HÇR'lere Ait Parametreler ..... 117
**Tablo 4.5** Optimal HÇR Parametreleri ..... 123
**Tablo 4.6** Alçak Gerilim Uygulamasına Ait Akım Sonuçları ..... 127

# ÖZET

## GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN ARIZA AKIM SINIRLAYICI OPTİMİZASYONU

Fırat AKIN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Bu tez çalışması kapsamında, modern güç sistemlerinde artan arıza akımlarının, güç sistemlerinde optimal arıza akım sınırlayıcı yerleşimi ve boyutlandırmasıyla etkin biçimde sınırlandırılması ile arıza akım sınırlayıcı kritik bileşenlerinin maruz kaldığı fiziksel etkilerin detaylı biçimde analiz edilmesine yönelik kapsamlı bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmanın ilk aşamasında, bara arıza akımı seviyelerinin devre kesici sınırlarının altına indirilmesi amacıyla, arıza akım sınırlayıcıların sayısı, konumu ve empedans değerlerini optimize eden, farklı meta-sezgisel arama algoritmalarının entegre edilebildiği bir çatı algoritma geliştirilmiştir. Algoritmaya entegre edilen hassasiyet analizi ile aday lokasyon arama uzayı daraltılmış, çözüm verimliliği artırılmıştır. Sunulan yöntem IEEE 30 ve 118 Baralı test sistemlerinde uygulanmış, literatürdeki benzer çalışmalara kıyasla daha düşük maliyet ve yüksek etkinlik ile hedeflenen akım düzeylerine ulaşılmıştır. Sonrasında, dağıtık üretim birimlerinin arıza akımları üzerindeki olumsuz etkisini dikkate almak amacıyla, güç sistemlerindeki DÜ birimlerinin optimal yerleşim ve boyutlandırmasını hedefleyen bir çatı algoritma geliştirilmiştir. Oluşturulan çatı algoritmalar ile DÜ ve AAS optimizasyonu tek amaçlı optimizasyon çerçevesinde ardışık şekilde ve çok amaçlı optimizasyon çerçevesinde eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. DÜ ve AAS

optimizasyonu sırasında, aktif güç kaybı, AAS yatırım maliyeti ve uzun vadeli ekonomik parametreleri dikkate alan alternatif senaryolar oluşturulmuştur. Uygulanan tüm senaryolarda, aktif güç kayıpları büyük oranda azaltılmış olup, arıza akımları AAS optimizasyonu ile kontrol altında tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar senaryo bazlı değerlendirildiğinde, sistemlerinin teknik performans çıktıları ile birlikte ekonomik parametreleri de kapsayacak şekilde planlanmasının gerekliliğini göstermiştir. Optimizasyon çalışması sırasında, çatı algoritmalara; Genetik Algoritma, Gri Kurt Optimizasyonu ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu algoritmalarının tek amaçlı ve çok amaçlı entegre edilmiştir. Bu sayede, literatürde sıkça kullanılan meta-sezgisel arama algoritmalarının karşılaştırmalı performans analizleri gerçekleştirilebilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, etkinliği kanıtlanmış bir katı-hal arıza akım sınırlayıcı topolojisinde kritik bir bileşen olan endüktans elemanı hava çekirdekli reaktör olarak simülasyon ortamında modellenmiştir. Hava çekirdekli reaktörün arıza akım sınırlayıcı dahilindeki performansının dinamik analizi için sonlu elemanlar yöntemi tabanlı çok-fizikli simülasyon altyapısı geliştirilmiştir. Öncelikle, hava çekirdekli reaktörün tasarım parametreleri, kullanılan yüksek gerilim test sistemine göre optimize edilmiştir. Elde edilen yapı üzerinde, test sisteminin normal çalışması ve şebeke arızası durumları için, elektriksel ve ısıl analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ışığında, geleneksel bir güç sistemi ekipmanı olan hava çekirdekli reaktörlerin modern arıza akım sınırlayıcı topolojilerindeki kullanım potansiyeli ortaya konmuştur.

Gerçekleştirilen tez çalışması ile dağıtık üretim ve arıza akım sınırlayıcı birimlerinin koordineli optimizasyonunu dikkate alan güç sistemi planlaması ve AAS kritik bileşenlerinin SEY tabanlı analizlerine yönelik yenilikçi yaklaşımlar sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Arıza akım sınırlayıcı, optimizasyon, sonlu elemanlar yöntemi, meta-sezgisel algoritmalar, hava çekirdekli reaktör, aktif güç kaybı, dağıtık üretim

# ABSTRACT


## Fault Current Limiter Optimization for Power Systems

Fırat AKIN

Department of Electrical Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Oktay ARIKAN

In this thesis, a comprehensive study has been conducted on the effective limitation of increasing fault currents in modern power systems through optimal placement and sizing of fault current limiters, as well as on the detailed analysis of the physical effects experienced by critical components of fault current limiters. In the first phase of the study, a framework algorithm that optimizes the number, location, and impedance values of fault current limiters, which is capable of integrating various metaheuristic search algorithms, was developed to reduce bus fault current levels below circuit breaker ratings. By incorporating sensitivity analysis into the algorithm, the candidate location search space was narrowed, thus enhancing solution efficiency. The proposed method was implemented on IEEE 30- and 118-bus test systems, and it achieved target fault current levels at lower costs and higher effectiveness compared to similar studies in literature.

Subsequently, to address the adverse effects of distributed generation units on fault currents, a framework algorithm targeting the optimal placement and sizing of DG units in power systems was developed. With these framework algorithms, the optimization of DG and FCL units was performed both sequentially within the scope of single-objective optimization and simultaneously within multi-objective optimization. During distributed generation and fault current limiter optimization, alternative scenarios were created considering active power loss, fault current

limiter investment cost, and long-term economic parameters. In all scenarios, active power losses were significantly reduced, and fault currents were kept under control through fault current limiter optimization. Scenario-based evaluations of the results demonstrated the necessity of planning power systems by considering both technical performance outputs and economic parameters. Throughout the optimization process, Genetic Algorithm, Grey Wolf Optimizer, and Particle Swarm Optimization, both single- and multi-objective versions, were integrated into the framework algorithms, enabling comparative performance analyses of commonly used metaheuristic search algorithms in the literature.

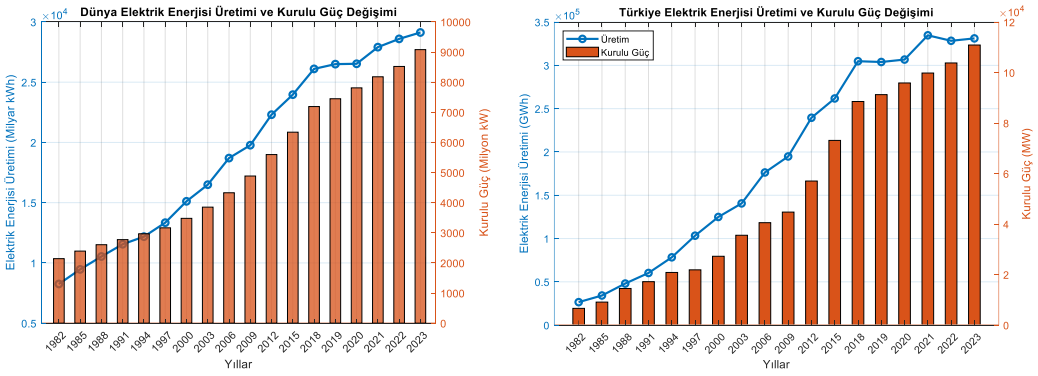
In the second phase of the thesis, the performance of the inductive element, a critical component in a proven solid-state FCL topology, was modeled as an air-core reactor in a simulation environment. For the dynamic performance analysis of the air-core reactor within the fault current limiter, a finite element method-based multi-physics simulation infrastructure was developed. Firstly, the design parameters of the air-core reactor were optimized according to the employed high-voltage test system. On the optimized structure, electrical and thermal analyses were conducted for both normal operation and fault conditions of the test system. Based on these analyses, the potential use of air-core reactors, which are conventional power system equipment, within modern fault current limiter topologies was demonstrated.

Through the thesis, innovative approaches have been proposed for power system planning that considers the coordinated optimization of distributed generation and fault current limiter units, as well as for finite element method-based analysis of the critical components of fault current limiters.

**Keywords:** Fault current limiters, optimization, finite-element method, meta-heuristic algorithms, air core reactor, active power loss, distributed generation

# 1
# GİRİŞ

Dünya üzerindeki teknolojik gelişmeler ve nüfus artışı, elektrik enerjisine olan talebin zaman içerisinde artışına sebep olmaktadır. Bu talebin karşılanması için yeni üretim santralleri ve dağıtık üretim tesislerinin devreye alınması neticesinde enterkonnekte sistem genişlemektedir. Bu durum, güç sistemlerinde üretilen güçleri ve kısa devre güçlerini arttırmaktadır. Bunun sonucunda, arıza akımı seviyeleri yükselmektedir. Yükselen arıza akımı seviyeleri, öncelikle devre kesicilerin (DK) kısa devre kesme kapasitelerinin aşılmasına neden olmakla birlikte, koruma elemanları, transformatörler ve iletkenler gibi diğer sistem ekipmanlarının da termik ve dinamik zorlanmalara maruz kalmasına yol açmaktadır. Kapasitesi aşılan DK elemanlarının arıza anında açma-kapama yapamaması nedeniyle, enerji sistemlerinin sürekliliği ve güvenilirliği azalmakta, aynı zamanda hasar gören güç sistemi ekipmanları ve enerji kesintileri nedeniyle kesintiye uğrayan endüstriyel süreçler ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Şekil 1.1'de Türkiye ve Dünya'nın elektrik enerjisi üretimi ve kurulu gücünün yıllara göre değişimi sunulmuştur [1,2].




(a) (b)

**Şekil 1.1** Elektrik enerjisi üretimi ve kurulu gücün yıllara göre değişimi (a) Dünya (b) Türkiye (1982-2023) [1,2]

Türkiye'de kullanılan şalt teçhizatı için farklı gerilim seviyelerindeki arıza akımı dayanma seviyeleri, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından yayınlanan Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nde 400 kV için 63 kA, 154 kV için 31,5 kA ve 33 kV için ise 16 kA olarak belirlenmiştir. Ayrıca, orta gerilimden sadece üretim tesislerinin bağlı olduğu 400/33 kV merkezlerde 33 kV gerilim seviyesinde kısa devre arıza akımı 25 kA ile sınırlandırılmaktadır [3]. Belirtilen seviyelerdeki arıza akımı değerlerinin aşıldığının belirlenmesi durumunda, arıza akımı miktarları sınırlandırılmalı veya güç sistemi ekipmanları yeni arıza akımı seviyesi değerlerine uygun olacak şekilde değiştirilmelidir. Değiştirilmesi gereken ya da hasar gören güç sistem ekipmanları, yüksek maliyetlere ve uzun süreli enerji kesintilerine neden olmaktadır. Bu nedenle, arıza akımı sınırlama yöntemlerinin ve cihazlarının farklı yönleriyle araştırılması, geliştirilmesi ve sahada kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinde arıza akımlarının sınırlandırılmasına yönelik ilk aşama olarak, arıza akım sınırlayıcı (AAS) konum, boyut ve sayılarının belirlenmesini sağlayan bir optimizasyon çatı algoritması geliştirilmiştir. Takip eden aşamada ise, arıza akımı seviyelerini artıran başlıca etkenlerden biri olan DÜ birimlerinin sistem entegrasyonu dikkate alınarak algoritma genişletilmiş olup AAS ve DÜ yerleşimlerinin eş zamanlı şekilde çok amaçlı olarak optimize edilebildiği çatı bir algoritma yapısı oluşturulmuştur. Geliştirilen bu yapı, farklı meta-sezgisel arama algoritmalarıyla entegre çalışabilecek esneklikte tasarlanmış ve amaç fonksiyonlarına bağlı olarak çeşitli optimizasyon stratejilerinin uygulanabilmesine olanak tanımıştır. Bu bütüncül yaklaşım, arıza akımlarını minimum maliyetle güvenli seviyelerde tutarken aktif güç kayıplarını minimize etmek amacıyla geliştirilmiş olup, farklı büyüklükteki test sistemlerine uygulanabilecek şekilde esnek ve ölçeklenebilir bir yapıya sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Geliştirilen yapı farklı teknik ve ekonomik amaç fonksiyonlarından oluşan optimizasyon senaryolarında kullanılmış ve etkinliği ortaya konmuştur.

Tezin diğer aşamasında, etkinliği kanıtlanmış olan KHAAS topolojisinin kritik bir bileşeni olan endüktif eleman için, ısıl, elektriksel ve hava akış analizlerine imkan

tanıyan SEY tabanlı çok-fizikli simülasyon altyapısı oluşturulmuştur. Geliştirilen bu altyapı ile, kullanılan yüksek gerilimli test sistemine uygun optimal hava çekirdekli reaktör (HÇR) yapısı belirlenmiş olup; elektrik alan dağılımı, manyetik alan yoğunluğu, elektromanyetik kuvvetler ve sıcaklık profilleri gibi parametreler hem normal işletme hem de şebeke arızası koşullarında detaylı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, SEY modeli ile devre düzeyindeki hesaplamalar arasında doğrulama sağlamak amacıyla, alçak gerilim düzeyinde hazırlanan fiziksel bir SPRAAS prototipi üzerinden deneysel testler gerçekleştirilmiş ve model doğruluğu teyit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile HÇR yapılarının modern AAS topolojileri içerisindeki kullanım potansiyelleri ve karşılaştığı stres mekanizmaları ortaya konmuştur.

## 1.1 Literatür Özeti

Bu bölümde, tez konusuyla ilişkili olarak literatürde yer alan mevcut çalışmalar incelenmiş ve sunulmuştur.

### 1.1.1 Güç Sistemlerinde Arıza Akım Sınırlayıcılarının Optimal Konum, Boyut ve Sayılarının Belirlenmesine Yönelik Literatür Çalışmaları

Literatürde AAS'lerin optimal boyutlandırılması ve yerleşimine yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda temel olarak; arıza akımlarının devre kesicisi (DK) sınır değerlerinin altına indirilmesi, AAS maliyetlerinin minimizasyonu, koruma koordinasyonunun sağlanması ve güç sistemlerinin güvenilirlik indekslerinin iyileştirilmesi gibi hususlar ele alınmaktadır. Özellikle dağıtık üretim birimlerinin (DÜ) güç sistemlerindeki arıza akımları üzerindeki etkisi önemli bir şekilde dikkate alınmıştır. Söz konusu çalışmalar; orijinal test sistemleri ve DÜ eklenerek modifiye edilmiş test sistemleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Orijinal test sistemleri üzerinde yapılan çalışmalarda, genellikle devre kesici (DK) sınır değeri tanımlanmış ve mevcut bara arıza akımlarının bu eşik değerin altına, en düşük AAS maliyetiyle indirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaca ulaşmak için çeşitli stratejiler önerilmiştir. Yu vd. tarafından yapılan çalışmada [4], ring şebekelerde AAS'lerin konum ve boyutlarının optimizasyonu için yinelemeli karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama yöntem tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Temel

amaç, bara arıza akımlarının DK sınır değerinin altına indirilirken AAS'lerin toplam kurulum maliyetini en aza indirilmesidir. [5] numaralı çalışmada, iletim hattı anahtarlamalarını da göz önünde bulunduran, arıza akımı kısıtlı karma tam sayılı doğrusal programlama tabanlı bir planlama modeli geliştirilmiş ve bu modelle AAS yerleşimi ve boyutu optimize edilmiştir. AAS yerleşimi yalnızca aday iletim hatları ile sınırlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, AAS ile iletim hattı anahtarlamasının birlikte uygulanması durumunda, yalnızca AAS kullanımına kıyasla AAS yatırım maliyeti %50 oranında azaltılabilmiştir. Ancak, toplam sistem maliyetindeki azalma, iletim hattı açma işlemlerinin ek maliyetleri nedeniyle %11,4 ile sınırlı kalmıştır. [6] numaralı çalışmada, farklı yük profilleri altında sabit sayıda AAS'in konumu ve boyutu, bulanık karar mekanizması içeren kaotik grup tabanlı ÇAPSO algoritmasıyla optimize edilmiştir. Empedans değerleri önceden belirlenmiş olan AAS'lerin yerleşimi ve boyutlandırılması üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada, GA kullanılarak çok amaçlı bir optimizasyon önerilmiştir. Çalışma, bir yandan AAS maliyetlerini minimize etmeyi amaçlarken, diğer yandan, kısa devre akımlarının şiddetine bağlı oluşturulan DK kayıp fonksiyonunu minimize etmeyi hedeflemiştir [7]. Yang vd. çalışmasında [8], AAS yerleşimi için iki aşamalı bir optimizasyon süreci önerilmiştir: ilk aşamada Hiyerarşik Bulanık Mantık Kararı ve Hashing entegrasyonlu genetik algoritma kullanılırken, ikinci aşamada AAS parametre ayarlamaları için PSO algoritması kullanılmıştır. Razzaghi ve Niayesh'in çalışmasında [9], üç adet DÜ biriminin bağlı olduğu IEEE-13 test sistemi üzerinde, arıza akımları ve olası güç kayıpları dikkate alınarak akım sınırlayıcı reaktörlerin yerleşimi gerçekleştirilmiştir. [10] numaralı çalışmada ise, AAS ekipmanlarının neden olduğu güç kayıpları, yerleşim ve boyutlandırma sürecinde göz önünde bulundurulmuştur. [11]'de, AAS'lerin güç kayıplarına etkisinin yanı sıra, şebeke güvenilirlik indekslerine olan etkisi de değerlendirilmiştir. [12,13] numaralı çalışmalarda, AAS optimizasyonu sürecinde AAS maliyeti, arıza akımı azaltımı ve şebeke kararlılığı amaç fonksiyonları bir arada ele alınmıştır. IEEE 39 Baralı test sisteminde AAS uygulanmadan önce 32,277 p.u. olan maksimum kısa devre akımı, AAS'lerin yerleştirilmesiyle 14,489 p.u. değerine kadar düşürülmüştür. Benzer şekilde, IEEE 57 Baralı test sisteminde maksimum kısa devre akımı 3,2048 p.u. değerinden 1,405 p.u. değerine indirilmiştir [12]. IEEE RTS 24 baralı test sisteminde ise AAS öncesi 9 p.u. olan maksimum arıza akımı, AAS sonrası 1,479 p.u değerine indirilmiştir [13].

Literatürde, AAS yerleşimi için aday konumları azaltmaya yönelik çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar, hesaplama süresini azaltmayı ve AAS yerleşimi açısından etkisiz olan konumları eleyerek global optimuma daha etkili şekilde ulaşmayı amaçlamaktadır. Teng ve Lu'nun çalışmalarında [14,15], IEEE 30 baralı test sistemi için AAS optimizasyonu yapılmış ve AAS yerleşimi için arama alanını daraltmak için geliştirilen hassasiyet analizi sunulmuştur. Ngoc ve Singh [16], bara eksiltme ve hassasiyet analizi tabanlı bir yöntem kullanarak, geliştirilmiş bir GA yöntemiyle AAS yerleşim ve boyutlandırma süresini, farklı güç sistemler için, 1-2 saatten yaklaşık 40-60 saniyelik süre aralıklarına düşürmüştür. [17]'de ise, endüktif ve rezistif AAS'ler için uygun hatları belirlemek adına hassasiyet analizi ile Rulet Yöntemi birleştirilmiştir. [18] numaralı çalışmada ise, AAS'lerin yerleşim yeri ve sayısını belirlemek için olasılık matrisi kullanılmış; ardından gerekli empedans değerleri Geliştirilmiş Gri Kurt Optimizasyonu (GGKO) ile tespit edilmiştir. Sonuçlara göre, modifiye edilmiş IEEE 30 Baralı test sisteminin 1, 2 ve 9 numaralı hatlarına sırasıyla, 0,546, 0,267, 0,147 p.u. empedanslarına sahip AAS'ler yerleştirilmiş olup sistemde görülen maksimum 20 p.u. değerindeki arıza akımı 2 p.u değerinin altına indirilmiştir. [19] numaralı çalışmada ise, olasılık matrisi yöntemi Elitist Kütleçekimsel Arama Algoritması (EKAA) ile birleştirilerek AAS'lerin yerleşimi ve boyutlandırması gerçekleştirilmiştir.

Diğer yandan, DÜ birimlerinin dahili ile modifiye edilen test sistemleri üzerinde yapılan çalışmalarda, DÜ'lerin arıza akımlarına ve diğer güç sistemi parametrelerine etkisine odaklanılmış ve DÜ'lerin arıza akımları üstündeki olumsuz etkileri AAS optimizasyonu ile giderilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar, genel olarak, DÜ birimlerinin varsayımsal olarak eklendiği veya DÜ optimizasyonunun da göz önünde bulundurulduğu çalışmalar olarak ikiye ayrılmaktadır. [20–25] numaralı çalışmalarda, DÜ birimleri optimizasyondan bağımsız olarak sisteme dahil edilmiş ve sadece AAS optimizasyonu yapılmıştır. Esmaili vd. çalışmasında [20], IEEE 30 ve DÜ içeren IEEE 31 sistemleri için AAS optimizasyonu gerçekleştirilmiş, AAS yerleşimi generatör baraları ile sınırlandırılmıştır. [21] çalışmasında, konvansiyonel santraller ve rüzgar santrallerini içeren bir sistemde, rezistif süperiletkenli AAS'lerin konumları ve sayısı optimize edilmiştir. [22] ve [25] numaralı çalışmalarda, AAS'lerin toplam maliyeti ve sistem genelindeki arıza akımlarının azaltım miktarı eşzamanlı olarak

çok amaçlı optimizasyon algoritmaları ile optimize edilmiştir. Chen vd. [22] tarafından IEEE 33-baralı sistemde yalnızca 2 adet R-AAS yerleştirilerek kritik baralardaki kısa devre akımları 17 kA sınırının altına indirilmiş, maliyet ise 2,52 p.u. olarak belirlenmiştir. Baichao Chen vd. [25] çalışmasında ise IEEE 39-baralı sistemde 0,0196 p.u. empedanslı tek AAS ile tüm kritik baralardaki arıza akımı 70 p.u. sınırının altına indirilmiştir. Her iki çalışmada da AAS sayısı ve yerleşimi maliyet/etkinlik dengesine göre birlikte optimize edilmiştir. Shu ve ark. tarafından yapılan çalışmada [23], modifiye edilmiş IEEE 33 ve 30 sistemlerinde geliştirilmiş BAT algoritmasıyla AAS yerleşimi, boyutlandırması ve sayısı optimize edilmiştir. Aday lokasyonlar hatlarla sınırlandırılmış ve uzun dönemli ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Huchel ve ekibinin çalışmasında [24], sabit sayıda ve sabit konumda DÜ içeren senaryolarda, AAS'lerin yerleşimi ve boyutlandırması, çalışma içerisinde tanımlanan koruma koordinasyonu indeksini artırmak amacıyla optimize edilmiştir. [26]'da, DÜ birimleri içeren 17 baralı bir test sistemi için süperiletken arıza akımı sınırlayıcılarının optimal yerleşiminin belirlenmesine yönelik senaryo bazlı bir optimizasyon yöntemi sunulmuştur. [27] ve [28]'de güç sistemlerine entegre edilen DÜ birimlerinin etkisiyle bozulan röle koordinasyonu, AAS optimizasyonu aracılığıyla yeniden sağlanmıştır.

Literatürdeki DÜ optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda temel olarak; hat kayıplarının en aza indirilmesi [29,30], gerilim profillerinin iyileştirilmesi [29,30], yatırım ve işletme maliyetlerinin azaltılması [31,32], karbon emisyonlarının düşürülmesi [32,33] ile güç kalitesi ve sistem güvenilirliğinin artırılması [34,35] gibi unsurlar dikkate alınmaktadır. Literatürdeki bazı çalışmalar, DÜ optimizasyonu ile eş zamanlı olarak AAS optimizasyonunu da ele almıştır. Hamidi ve Chabanloo'nun çalışmasında [36], NSGA-II algoritması ile hem AAS optimizasyonu hem de DÜ konum ve boyutlandırma optimizasyonu eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Aday AAS yerleşimleri, DÜ ile seri bağlantılı olacak şekilde sınırlandırılmıştır. El-Ela ve ekibinin çalışmasında [37], DÜ birimleri, sistem kayıplarını en aza indirmek amacıyla güç sistemine entegre edilmiştir. Buna ek olarak, arıza akımlarının kontrolünü sağlamak için optimal AAS yerleşimi ve boyutlandırması yapılmıştır. DÜ ve AAS birimleri, önerilen algoritma kullanılarak hem iki aşamalı ardışık bir süreçle hem de eş zamanlı olarak optimize edilmiştir. Son olarak, bu iki yaklaşımın sonuçları karşılaştırılmıştır. Eş zamanlı

optimizasyonda arıza akımı seviyesi iki aşamalı yönteme göre %16,56 oranında daha düşük elde edilmiş ve gerekli AAS empedansı %66,15 azaltılmıştır. [38]'da, arıza akımları ve geçici rejim kararlılığı kısıtları dikkate alınarak AAS'lerin yerleşimi ve boyutlandırılmasını içeren karma tamsayılı doğrusal programlama tabanlı bir üretim genişleme planlaması çalışması gerçekleştirilmiştir. [39]'da ise, ardışık bir optimizasyon yaklaşımı ile önce DÜ yerleşimi optimize edilmiş, ardından generatörlere seri bağlanan AAS'lerin boyutlandırması yapılmıştır. [40]'de ETAP ortamında DÜ ve AAS'ler eş zamanlı olarak optimize edilmiştir. Farahani ve diğerlerinin [41] çalışmasında, sayıları önceden tanımlanmış olan DÜ ve AAS birimleri için optimal konum ve boyutlandırma yapılmış, koruma koordinasyonu iyileştirilmiştir. AAS'lerin yalnızca DÜ'lere seri bağlanmasına izin verilmiştir.

### 1.1.2 KHAAS Bünyesinde Çalışan Hava Çekirdekli Reaktör İçin Optimal Tasarım Uygulamasına Yönelik Literatür Çalışmaları

Gelişmekte olan elektrik güç sistemlerinde; güç kalitesinin iyileştirilmesi, sistem güvenilirliğinin ve sürekliliğinin artırılması ile arıza akımlarının etkilerinin sınırlandırılması amacıyla yeni ekipman ve tasarımlar önerilmektedir. Bu süreçte, geleneksel güç sistemi bileşenleri özgün işlevlerini yerine getirmenin yanı sıra yeni geliştirilen güç sistemi topolojilerine entegre edilerek kullanılmaktadır [42,43]. Bu ekipmanlardan biri olan HÇR'ler, güç akışı kontrolü, harmonik filtreleme, nötr topraklama ve arıza akımlarını sınırlama gibi çeşitli amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır [44,45]. HÇR ekipmanlarının; basit kurulum, düşük bakım maliyeti, güvenilir yapı ve düşük kütle gibi farklı temel avantajları geniş kullanım alanlarında tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır [46–48]. Bir diğer önemli özellikleri ise demir çekirdekli reaktörlerin aksine doygunluğa ulaşmamalarıdır [49]. Son yıllarda, güç sistemlerindeki artan arıza akımlarını azaltmak için birçok yeni AAS topolojisi ortaya çıkmıştır [50]. Özellikle endüktif AAS'ler üzerine kapsamlı çalışmalar mevcuttur. Bu cihazlar, doymamış çekirdekli AAS'ler, kuplajlı doymuş çekirdekli AAS'ler, kuplajsız doymuş çekirdekli AAS'ler ve kalıcı mıknatıslı AAS'ler gibi farklı türlere ayrılmakta olup, her biri arıza akımlarını sınırlama ve güç sistemi kararlılığına katkı sağlama açısından kendine özgü bir çalışma mekanizmasına sahiptir [51]. Özellikle hava çekirdekli veya demir çekirdekli reaktörler gibi, farklı AAS türlerinde yer alan bileşenlerin tasarımı ve

performans analizleri, yüksek gerilim uygulamalarında ekipman güvenilirliği ve verimliliği için kritik öneme sahiptir.

Akım sınırlayıcı reaktörler, arıza akımlarını sınırlamak amacıyla seri bağlı ve bağımsız bir bileşen olarak güç sistemlerinde uzun yıllardır yaygın şekilde kullanılmaktadır [52]. Ancak, modern bir arıza akımı sınırlayıcının güç sistemlerinde verimlilik ve kararlılığı etkilememesi adına normal çalışma koşullarında düşük empedans, minimum gerilim düşümü ve düşük güç tüketimi göstermesi beklenmektedir [53,54]. Geleneksel HÇR'ler ile ilişkilendirilen gerilim düşümü ve reaktif güç tüketimi gibi problemler, kontrol yöntemlerinin uygulanması ve HÇR içeren yeni topolojilerin tasarımıyla giderilmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle, modern AAS topolojilerinde HÇR kullanımına yönelik deneysel ve simülasyon çalışmaları artış göstermiştir.

Karşıt yönde akım taşıyan eş merkezli iki HÇR'den oluşan AAS sistemlerine odaklanan çeşitli çalışmalar mevcuttur [55–58]. Bu sistemler, HÇR'lerin arıza anındaki döner veya düşey hareketlerine bağlı olarak değişen dinamik endüktans değerlerine sahiptir. Normal çalışma koşullarında, reaktörler hizalı konumda olduğundan dolayı karşılıklı endüktans maksimumdur. Ancak, bir arıza durumunda içteki HÇR'nin hareketi tetiklenmekte, bu da toplam endüktansın ve dolayısıyla empedansın artmasına neden olarak arıza akımlarını sınırlandırmaktadır. Örneğin, Amini vd. çalışmasında [55], normal işletmede AAS'nin endüktansı 0,28 mH seviyesindeyken, arıza anında bu değer reaktörlerin hareketiyle 1,38 mH'ye kadar yükselmektedir. Bu değişim yalnızca 13 ms içinde, yani bir periyottan kısa sürede gerçekleşmektedir. Empedanstaki bu artış sayesinde arıza akımının tepe değeri 35 kA'dan 28.5 kA'ya (%18,5 azalma) düşürülmüştür. Gouda vd. çalışmasında [59], bir gerilim transformatörü ve HÇR içeren modern bir arıza akımı sınırlayıcısının tasarımı sunulmuş ve etkinliği kanıtlanmıştır. Moyzykh ve ekibinin çalışmasında [60], süperiletkenli AAS ile paralel bağlı HÇR'den oluşan arıza akım sınırlayıcı topolojisinin performans analizi yürütülmüştür. Yuan ve ekibinin çalışmalarında [61–63], doymuş çekirdekli AAS yapılarının arıza akımı sınırlandırma performansını arttırmak için ek bir eleman olarak HÇR kullanılmıştır. Motamedinejad ve arkadaşlarının çalışmasında [64], AC/DC reaktör tabanlı bir KHAAS tasarlanmıştır. Yapı, az sayıda anahtarlama elemanıyla maliyet ve karmaşıklığı azaltırken, reaktör aracılığıyla etkin arıza akımı sınırlama sağlamıştır.

Analizler, alçak gerilim prototipinde ve simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Bitencourt ve ekibinin çalışmalarında [65,66], HÇR içeren KHAAS prototipleri tasarlanmış ve alçak gerilim seviyesinde uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, arıza akımının tepe değerinin 600 A'den 75 A değerine düşürüldüğü görülmektedir.

Görüldüğü üzere, HÇR içeren AAS topolojilerine ait prototip çalışmaları mevcut olsa da, AAS bünyesindeki HÇR'lerin elektrik ve manyetik alan analizleri ile ısıl performansları, yüksek gerilim uygulamaları açısından yeterince ele alınmamış ve analiz edilmemiştir. Ancak, farklı güç sistemi uygulamaları için yüksek gerilimli HÇR'lerin tasarımı ve kullanımı; ısıl, manyetik alan, titreşim, gürültü ve aşırı gerilim karakteristikleri açısından çeşitli yöntemlerle araştırılmıştır [67–71]. D. Han ve arkadaşlarının çalışmasında [72], HÇR'nin normal işletme ve sargının farklı noktalarında meydana gelen kısa devre arızaları sırasında gösterdiği manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan dağılımındaki değişim incelenmiştir. [73] numaralı çalışmada ise, statik var kompansatör sistemindeki HÇR'nin oluşturduğu yüksek manyetik alan, Bulanık Kapsamlı Değerlendirme Yöntemiyle azaltılmış; bu süreç, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak gerçekleştirilen manyetik akı yoğunluğu hesaplamalarıyla değerlendirilmiştir. Bir diğer çalışmada [74], dönüştürücü transformatör merkezinde tam yük altında çalışan düzeltme HÇR'sinin manyetik alan dağılımı analiz edilmiş ve simülasyonlar küçük ölçekli deneylerle doğrulanmıştır. Y. Sun ve ekibinin çalışmasında [75] ise, kuru tip HÇR'de sargı içi kısa devre arızaları nedeniyle oluşan manyetik alan şiddetleri, Basitleştirilmiş Ölçekleme Modeli ve En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Diğer yandan, [76] numaralı çalışmada, yağmur koruması bulunan ve bulunmayan senaryolar için hava çekirdekli reaktörün sıcaklık dağılımları, havalandırma kanalı geometrilerinin etkisi dikkate alınarak Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz edilmiştir. [77]'da, kuru tip hava çekirdekli reaktörün sargılarında ses yalıtımının sıcaklık artışına etkisi, COMSOL Multiphysics® yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlarla ortaya konmuştur. [78]'de, pasif harmonik filtreleme sisteminin ana bileşeni olan hava çekirdekli reaktör, termal-manyetik SEY tabanlı bir ortamda modellenmiş ve sargıların sıcaklık artışı incelenmiştir. J. Wu ve ekibinin çalışmasında [79], hava çekirdekli reaktör içerisindeki sıcaklık dağılımı araştırılmış

ve sonuçlar deneylerle doğrulanmıştır. Sonuçlara göre, her bir sargıdaki iletkenlerin sıcaklık farklarının ihmal edilebilir düzeyde olduğu ortaya konmuştur.

## 1.2 Tezin Amacı

Günümüzde enerji talebinin hızla artmasıyla birlikte, güç sistemlerinde daha fazla üretim kaynağı devreye alınmakta ve sistem topolojileri giderek karmaşıklaşmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının ve dağıtık üretim (DÜ) birimlerinin entegrasyonu, sistem esnekliğini artırmakla birlikte kısa devre seviyelerinde de önemli artışlara yol açmaktadır. Bu durum, mevcut devre kesici ekipmanlarının kesme kapasitelerinin aşılmasına neden olmakla birlikte sistem güvenliğini tehdit etmektedir.

Güç sistemlerinde kısa devre akımlarının sınırlandırılması ve sistem güvenliğinin artırılması doğrultusunda, AAS ekipmanlarının şebeke üzerindeki kullanım parametrelerinin (konum, boyut, sayı) optimize edilmesinin yanı sıra yapısal bileşenlerinin de optimum performans sağlayacak şekilde tasarlanması büyük önem taşımaktadır.

Buradan hareketle, tez çalışmasının 3. Bölümü olan "Meta-Sezgisel Algoritmalar ile Güç Sistemlerinde AAS Optimizasyonu" bölümünde, AAS birimlerinin değişken güç sistemi topolojilerine uygun şekilde yerleştirilmesi ve boyutlandırılması için esnek yapıda çalışabilen bir optimizasyon çatı algoritmasının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, farklı meta-sezgisel arama algoritmalarının modüler biçimde entegre edilebildiği, DÜ ve AAS optimizasyonu çerçevesinde hem ardışık hem de eş zamanlı çalışabilen çatı algoritma yapıları geliştirilmiştir. Çalışmanın neticesinde geliştirilen yapının, yalnızca teknik performansı değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliği de dikkate alan çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı sunması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, farklı senaryolar altında, sistemdeki aktif güç kaybı, AAS yatırım maliyeti ve 25 yıllık net kar gibi performans kriterleri, çok amaçlı optimizasyon çerçevesinde değerlendirilmiştir. Böylece, sistem güvenliği, sürekliliği ve uzun vadeli ekonomik verimlilik açısından en uygun çözüm kümelerinin elde edilmesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda, çatı algoritma yapısına entegre edilen farklı meta-sezgisel arama algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması, her bir algoritmanın çözüm

kalitesi ve yakınsama hızı gibi kriterler açısından değerlendirilmesini sağlayarak, farklı sistem koşullarında en etkili çözüm yönteminin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Diğer yandan, AAS topolojileri bünyesindeki ekipmanlar, operasyonları sırasında yüksek miktarda akıma maruz kalmakta, ısınmakta ve üzerlerinde gerilim düşümleri meydana gelmektedir. Bu durum, ekipmanın maruz kaldığı manyetik alan, elektrik alan ve sıcaklığı arttıracağından, kritik bileşenler için ilgili elektromanyetik ve ısıl analizlerin yapılması önem arz etmektedir. Buradan hareketle, Tezin 4. Bölümü olan "KHAAS Bünyesinde Çalışan Hava Çekirdekli Reaktör İçin Optimal Tasarım Uygulaması ve Performans Analizi" başlığı altında, etkinliği kanıtlanmış olan bir katı-hal arıza akım sınırlayıcı yapısının kritik elemanı olan endüktans bileşeni, hava çekirdekli reaktör (HÇR) olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Sonrasında, farklı HÇR tasarımları altında elektriksel ve ısıl analizler gerçekleştirilerek optimal bir reaktör tasarımı elde edilmiştir. Elde edilen HÇR tasarımı kullanılarak, AAS topolojisinin normal durum ve arıza anındaki çalışmasının simülasyonu ısıl ve elektriksel analizler ile yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma ile güç sistemi için geleneksel bir ekipman olan HÇR yapısının, modern AAS sistemlerindeki kullanılabilirliğine yönelik performans analizlerinin yapılması hedeflenmiştir.

## 1.3 Katkı ve Özgün Değer

Günümüz güç sistemlerindeki kısa devre güçleri, güç tüketiminin yükselişine bağlı olarak artan üretim kapasitesi ve sistem karmaşıklığına bağlı olarak yıllar içinde belirgin bir şekilde artış göstermektedir. Bu durum, arıza akımı seviyelerinin etkin ve ekonomik biçimde sınırlandırılmasını gerekli kılmakta olup, bu doğrultuda yapılan optimizasyon temelli çalışmaların önemini artırmaktadır. Bu bağlamda, gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında, güç sistemlerinde kısa devre akımlarının kontrol altına alınması ve sistem güvenliğinin artırılması amacıyla, optimizasyon tabanlı yerleşim ve boyutlandırma stratejileriyle birlikte ekipman düzeyinde detaylı performans analizlerini içeren bütüncül bir yaklaşım ortaya konulması hedeflenmiştir. Tez çalışması, bu doğrultuda iki temel eksen üzerinde aşağıdaki özgün katkıları sunmaktadır:

1. **Meta-Sezgisel Algoritmalar ile Güç Sistemlerinde AAAS Optimizasyonu:**

- Literatürde AAS'lerin hat başlarına bağlandığı durumda AAS'nin şebekeye etkisini yansıtmak için kullanılan formülasyon, bu çalışmada AAS'lerin kaynak uçlarına bağlanması durumunu da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Bu sayede, AAS yerleşimi açısından daha yüksek esneklik ve lokasyon çeşitliliği sağlanmıştır.
- AAS optimizasyonuna özel olarak geliştirilen optimizasyon tabanlı çatı algoritma ile güç sistemlerinde arıza akımlarının, devre kesici güvenlik limitleri altında tutulmasını sağlayan etkin bir yaklaşım ortaya konmuştur.
- Literatürdeki pek çok çalışmada, AAS sayısı sabit tutularak yalnızca konum ve boyutlar farklı AAS sayısı içeren senaryolar dahilinde belirlenmektedir. Tez kapsamında önerilen değişken yapısı sayesinde AAS toplam sayısı minimum maliyeti sağlayacak şekilde dinamik olarak algoritma tarafından belirlenmektedir.
- DÜ ve AAS yerleşimlerinin birlikte ele alındığı ve hem ardışık hem de eş zamanlı olarak çalışabilen modüler çatı algoritma yapıları geliştirilmiştir. Bu yapılar, farklı meta-sezgisel arama algoritmalarının (GA, PSO, GKO) esnek biçimde entegre edilmesini mümkün kılarak karşılaştırmalı analiz imkanları ve geniş uygulama alanları sağlamaktadır.
- AAS yerleşimine yönelik arama uzayını daraltmak amacıyla, her iterasyonda güncel DÜ konumlarına göre dinamik olarak güncellenen bir hassasiyet analiz yöntemi önerilmiştir. Böylece, arama etkinliği artırılarak hesaplama yükü azaltılmıştır.
- Geliştirilen çok amaçlı optimizasyon çerçevesi sayesinde, aktif güç kaybı, AAS yatırım maliyeti ve 25 yıllık net kar gibi teknik ve ekonomik kriterler çok amaçlı optimizasyon kapsamında dengeli biçimde değerlendirilmesine olanak sağlanmış ve Pareto-optimal çözüm kümeleri elde edilmiştir.
- AAS ve DÜ birimlerinin konum, boyut ve sayılarının eş zamanlı olarak optimize edilmesiyle, güç sisteminin hem güvenliği hem de verimliliği artırılmıştır. Literatürde çoğunlukla ayrı ayrı optimize edilen bu iki unsur, bu tezde bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

- Çatı algoritmalara entegre edilen farklı meta-sezgisel algoritmaların çözüm kalitesi ve yakınsama hızı açısından performansları karşılaştırılmıştır. Bu sayede, farklı sistem koşulları altında en etkili algoritmanın seçilmesine olanak sağlanmıştır.

2. **KHAAS Bünyesinde Çalışan Hava Çekirdekli Reaktör İçin Optimal Tasarım Uygulaması**:

Literatürde, katı-hal AAS topolojileri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar genellikle arıza akımı sınırlama performansına odaklanmaktadır. Ancak, bu topolojilerde yer alan kritik bileşenlerin SEY temelli detaylı performans analizleri üzerinde yeterince durulmamıştır. AAS topolojilerindeki kritik bileşenlerin elektrik alan, manyetik alan ve termal analizlerin eş zamanlı şekilde gerçekleştirilmesi, güvenilir tasarım ve bileşen verimliliğinin sağlanması açısından oldukça önemlidir. Ayrıca, bu analizler AAS sistemlerinin çevresel etkilerinin anlaşılması açısından da kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, gerçekleştirilen çalışmanın sunduğu temel katkılar şu şekilde özetlenebilir:

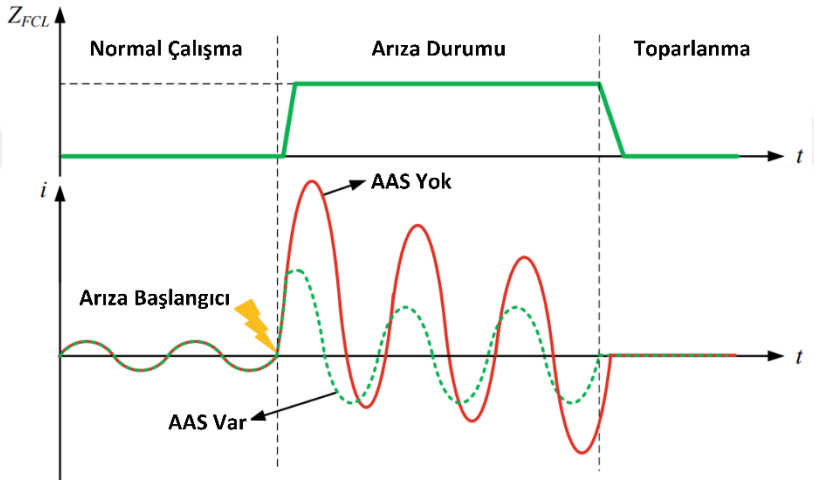
- Çalışmalar sırasında, katı-hal arıza akımı sınırlayıcı topolojisinde yer alan hava çekirdekli reaktörün (HÇR) performansını gerçekçi şekilde değerlendirebilmek amacıyla, elektriksel, ısıl ve hava akış fizikleri eş zamanlı olarak modellenmiş olup çok-fizikli bir SEY tabanlı simülasyon altyapısı geliştirilmiştir.
- HÇR tasarımına yönelik olarak; katman sayısı, iletken kesiti ve hava kanalı genişliği gibi farklı yapısal parametreler dikkate alınmış, kullanılan test sistemi özelinde optimum bir reaktör tasarımı elde edilmiştir.
- Modern AAS topolojisine entegre edilen konvansiyonel bir güç sistemi bileşeni olan HÇR'nin performans analizi, dinamik bir test sistemi ortamında gerçekleştirilmiş ve söz konusu bileşenin bu tür yapılardaki uygulanabilirliği incelenmiştir.
- Kullanılan AAS topolojisinde, hat akımı sürekli olarak HÇR üzerinden geçtiği ve arıza anında yüksek akımlara maruz kaldığı için, HÇR sürekli devrede olan bir bileşen olarak değerlendirilmiştir. Buradan hareketle, AAS topolojisinin güvenli çalışmasını temin etmek amacıyla normal çalışma ile şebeke arızası durumları için termal ve elektriksel analizler yürütülmüştür.

- Simülasyon sonuçları doğrultusunda, HÇR'nin sürekli çalışma ve arıza senaryoları altında maruz kaldığı elektrik alan, manyetik alan, manyetik kuvvetler ve sıcaklık dağılımları değerlendirilmiştir. Böylece, söz konusu bileşenin katı-hal AAS sistemlerindeki performansı ve karşılaşabileceği stresler ortaya konmuştur.

Yukarıda sunulan katkılar doğrultusunda, bu tez çalışması hem sistem düzeyinde AAS optimizasyonuna yönelik özgün algoritmik çözümler sunmakta, hem de kritik bileşen düzeyinde detaylı performans analizlerini içermektedir. Önerilen optimizasyon algoritmaları ile AAS ve DÜ birimlerinin optimizasyonlarını, eş zamanlı ve istenilen amaç fonksiyonlarına göre ele alabilen bir yaklaşım sunulmuştur. Diğer yandan, geliştirilen çok-fizikli modelleme altyapısı sayesinde, HÇR'nin modern AAS topolojilerindeki uygulanabilirliği kapsamlı bir biçimde değerlendirilmiş; güvenli, verimli ve uzun ömürlü tasarım kriterlerine katkı sağlanmıştır. Böylece, güç sistemlerinde kısa devre akımlarının kontrolü ve sistem güvenliğinin artırılmasına yönelik hem algoritmik hem de donanımsal bir yaklaşım sunulmuştur.

# 2
# ARIZA AKIM SINIRLAYICILAR

Dünya üzerindeki güç sistemlerinde arıza akımı sınırlandırma ihtiyacı uzun süredir mevcut olmakla birlikte, gelişen enerji altyapıları ve artan elektrik talebi nedeniyle her geçen yıl daha da önemli hale gelmektedir. Bu ihtiyaca yanıt olarak, çeşitli arıza akımı sınırlandırma yöntemleri ve ekipmanları uzun yıllardır elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde kullanılmaktadır [80,81]. Günümüzde modern AAS ekipmanları Şekil 2.1'de gösterilen ideal AAS davranışına uygun olarak geliştirilmektedir.




**Şekil 2.1** İdeal AAS Çalışma Prensibi ve Arıza Akımlarının Değişimi [81]

Buna göre, ideal bir AAS'den beklenen özellikler genel olarak aşağıda sıralanmıştır [81]:

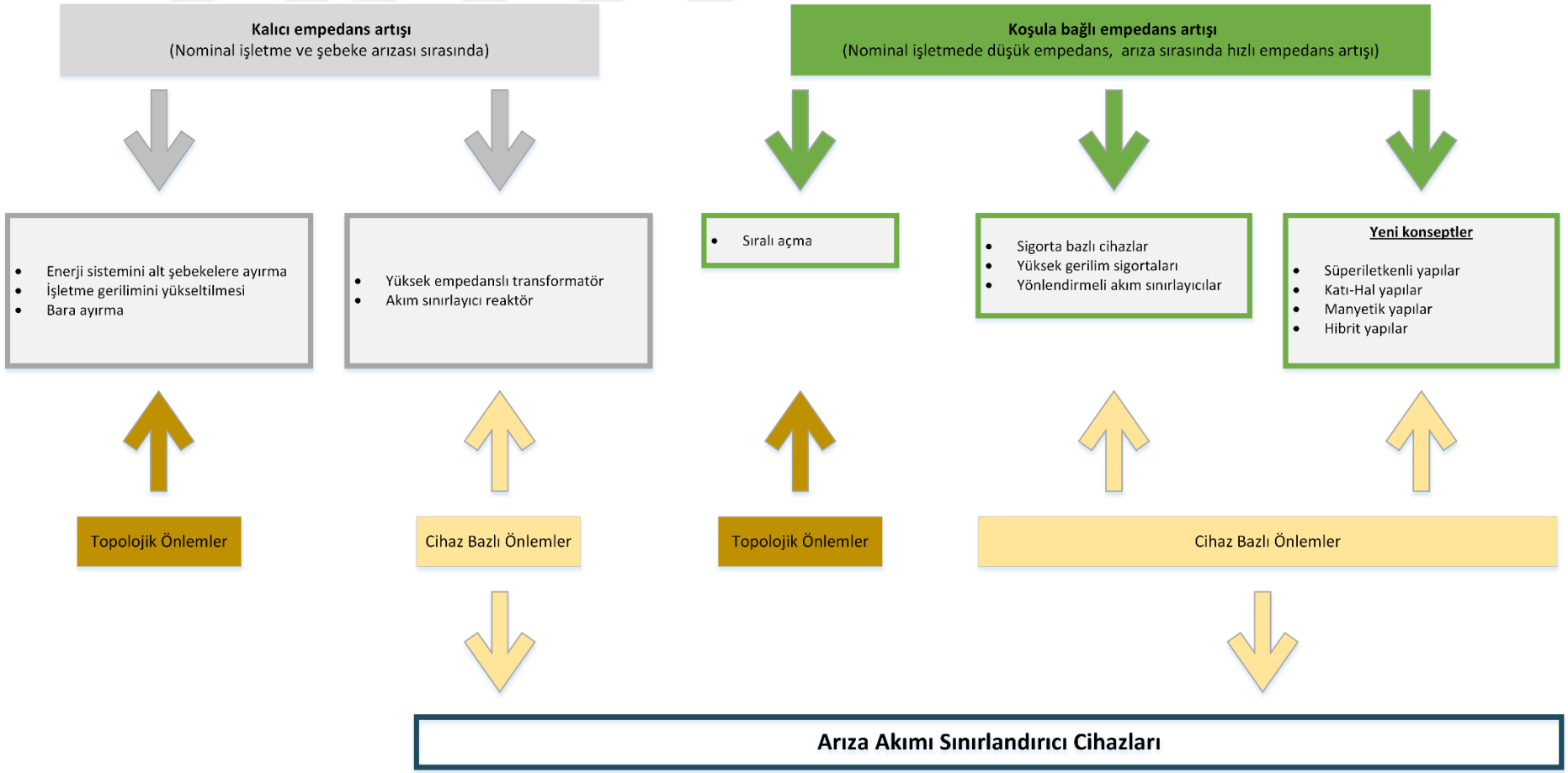
- AAS, normal çalışma koşullarında neredeyse devreden çıkmalı, yani üzerindeki gerilim düşümü ve güç kayıpları sıfıra yakın olmalıdır. Ayrıca, akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozulmalar da en aza indirilmelidir.
- Düşük harmonik etkiye sahip olmalıdır.

- Arıza akımını mümkün olan en kısa sürede tespit edip sınırlayabilmelidir. Arıza akımı sınırlamasının ilk tepe değer öncesinde gerçekleşmesi tercih edilmektedir.
- Arıza akımının hem DC hem de AC bileşenleri AAS tarafından etkin şekilde sınırlandırılabilmelidir; bu işlem arıza tipi ve arıza direnci gibi sistem parametrelerine bağımlı olmamalıdır.
- Makul bir kullanım ömrüne sahip olmalıdır.
- Kesintisiz çalışabilmeli, yani akım sınırlama modu, arıza giderilene ya da üretici tarafından belirlenen maksimum süreye kadar devam etmelidir.
- İnsan müdahalesi olmaksızın hızlı bir şekilde toparlanma süreci sağlamalıdır.
- Güç sisteminde kısa sürede ardışık arızalar meydana geldiğinde, AAS'nin bu tür tekrar eden çalışmalarda başarılı olması beklenir.
- Farklı gerilim seviyelerinde geliştirilmeye yönelik herhangi bir kısıt olmamalıdır.
- Yüksek güvenilirliğe ve düşük arıza oranına sahip olmalıdır.
- Endüksiyon motorlarının ilk kalkış akımı, kapasitör bankları ve transformatörlerin mıknatıslanma akımı ya da faz-toprak geçici akımları gibi etkenlerle yanlış açma yaşanmamalıdır.
- AAS üzerindeki gerilim birikimi (build-up overvoltage) ile ilgili bir endişe olmamalıdır.
- Devre kesiciler ve röleler gibi geleneksel koruma cihazlarıyla koordineli çalışabilmelidir.
- İç mekan transformatör merkezleri ve şehir içi kurulumlar açısından kompakt bir tasarıma sahip olmalıdır.
- Düşük çevresel etki yaratmalıdır.

## 2.1 Arıza Akım Sınırlayıcıların Sınıflandırılması

Geleneksel AAS'ler, sistemin hem nominal işletim koşullarında hem de arıza durumlarında sürekli devrede çalışırken, modern AAS yapıları ise normal işletim sırasında neredeyse kayıpsız çalışacak şekilde tasarlanmış olup, yalnızca arıza anında devreye girerek arıza akımını belirlenen sınırlar içinde tutar [80,81]. Geçtiğimiz süreçte farklı çalışma prensiplerine sahip çeşitli AAS tipleri

geliştirilmiştir ve şu anda da geliştirilmeye devam edilmektedir. Şekil 2.2'de IEEE ve CIGRE dokümanları kullanılarak hazırlanan arıza akım sınırlama yöntem ve cihazlarına ait sınıflandırma sunulmuştur [80,82].




**Şekil 2.2** AAS Yöntem ve Cihazlarının Sınıflandırılması

Şekil 2.2'de kalıcı empedans artışı sağlayan topolojik ve cihaz bazlı önlemler (pasif uygulamalar), uygulamalar sırasında ne normal koşullarda ne de arıza koşullarında herhangi bir değişiklik göstermeyen arıza akımı sınırlama önlemlerini ifade etmektedir. Koşula bağlı empedans artışı sağlayan topolojik ve cihaz bazlı önlemler (aktif uygulamalar) ise arıza anında devreye girebilen uygulamaları ifade etmektedir. Modern AAS ekipmanları aktif uygulamalar içerisinde değerlendirilirken, geleneksel arıza akımı sınırlama yöntem ve cihazları iki sınıfta da bulunmaktadır [83].

### 2.1.1 Geleneksel Yöntem ve Cihazlar

Bu bölümde, güç sistemlerinde uzun yıllardır kullanılmakta olan geleneksel arıza akımı sınırlama yöntemleri ve cihazları sunulmuştur.

#### 2.1.1.1 İşletme Geriliminin Yükseltilmesi

Tesis edilecek iletim ve dağıtım sistemlerinde işletme geriliminin seçimi, taşınacak güç miktarı ve sistemin kısa devre dayanımı gibi teknik gereksinimler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Bu seçimde temel amaç, devre kesiciler başta olmak üzere tüm sistem ekipmanlarının standart akım kapasiteleri içerisinde güvenli şekilde çalışmasını sağlamaktır. Genellikle bu ekipmanlar, sadece nominal akıma değil, aynı zamanda kısa süreli kısa devre akımlarına da dayanabilecek şekilde tasarlanır. Ancak, sistemdeki kısa devre gücünün zamanla artması, mevcut ekipmanların kısa devre dayanım kapasitelerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu durumda, güç sistemi için daha yüksek bir işletme gerilimi tercih edilerek kısa devre akımı düşürülebilir ve bu sayede ekipman sınırları aşılmadan sistem güvenliği sağlanabilir [82].

Yeni sistem tasarımlarında bu tür bir gerilim artışı nispeten kolay uygulanabilirken, mevcut sistemlerde gerilim seviyesini yükseltmek yalnızca orta gerilim seviyelerinde pratik bir çözüm sunmaktadır. Çünkü, bu seviyelerde sistemin mevcut fiziksel altyapısı büyük ölçüde korunarak modern ekipmanların kurulması mümkün olmaktadır. Buna karşın, yüksek gerilim seviyelerinde yapılacak gerilim artışları genellikle kapsamlı altyapı değişikliklerini ve büyük yatırımları beraberinde getirdiğinden, çoğu durumda uygulanabilir bir çözüm olarak değerlendirilmemektedir [82].

#### 2.1.1.2 Bara Ayırma

Bara ayırma, normalde kapalı olan bara anahtarlarının açılması veya mevcut baraların ayrılması yoluyla arızayı besleyebilecek olası kaynakların ayrılmasını sağlayan yöntemdir. Bu yöntem, arızayı besleyebilecek kaynak sayısını etkin bir şekilde azaltmaktadır. Ancak, normal veya yedek işletme koşullarında yük akımını sağlayan kaynakların sayısını da düşürür. Bu durum, güç sisteminin güvenilirlik ve sürekliliğine etki etmektedir. Bu nedenle, koruma koordinasyonu başta olmak üzere, işletme stratejilerinde ek düzenleme gereksinimi yaratmaktadır [82–84].

#### 2.1.1.3 Güç Sisteminin Alt Şebekelere Ayrılması

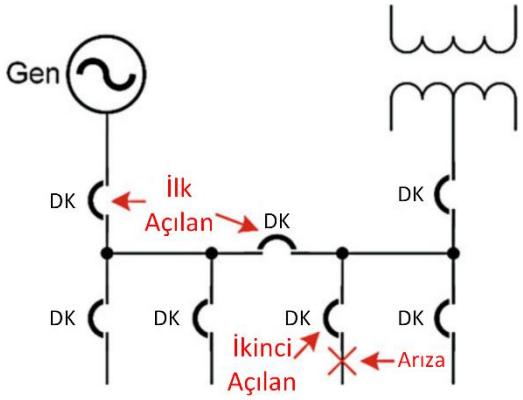
Bu yöntem, şebekenin aynı gerilim seviyesine sahip küçük parçalara ayrılmasını ifade etmektedir. Bu alt şebekelerin, bir üst gerilim seviyesinden ayrı ayrı beslenmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde, her bir alt şebekedeki arıza akımı seviyesinin izin verilen sınırların altına düşürülmesi sağlanır [82–84].

#### 2.1.1.4 Devre Kesicilerinin Ardışık Açılması

Devre kesicilerin ardışık açılması, güç sistemlerinde yüksek arıza akımlarını yönetmek için kullanılan özel bir yöntemdir. Bu yöntem, yüksek arıza akımlarının tek bir devre kesici tarafından doğrudan kesilmesini önleyerek, mevcut devre kesicilerin kesme kapasitelerinin aşılmasını engeller. Böylece, daha yüksek kesme kapasiteli devre kesicilere ihtiyaç duyulmadan sistem korunabilmektedir.

Arıza tespit edildiğinde, ilk olarak arıza akımının kaynağına daha yakın olan üst kademedeki devre kesici açılır. Böylece, arıza bölgesindeki kesicinin maruz kaldığı akım seviyesi azalır. Bu yaklaşım, genellikle arızaya en yakın devre kesicinin önce açılmasını öngören klasik koruma yapılarından farklıdır. Ardışık açma sayesinde aşırı yük altında kalan kesici daha güvenli şekilde operasyonunu gerçekleştirilebilmektedir.

Ancak, bu yöntemin bir dezavantajı, arızanın tamamen giderilmesi için kısa bir gecikmeye neden olmasıdır. Eğer aşırı yük altındaki kesici, yukarı kademedeki kesici açılana kadar geçen sürede maruz kaldığı termik zorlanmaya ($I^2t$) dayanamazsa, ciddi hasarlar meydana gelebilir. Ayrıca, arızayı besleyen kaynağa yakın kesicinin açılması, arızadan etkilenmemesi gereken diğer koruma bölgelerini de devre dışı bırakabilir. Bu yönteme ilişkin bir örnek Şekil 2.3'te sunulmuştur.




**Şekil 2.3** Kesiciler İçin Ardışık Açma Örneği

### 2.1.1.5 Yüksek Empedanslı Transformatörler

Yüksek empedanslı transformatörler, kısa devre akımlarını sınırlamak amacıyla tasarlanmış özel yapılara sahiplerdir. Standart transformatörlere kıyasla daha yüksek kısa devre empedansına sahip olmaları sayesinde, arıza anında akımı azaltarak devre kesicilerinin termik ve dinamik zorlanmalarını sınırlamaktadırlar. Ancak, empedans değerinin artması, sistemin geçici kararlılığını olumsuz etkilemektedir [85].

Bununla birlikte, yüksek empedanslı transformatörlerin kullanımı, kesicilerin karşılaştığı geçici toparlanma geriliminin yükselme hızını arttırarak, özellikle orta gerilim sistemlerinde kesici arızalarına neden olabilmektedir [86].

### 2.1.1.6 Akım Sınırlayıcı Reaktörler

Akım sınırlayıcı reaktörler, kısa devre anında devreye ilave endüktif reaktans sağlayarak arıza akımını sınırlayan, genellikle hava çekirdekli ya da demir çekirdekli olarak tasarlanan pasif cihazlardır. Demir çekirdekli yapılarda manyetik doyma riski bulunduğu için hava çekirdekli reaktör yapıları daha çok tercih edilmektedir. Özellikle orta ve düşük gerilim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bu reaktörler, basit yapıları, düşük maliyetleri ve bakım kolaylıkları ile öne çıkar. Ancak, sistemde sürekli bir gerilim düşümüne ve kayıplara yol açmaları, normal işletme koşullarında verimi düşürebilmektedir. Ayrıca, geri güç faktörü gibi olumsuz etkiler de yaratabilmektedirler [87].

Akım sınırlayıcı reaktörler aynı zamanda arıza akımlarının mevcut devre kesicilerin dayanım sınırlarını aşmadan sistemin güvenli çalışmasını sağlar. Önemli bir husus

olarak, manyetik alanların çevreye etkisi, fiziksel boyutların belirlenmesi ve ekonomik maliyet-fayda dengesi gibi faktörler uygulama öncesi dikkatle değerlendirilmelidir [84].

#### 2.1.1.7 Piroteknik Arıza Akım Sınırlayıcılar

Piroteknik arıza akımı sınırlayıcılar, bir bakır iletken ve paralel bağlı akım sınırlayıcı sigortadan oluşan özel yapılı cihazlardır. Arıza anında, içerdikleri piroteknik yük tetiklenerek bakır iletken fiziksel olarak kesilir ve akım, doğrudan sigorta üzerinden akar. Bu sayede, devre kesiciler çalışmadan önce arıza akımı sigorta tarafından sınırlandırılır. Normal işletme koşullarında ise tüm akım bakır iletken üzerinden akar; dolayısıyla sistemde gerilim düşümü ya da kayıp oluşmaz. Piroteknik ekipmanlar, tipik olarak 40,5 kV ve 5000 A'e kadar çalışabilmekte olup, özellikle deniz üstü (offshore) platformlar gibi alan kısıtı olan tesislerde tercih edilmektedirler [88].

Piroteknik arıza akım sınırlayıcıların en büyük avantajı, hızlı tepki süreleri sayesinde kısa sürede kısa devre akımını sınırlandırmaları ve klasik devre kesicilerin yetersiz kaldığı durumlarda sistemin korunmasını sağlamalarıdır. Ancak, tetiklenen parçaların değiştirilmesi gerektiğinden bakım gereksinimi oluşmaktadır. Ayrıca, tetiklenme eşiği ve çalışma senaryoları, güç sistemi topolojisine göre dikkatle belirlenmelidir. Gerçek saha uygulamalarında, ekipmanın tetiklenmesinden sonra, yük akımının sigorta üzerinden geçmeye devam etmesi sigortanın hasar görmesine ve iç ark oluşmasına neden olabileceğinden, sistemin yeniden enerjilendirilmeden önce uygun şekilde yalıtılması ve kontrol edilmesi önem arz etmektedir [83].

#### 2.1.1.8 Yüksek Gerilim Sigortaları

Yüksek gerilim sigortaları, özellikle dağıtım transformatörleri gibi bileşenleri korumak amacıyla kısa devre akımını hızlı ve güvenilir şekilde kesmek için kullanılan ekonomik çözümler arasında yer almaktadır. Bu sigortalar, devre kesicilerle birlikte kullanıldığında, bu cihazların sınırlı kesme kapasitesini aşan yüksek arıza akımlarının güvenli şekilde sınırlandırılmasını sağlar [89].

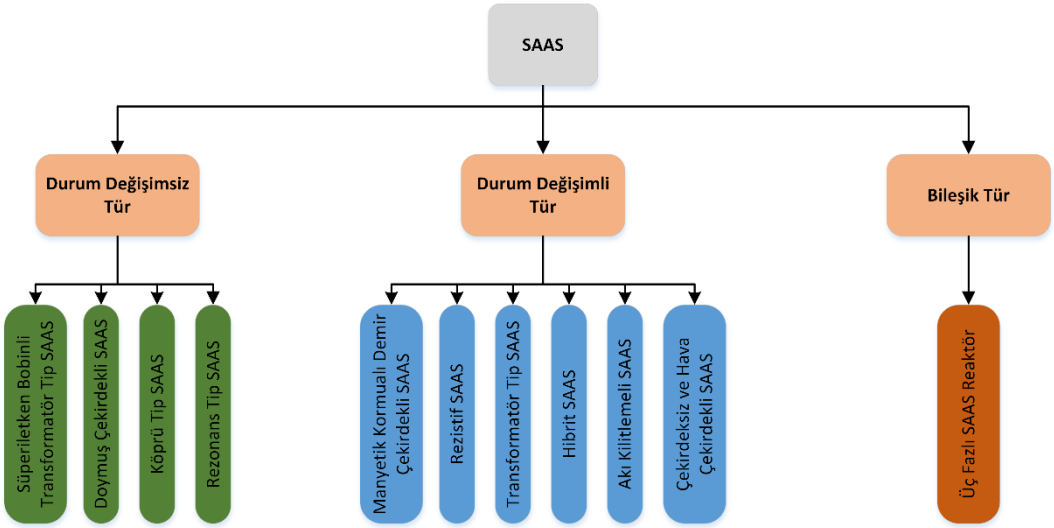
### 2.1.2 Modern Arıza Akım Sınırlayıcıları

#### 2.1.2.1 Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılar

Süperiletken arıza akım sınırlayıcılar (SAAS), yeni nesil arıza akımı sınırlama teknolojileri arasında bulunmaktadır. İletim ve dağıtım sistemlerinde yüksek kısa devre akımı problemini etkin bir şekilde çözme potansiyeline sahiptir. SAAS'nin temelini oluşturan ana bileşen, süperiletken malzemedir. Süperiletken malzemeler süperiletken durumuna geçtiklerinde elektriksel dirençleri neredeyse sıfıra inmektedir. Bu sayede normal işletme koşullarında ihmal edilebilir düzeyde güç kaybı oluşmaktadır [81,90].

Bir süperiletkenin süperiletkenlik moduna geçmesi için akım yoğunluğu (J), sıcaklık (T) ve uygulanan manyetik alan şiddetinin (H) kritik değerlerinin altında kalması gerekmektedir. Bu kritik değerler, kullanılan malzeme türüne göre değişkenlik gösterir. Bu üç parametreden herhangi biri kritik değeri aştığında, süperiletken ani bir durum değişimi ile normal iletkenlik durumuna geçer ve elektriksel direnci hızla artar [81].

SAAS'ler durum değişimli tür, durum değişimsiz tür ve bileşik tür olmak üzere üç farklı sınıfta incelenmektedir [90]. Bu türlere ait SAAS yapıları Şekil 2.4'te sunulmuştur.




**Şekil 2.4** SAAS Sınıflandırması [90]

Durum değişimli SAAS'ler, arıza anında süperiletken malzemenin kritik sıcaklık, akım yoğunluğu ya da manyetik alan değerlerinden birinin aşılmasıyla süperiletkenlik özelliğini kaybedip ani şekilde rezistif duruma geçme prensibine dayanmaktadır. Bu durum değişimi, sistemde yüksek empedans oluşturarak arıza akımını sınırlamaktadır. Sınırlama süreci hızlı olmasına rağmen süperiletken malzemenin tekrar süperiletken hale dönmesi için bir toparlanma süresine ihtiyaç duyulmaktadır [81].

Buna karşılık, durum değişimsiz SAAS yapılarındaki süperiletkenlik daima korunmaktadır. Örneğin, demir çekirdekli bir SAAS'de, demir çekirdeğin manyetik doygunluğa erişmesi süperiletken bir DC bobin tarafından sağlanmaktadır. Normal çalışma koşullarında düşük empedans gösteren sistem, arıza anında manyetik doygunluğun ortadan kalkmasıyla yüksek endüktans oluşturur ve arıza akımını sınırlar. Bu tip SAAS'lerin en önemli avantajı, süperiletkenin durum değişimi yaşamaması nedeniyle toparlanma süresine ihtiyaç duyulmamasıdır [90].

Bileşik tip SAAS'ler, birden fazla sınırlama prensibini bir araya getirerek tasarlanan hibrit yapılardır. Bu sistemler, hem durum değişimli hem de değişimsiz sistemlerin avantajlarını bünyesinde barındırır. Bu yapılarda genellikle süperiletken bir bileşenle birlikte endüktif bir reaktör, anahtarlama elemanları veya demir çekirdekli yapılar entegre şekilde çalışır. Normal çalışma koşullarında, sistem düşük empedans gösterir; arıza durumunda ise süperiletken eleman, kritik değerlerin aşılmasıyla rezistif hale geçer veya manyetik akı yönlendirilerek reaktif bileşenlerin devreye girmesi sağlanır. Böylece, arıza akımı hem hızlı hem de kontrollü bir şekilde sınırlandırılır. Bu çok katmanlı sınırlandırma mekanizması sayesinde hem kısa devre akımı etkin şekilde sınırlandırılır hem de soğuma süresi gereksinimi düşürülerek yeniden toparlanma süresi iyileştirilir [81].

Bu tür SAAS yapılarında özellikle üç fazlı sistemlerde süperiletken sargılar demir çekirdek üzerine yerleştirilerek simetrik ve asimetrik arıza türlerine karşı farklı tepkiler üretilebilir. Örneğin, tek faz-toprak arızalarında süperiletkenlik durumu korunarak sistemin toparlanma süresi sıfıra yaklaştırılırken, simetrik arızalarda süperiletken eleman durum değiştirerek dirençle sınırlandırma sağlar. Ancak, bu yapılar, yüksek miktarda HTS malzeme gerektirdiğinden, ilk yatırım maliyeti yüksek olup asimetrik arızalarda sağlıklı fazların da etkilenmesine yol

açabilmektedir [90]. Literatürde mevcut olan SAAS tiplerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 2.1'de sunulmuştur [90,91].

**Tablo 2.1** SAAS Yapılarının Avantaj ve Dezavantajları

| Tür | Yapı | Avantajlar | Dezavantajlar |
|---|---|---|---|
| **Durum Değişimli** | Rezistif SAAS (RAAS) | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, insan müdahalesi olmadan yeniden devreye girebilme, güçlü arıza akımı sınırlama yeteneği, normal çalışma koşullarında düşük gerilim düşümü, kompakt tasarım, iletim ve dağıtım sistemlerinde uygulanabilirlik | AC kayıpları, akım bağlantı elemanlarına duyulan ihtiyaç, uzun toparlanma süresi, bazı tiplerinde yüksek miktarda HTS malzemesi gereksinimi, sınırlama süresinin kısa olması |
| | Hibrit SAAS | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, kendini toparlama yeteneği, normal çalışma koşullarında düşük gerilim düşümü, RAAS'ye kıyasla daha uzun sınırlama süresi, RAAS'ye göre daha kısa toparlanma süresi, bazı yapılarda arıza akımı sınırlama oranının kontrol edilebilir olması, RAAS'ye kıyasla daha az HTS malzeme gereksinimi, iletim ve dağıtım sistemlerinde uygulanabilirlik | AC kayıp (RAAS'ye kıyasla daha az), RAAS'ye göre daha hacimli yapı ve bazı çeşitlerinde arıza tespit sistemine duyulan gereksinim |
| | Manyetik Korumalı Demir Çekirdekli SAAS | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, kendini toparlama yeteneği, akım bağlantı elemanına ihtiyaç duymama, düşük AC kaybı ve süperiletkenin güç sisteminden elektriksel olarak yalıtılmış olması | Normal çalışma koşullarında yüksek güç kaybı ve gerilim düşümü, uzun toparlanma süresi, büyük ve ağır yapı, demir çekirdek gereksinimi, kriyojenik kap ve yalıtım malzemeleri için iletken olmayan özel yapıların kullanım zorunluluğu |
| | Hava Çekirdekli Endüktif SAAS | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, kendini toparlama yeteneği, akım bağlantı elemanına ihtiyaç duymama (AC tipi için), düşük AC kaybı, manyetik korumalı demir çekirdekli SAAS'lere kıyasla daha düşük boyut ve ağırlık, demir çekirdek gereksiniminin olmaması, demir çekirdekli yapılara göre daha düşük sızıntı reaktansı ve daha düşük gerilim düşümü | Akım bağlantı elemanlarına ihtiyaç duyulması, uzun toparlanma süresi, kriyojenik kap ile yalıtım sistemleri için iletken olmayan özel malzemelere olan gereksinim |
| | SAAS Özellikli Transformatör | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, kendini toparlama yeteneği, düşük kısa devre empedansı, geleneksel transformatörlere kıyasla ihmal edilebilir düzeyde gerilim düşümü, iki işlevin tek bir ünitede birleştirilmesi sayesinde ekonomik yapı ve kabul edilebilir boyut ve ağırlık | AC kaybı, akım bağlantı elemanlarına duyulan ihtiyaç, bazı tasarımlarda toparlanma süresi gerekliliği, yüksek miktarda HTS malzeme ihtiyacı, yüksek kapasiteli bir kriyojenik sistem gereksinimi ve konvansiyonel transformatörlere kıyasla daha düşük arıza akımı dayanımı |

**Tablo 2.1** SAAS Yapılarının Avantaj ve Dezavantajları (Devamı)

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Transformatör + SAAS Yapısı | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, kendini toparlama yeteneği, daha düşük kritik akıma sahip HTS elemanlarının kullanılabilmesi ve HTS elemanı üzerindeki elektriksel ve mekanik zorlanmaların azaltılması | Normal işletme koşullarında yüksek güç kaybı ve gerilim düşümü, AC kaybı, akım bağlantı elemanlarına ihtiyaç, toparlanma süresi gereksinimi, büyük ve ağır yapı, yüksek kapasiteli bir soğutma sistemi, doygunluk sebebiyle arıza akımı sınırlama kapasitesinin azalması, |
| | Akı Kilitlemeli SAAS | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, kendini toparlama yeteneği ve bazı yapılarda arıza akımı azaltma oranının kontrol edilebilmesi | Göreceli olarak yüksek güç kaybı ve gerilim düşümü (normal işletme koşullarında), AC kaybı, akım bağlantı elemanlarına ihtiyaç, toparlanma süresi gereksinimi, büyük ve ağır yapı ile birlikte demir çekirdeğin doygunluğa ulaşma olasılığı |
| **Durum Değişimsiz** | Geleneksel Doymuş Çekirdekli SAAS | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, kendini toparlama yeteneği, AC kaybının olmaması, kısa toparlanma süresi, diğer HTS malzemeler yerine $MgB_2$ kullanım imkanı, iletim ve dağıtım sistemlerinde uygulanabilirlik ve uygulamada başarıyla test edilmiş olması | İşletme koşullarında yüksek güç kaybı ve gerilim düşümü, akım bağlantı elemanlarına ihtiyaç, büyük ve ağır yapı, aşırı gerilim problemi nedeniyle HTS eleman için ilave güvenlik önlemleri gereksinimi, yüksek düzeyde DC manyetik akı ihtiyacı ve akım ile gerilim dalga şekillerinde bozulma olasılığı |
| | Köprü Tip SAAS | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, kendini toparlama yeteneği, normal çalışma koşullarında düşük gerilim düşümü, düşük AC kaybı, kısa toparlanma süresi, küçük boyut, HTS yerine $MgB_2$ kullanma imkanı, arıza akımı sınırlama oranı kontrolü | Akım bağlantı elemanlarına ihtiyaç, bazı yapılarda DC güç kaynağı gerekliliği, güç diyotlarında iletim kayıpları ve yüksek yük altında çalışabilmek için yüksek kapasiteli bir soğutma sistemi gereksinimi |
| | Rezonans Tip SAAS | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, kendini toparlama yeteneği, işletme koşullarında düşük güç kaybı ve gerilim düşümü, basit yapı ve arıza başlangıcında etkili arıza akımı sınırlama kabiliyeti | AC kaybı, akım bağlantı elemanlarına ihtiyaç, kondansatör ve indüktörü korumak amacıyla metal oksit varistör (MOV) kullanım gereksinimi ve ferrorezonans oluşma olasılığı |
| **Bileşik Tip** | Üç Fazlı SAAS Reaktör | Kendiliğinden tetiklenme, hızlı tepki süresi, kendini toparlama yeteneği, düşük güç kaybı ve gerilim düşümü, faz-toprak arızası durumlarında durum değişimi oluşmadan ve toparlanma süresine ihtiyaç duymadan çalışabilme yeteneği | AC kaybı, akım bağlantı elemanlarına ihtiyaç, görece büyük ve ağır yapı, sağlıklı hatlar üzerinde olumsuz etki riski ve simetrik arızalar sırasında hatalı çalışma olasılığı |

### 2.1.2.2 Katı-Hal Arıza Akım Sınırlayıcılar

Katı-hal arıza akımı sınırlayıcılar (KHAAS), kısa devre akımının henüz tepe değerine ulaşmadan önce kesilmesini sağlayan yarı iletken tabanlı yapılardır. Bu cihazlar, özellikle orta gerilim seviyesindeki dağıtım sistemlerinde artan kısa devre akımı sorunlarına karşı etkin ve hızlı müdahale sunmaları sebebiyle ön plana çıkmaktadır [92].

Bu sistemlerde kullanılan yarı iletken anahtarlama elemanları (IGBT, GTO, IGCT, ETO vb.), normal çalışma koşullarında güç sistemine düşük empedanslı bir akım yolu sunarken, arıza anında gerçekleşen anahtarlama ile KHAAS topolojisi yüksek empedans sağlayacak şekilde değişmekte ve arıza akımları sınırlandırılmaktadır [81].

KHAAS sistemleri genellikle şu temel bileşenlerden oluşur: yarı iletken anahtar, akım sınırlayıcı empedans, gerilim sınırlayıcı eleman (örneğin varistör), aşırı akım dedektörü ve kontrol ünitesi. Önerilen yapılar, arıza anında aktif hale gelerek empedans artışı sağlar ve akımı sınırlı düzeyde geçirmeye devam eder [87].

Bu teknolojinin başlıca avantajları, hızlı anahtarlama yeteneği, yüksek bloklama gerilimi, kolay kontrol edilebilirlik, uzun çalışma ömrü, kriyojenik sistem gerektirmemesi ve kompakt tasarımı olarak sıralanmaktadır[81]. Ancak KHAAS sistemleri, termal yönetim, kaçak kapasitans kaynaklı aşırı gerilimler, gerilim/akım paylaşımı zorlukları, yardımcı devre ve kontrol üniteleriyle uyumluluk gibi önemli teknik zorluklar da barındırmaktadır. Bu sistemler, genellikle seri-paralel bağlı yarı iletkenlerden oluşan modüler yapılardır ve bastırma devreleri gibi yardımcı devreler ile bu sorunların üstesinden gelinmeye çalışılmaktadır [81,92]. KHAAS yapıları temel olarak, seri anahtarlamalı KHAAS, köprü tipi KHAAS ve rezonans tipi KHAAS olarak üç farklı ana grupta değerlendirilmektedir.

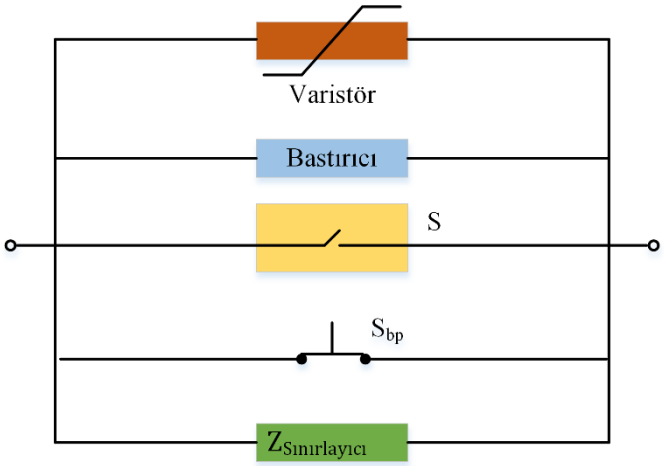
- **Seri Anahtarlamalı KHAAS**

Seri anahtarlamalı KHAAS yapısının genel topolojisi, aşağıdaki bileşenlerin paralel bağlanmasıyla oluşturulur [81]:

- İki yönlü kontrollü yarı iletken anahtar (S)
- Baypas anahtarı ($S_{bp}$)

- Akım sınırlayıcı empedans ($Z_{sınırlayıcı}$)
- Aşırı gerilim koruma elemanları (genellikle ZnO varistörleri)
- Snubber (bastırma) devresi

Seri anahtarlamalı KHAAS'ye ait genel devre yapısı Şekil 2.5 'te gösterilmiştir.




**Şekil 2.5** Seri Anahtarlamalı KHAAS Devre Yapısı [81]

Topoloji içerisinde anahtarlama göreviyle SCR, ETO, GTO, SGTO, IGBT gibi farklı kontrollü yarı iletken elemanlar kullanılmaktadır. Bu yapı içerisindeki bastırma devresi, yarı iletken anahtarın önemli bir eklentisi olup, anahtar üzerindeki gerilim artış hızını (dv/dt) sınırlandırarak cihazın hasar görmesini engellemektedir.

Seri anahtarlamalı KHAAS yapısı ayrı bir arıza algılama sistemine ihtiyaç duymaktadır. Bu sistem, genellikle akım belirlenen sınır değeri aştığında geliştirilen çeşitli algoritmalar vasıtasıyla etkinleşir. Böylece, yarı iletken anahtar hızla konum değiştirir ve arıza akımı, akım sınırlayıcı empedansı içeren alternatif bir yola yönlendirilir [81].

Baypas anahtarı ($S_{bp}$), çoğunlukla elektromekanik bir anahtar olup normal işletim koşullarında devrededir. Yarı iletken anahtara kıyasla daha düşük iletim kaybına sahiptir ve akım dalga formu bozulmaları bu yoldan geçerken daha az sorun teşkil eder. Bazı seri anahtarlamalı KHAAS topolojileri bu anahtarı içermemektedir [92].

Akım sınırlayıcı empedansın ($Z_{sınırlayıcı}$) amacı, arıza anında devreden geçen akımı kabul edilebilir seviyelere indirerek diğer koruma elemanlarının sağlıklı şekilde çalışmasını sağlamaktır. Empedans kolunda rezistif veya endüktif elemanlar kullanılabilmektedir. Ancak, termal yönetim açısından daha avantajlı olması nedeniyle endüktif elemanlar daha çok tercih edilmektedir [92].

Aşırı gerilim koruması sağlamak amacıyla, genellikle yüksek güçlü ZnO varistörleri kullanılır. Yarı iletken anahtar kapatıldığında, sistem üzerindeki enerjiyi sönümlemek ve anahtar üzerindeki gerilimi sınırlamak için varistör devreye girer. Ayrıca, birden fazla yarı iletken anahtarın seri bağlandığı yapılarda, her bir anahtar üzerine yerleştirilen varistörler, anahtarlar arasındaki gerilim paylaşımını eşitlemek ve açma/kapama gecikmeleri nedeniyle oluşabilecek aşırı gerilimleri önlemek için kullanılır [81].

- **Köprü Tipi KHAAS**

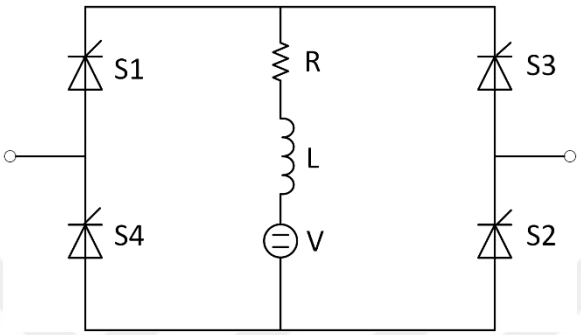
Köprü tipi KHAAS'ler, genellikle dört yarı iletken anahtar (Klasik diyot, SCR, IGBT, IGCT veya GTO gibi), bir DC reaktörü ve bazı tasarımlarda bir DC ön gerilim kaynağından oluşmaktadır. Normal işletim sırasında, yük akımı yarı iletken anahtarlar üzerinden geçer ve sistemin toplam empedansı düşüktür. Arıza anında geliştirilen topolojie özgü anahtarlama stratejisiyle devreye yüksek empedans kazandırılarak kısa devre akımı sınırlanmaktadır. Bu geçiş sayesinde sistemin diğer koruma ekipmanlarının zorlanma seviyesi azaltılır ve sistem kararlılığı korunur [81,93].

Bazı tasarımlarda sistemde DC ön gerilim kaynağı bulunurken, bazı tasarımlar ise yalnızca yarı iletken anahtar kontrolüyle çalışır. DC kaynağın sağladığı akım yardımıyla anahtarlar yönlendirilerek reaktör devreye alınır ya da devreden çıkarılır. Bu, sistemin hem sınırlama hem de kesme fonksiyonu görmesine olanak tanır. Ayrıca bazı tasarımlar, kontrol algoritmalarını kullanarak açma gecikmesini azaltmak ve yarım çevrim içinde kesme yapabilmek gibi özelliklere de sahiptir [93].

Köprü Tipi KHAAS yapılarında, arıza akımının şeklinin bozulması da engellenmektedir. Özellikle, ilk yarım çevrimde arıza akımı tepe değerine ulaşmadan bastırılması amaçlanır. DC bileşenin düşük olması, röle karakteristiklerinin bozulmaması açısından da avantaj sağlar [94,95].

Şekil 2.6'da DC ön gerilim kaynaklı köprü tipi KHAAS örneği paylaşılmıştır. Bu yapıda, dört adet tristör ve bir DC bobin seri şekilde şebekeye bağlanır. Normal işletim koşullarında, DC kaynağı tarafından oluşturulan doğru akım, tristörler ve bobin üzerinden sürekli olarak akar. Yük akımı, DC kaynak akımından küçük olduğu sürece sistem düşük empedanslı çalışır. Ancak yük akımı belirli bir eşiği aştığında, yani arıza koşulları altında, bir çift tristör (S1-S2 ya da S3-S4) blokaj

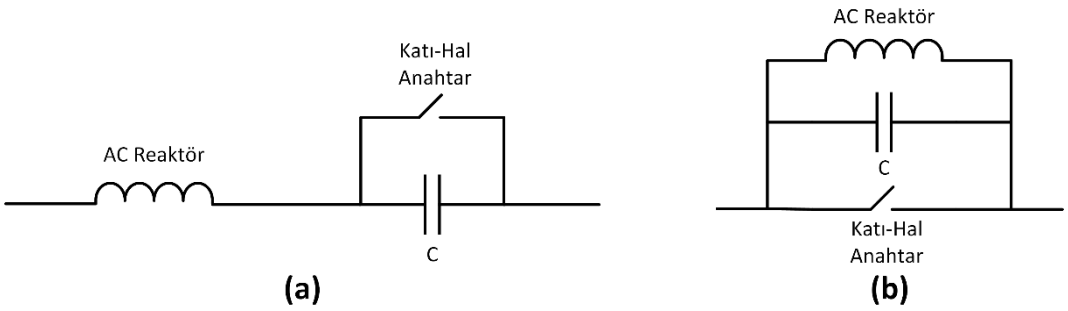
durumuna geçerek bobin devreye alınır ve kısa devre akımı etkin şekilde sınırlandırılır. Bu geçiş, aktif bir sensör kullanılmaksızın tristörlerin doğal çalışma karakteristiği ile sağlanır. Ayrıca, tristörlerin faz gecikme açısı (α) ayarlanarak kısa devre akımının büyüklüğü kontrol edilebilir ve böylece arıza sonrası toparlanma yönetilebilir. Yapı, arıza akımının ilk yarım çevrimde sınırlanmasını sağladığı için dalga formunun bozulmasını engeller ve röle karakteristiklerinin korunmasına katkıda bulunur [93].




**Şekil 2.6** DC Ön Gerilim Kaynaklı Köprü Tipi KHAAS Yapısı [93]

- **Rezonans Tipi KHAAS**

Rezonans tip arıza akım sınırlayıcı yapıları, temel olarak kapasite, endüktans ve güç elektroniği anahtarlama elemanlarından elde edilen seri ve paralel rezonans devrelerinden oluşmaktadır. Bu yapılara ait basit devre şemaları Şekil 2.7'de sunulmuştur. Literatürde, yıllar içerisinde çeşitli anahtarlama stratejileri ve devre yapıları içeren birçok rezonans tipi KHAAS mevcuttur [96–100].



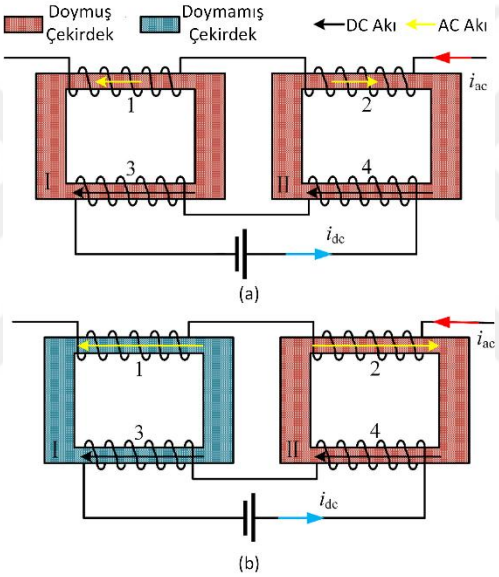

**Şekil 2.7** Rezonans Tipi KHAAS (a) Seri Rezonans (b) Paralel Rezonans

Seri rezonans devrelerinde, normal işletim koşulları altında kapasite ve endüktans rezonans durumundayken, şebeke arızası meydana geldiğinde arıza algılama algoritmaları yardımıyla katı-hal anahtar tetiklenmekte ve rezonans durumu bozulmaktadır. Böylelikle AC reaktör reaktansı devreye etki ederek arıza akımını

sınırlandırmaktadır. Diğer yandan, paralel rezonans devresi içeren yapılarda, normal işletim koşullarında katı-hal anahtar kapalı durumdayken, arıza anında açılmakta ve L-C paralel rezonansına ait yüksek empedans şebekeye eklenmektedir [51].

### 2.1.2.3 Manyetik Arıza Akım Sınırlayıcılar

Manyetik arıza akımı sınırlayıcılar (MAAS), manyetik kontrollü reaktörler temel alınarak geliştirilmiştir. Bu yapının temel çalışma prensibi, çekirdek malzemesinin doyum durumunun kontrolü ile sistemdeki kısa devre akımını sınırlamaktır [101]. Literatürde, DC uyartımlı [102,103], kalıcı mıknatıs tipi [104,105], süperiletkenli [106,107] ve hibrit [108,109] olmak üzere çeşitli MAAS yapıları mevcuttur.




**Şekil 2.8** Manyetik AAS'lerin Temel Yapısı (a) Normal İşletme (b) Arıza Durumu [101]

Şekil 2.8'de MAAS'nin tipik yapısı sunulmuştur. Görüldüğü üzere, MAAS yapıları genellikle iki adet çekirdekten oluşmaktadır. Her çekirdek üzerinde birer adet AC bobini ve DC uyartım bobini sarılıdır. DC bobinleri aynı yönde, AC bobinleri ise birbirine zıt yönde sarılmıştır. Bu tasarım sayesinde, her yarım çevrimde bir çekirdekte AC akı ile DC akı aynı yönde olurken, diğer çekirdekte bu akılar ters yönde yönlenir. İki AC bobini sistemle seri olarak bağlantılıdır. DC bobinler tarafından üretilen manyeto motor kuvvet (MMK), iki çekirdeği de doygunluğa ulaştırmaktadır [101].

Normal işletim koşullarında, MAAS'den geçen AC akım güç sisteminin anma akımı seviyesindedir ve kısa devre akımına göre oldukça küçüktür. Bu nedenle, AC bobinlerin oluşturduğu MMK, çekirdekleri doygunluk durumundan çıkarmaz ve AAS sistem empedansı oldukça düşük kalır. Böylece, MAAS güç sisteminin normal işletimi sırasında ihmal edilebilir düzeyde bir etki gösterir. Ancak, arıza oluştuğunda, kısa devre akımının ani artışı sonucu oluşan AC MMK, yarım çevrimler boyunca çekirdekleri dönüşümlü olarak doygunluk durumundan çıkarır. Bu durumda, MAAS yüksek empedans gösterir ve kısa devre akımını etkin bir şekilde sınırlar. Ayrıca, bu yapıda AC bobinlerin endüktansı DC güç kaynağı ile kontrol edilerek değiştirilebilmekte ve böylece güç akışı kontrol edilebilmektedir [110].

# 3
# META-SEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE GÜÇ SİSTEMLERİNDE AAS OPTİMİZASYONU

Modern AAS yapıları, düşük empedanslı normal işletim, yüksek kısa devre sınırlama kabiliyeti, hızlı tepki süresi ve otomatik toparlanma gibi ideal teknik özellikleri bünyesinde barındırmaktadır. Ancak, bu üstün performans, genellikle yüksek maliyetli yarı iletken anahtarlar, kontrol devreleri, sınırlayıcı elemanlar, süperiletken malzemeler ve soğutma sistemleri gibi karmaşık bileşenlerle sağlanabilmektedir. Bu nedenle, AAS'lerin güç sistemlerinde uygulanabilirliğinin artırılması, yalnızca teknik etkinlik açısından değil, ekonomik sürdürülebilirlik bakımından da dikkatli bir optimizasyon sürecini gerekli kılmaktadır.

Buradan hareketle, bu bölümde, literatürde yaygın şekilde kullanılan meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının modüler biçimde entegre edilebildiği çatı algoritmalar geliştirilmiştir. Böylece, farklı meta-sezgisel algoritmalar aynı problem üzerinde karşılaştırmalı olarak çalıştırılabilmekte, en uygun çözüm kümesi, tanımlı kısıtlar altında elde edilebilmektedir.

İlk algoritma, en efektif aday konumların belirlenmesinde kullanılan hassasiyet analizinden faydalanarak, istenilen kısıtlar dahilinde, güç sistemlerinde optimal AAS sayı, konum ve boyutlarının belirlenmesini kapsamaktadır.

İkinci algoritma, ilk algoritmada oluşturulan temelin üzerine inşa edilmiştir. Burada, DÜ ve AAS yerleşim yerlerinin, sayılarının ve boyutlarının eş zamanlı olarak optimize edilmesi hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda, aktif güç kaybı, AAS maliyeti ve yatırım karlılığı gibi birden fazla amaç fonksiyonunu aynı anda değerlendirebilen, esnek ve çok amaçlı bir çatı algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen yapı ile teknik performansın yanı sıra ekonomik sürdürülebilirliğin de

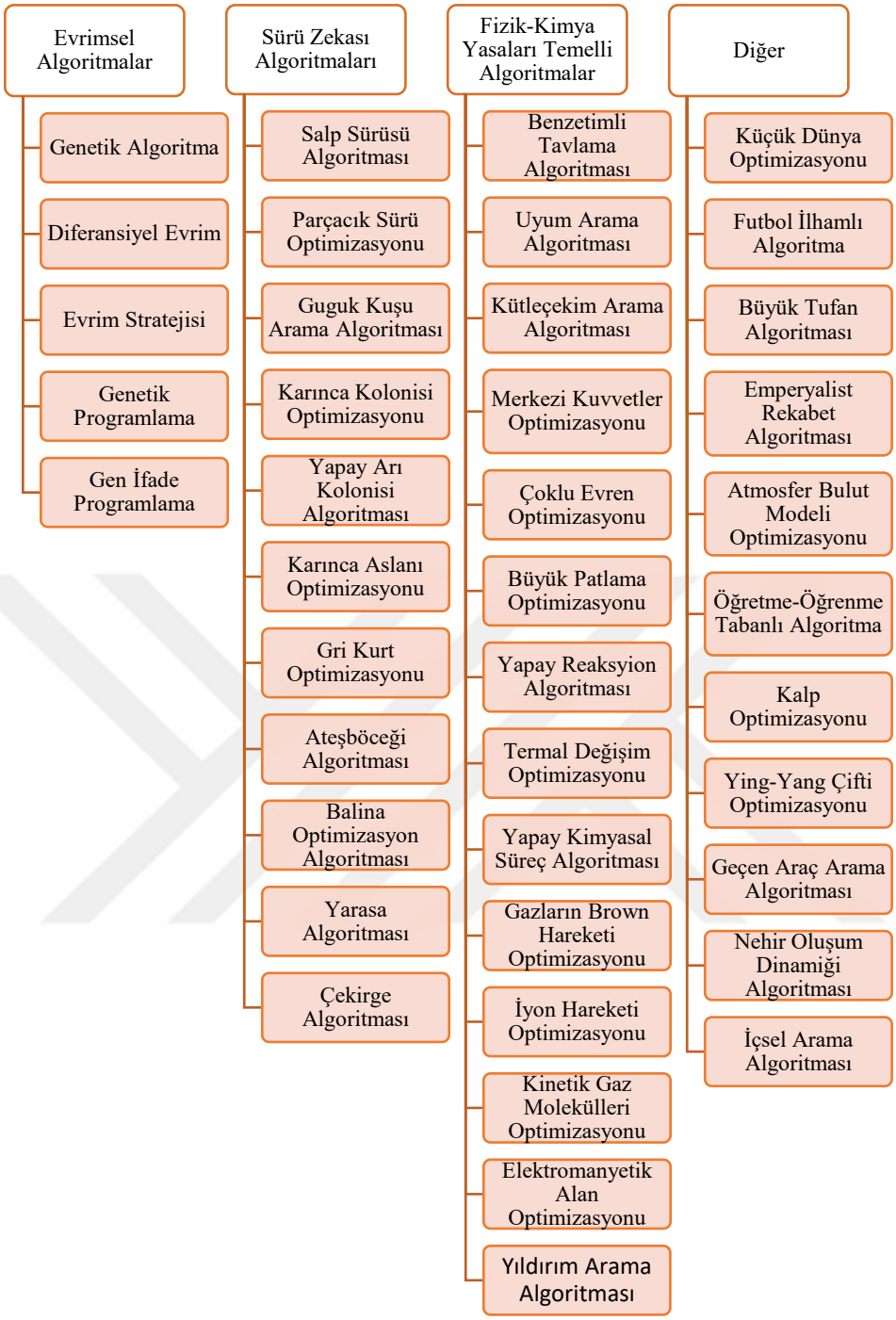
göz önünde bulundurulduğu kapsamlı bir optimizasyon yaklaşımı sunulması hedeflenmiştir.

## 3.1 Meta-Sezgisel Algoritmalar

"Sezgisel" kavramı, kökeni Antik Yunanca "heurisko" (bulmak, keşfetmek, araştırmayı yönlendirmek) sözcüğüne dayanan "heuristic" teriminden türetilmiştir. Bu kavram, genellikle deneyim ve sezgiye dayalı olarak çözüm arayan yöntemleri ifade eder. Sezgisel algoritmalar, çözüm uzayının tamamını taramak yerine, kabul edilebilir düzeyde sonuçlar üretebilen pratik kurallara dayanarak geliştirilmiştir. Bu algoritmaların temel avantajı, yüksek hesaplama hızları sayesinde özellikle büyük ve karmaşık problemlerde kısa sürede tatmin edici çözümler sunabilmeleridir. Bu çerçevede, daha esnek, yönlendirilebilir ve çözüm kalitesini artırmaya yönelik olarak geliştirilen yöntemler meta-sezgisel algoritmalar olarak adlandırılmaktadır [111].

### 3.1.1 Meta-Sezgisel Algoritmaların Sınıflandırılması

Literatürde çok sayıda farklı meta-sezgisel algoritma geliştirilmiş olup, bu algoritmalar genellikle evrimsel algoritmalar, sürü zekası algoritmaları, fizik yasalarına dayalı algoritmalar ve diğer/muhtelif algoritmalar olmak üzere dört ana alt grupta sınıflandırılmaktadır [112]. Bu alt sınıflar altında yer alan ve literatürde en yaygın şekilde uygulama alanı bulan başlıca algoritmalara, Şekil 3.1'de yer verilmiştir [113–153].




**Şekil 3.1** Meta-Sezgisel Algoritmaların Sınıflandırılması ve Yaygın Olarak Kullanılan Algoritmalar

### 3.1.1.1 Evrimsel Algoritmalar

Evrimsel algoritmalar (EA), Darwin'in evrim teorisinden ilham alan algoritma sınıflarındandır. Bu teori, bir tür içindeki bireyler arasında rastgele varyasyonların oluştuğunu savunmaktadır. Evrimsel algoritmalar, arama uzayında en iyi sonuca yakın çözümleri belirlemek için bu teoriden esinlenmektedir. Bu algoritmalarda her

iterasyon “nesil” olarak adlandırılmakta ve ebeveyn seçimi, yeniden kombinasyon (çaprazlama), mutasyon ve hayatta kalan birey seçimi gibi aşamalardan oluşmaktadır. Çaprazlama ve mutasyon süreçleri arama uzayının keşfi (exploration) ile ilgilenirken, ebeveyn ve hayatta kalan seçimi ise sömürü (exploitation) fonksiyonunu yerine getirmektedir [111,154] .

Doğal evrim süreçlerinden ilham alan bu optimizasyon teknikleri, Genetik Algoritma ve Diferansiyel Evrim gibi yaygın algoritmaları kapsamaktadır. Bu yöntemler, rastgele oluşturulan potansiyel çözümlerle başlamakta ve en iyi çözümleri birleştirerek çaprazlama ve mutasyon gibi işlemlerle yeni bireyler oluşturma yoluyla popülasyonu iyileştirmektedir [154].

#### 3.1.1.2 Sürü Zekası Algoritmaları

Sürü zekası (Swarm Intelligence, SI) tabanlı meta-sezgisel algoritmalar, doğada sosyal canlıların (örneğin karıncalar, arılar, kuşlar, kurtlar, yunuslar… vb.) grup halinde sergilediği kolektif davranışlardan esinlenerek geliştirilen optimizasyon yöntemleridir. Bu algoritmalar, her bir bireyin (ajanın) yerel bilgisini kullanarak küresel çözüme ulaşmayı amaçlamaktadır. Sürüdeki ajanlar, bilgi paylaşımı yoluyla birbirlerinin hareketini etkileyerek hem arama hem de sömürü süreçlerini dengeli biçimde sürdürmektedir. Bu yapı sayesinde, özellikle çözüm uzayının çok büyük olduğu ve analitik çözümlerin mümkün olmadığı problemler için zaman kısıtlı koşullarda uygulanabilir çözümler üretilebilmektedir [154,155].

Sürü zekası algoritmaları, esnek ve uyarlanabilir doğaları sayesinde dışsal değişkenlere karşı yüksek dayanıklılık göstermektedir. Bu algoritmalar, öğrenme yetenekleri sayesinde çevresel değişimlere hızla uyum sağlayabilmekte ve çeşitli mühendislik uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadırlar [155]. Algoritmalardan bazıları doğrudan hayvan davranışlarını modellemektedir. Örneğin, Yarasa Algoritması [137], yarasaların ekolokasyon sistemini modelleyerek frekans ve sinyal şiddeti üzerinden konum güncellemeleri ile arama uzayını taramaktadır. Guguk Kuşu Arama Algoritması [139], guguk kuşlarının yavrularını başka yuvalara bırakma stratejisinden esinlenmektedir. Çekirge Optimizasyon Algoritması [150], çekirgelerin birbirine olan çekim ve itme davranışlarını modelleyerek çözüm aramaktadır. Ateşböceği Algoritması, parlaklık sinyallerine dayalı çekim kuvvetleri ile konum güncellemeleri yapmaktadır [154]. Gri Kurt Optimizasyonu [151],

kurtların liderlik hiyerarşisi ve çevreleme stratejileri üzerine kuruludur. Karınca Aslanı Optimizasyonu [138], karınca aslanlarının av yakalama stratejilerini taklit etmektedir. Balina Optimizasyon Algoritması [136] ise kambur balinaların baloncuk halkası ile av çevreleme davranışına dayalı olarak çalışmaktadır. Bu algoritmalar, doğadan alınan ilhamla birlikte yüksek çözüm kalitesi ve hızlı yakınsama özellikleri göstermektedir [154].

#### 3.1.1.3 Fizik-Kimya Yasaları Temelli Algoritmalar

Fiziksel ve kimyasal yasalardan esinlenen meta-sezgisel algoritmalar, doğada gözlemlenen temel süreçlerin matematiksel modellenmesiyle geliştirilmiş optimizasyon yöntemleridir. Fizik temelli algoritmalar, doğa yasalarının sistematik etkilerini taklit ederek çözüm uzayında en iyi çözümleri bulmayı amaçlamaktadır. Örneğin, Benzetimli Tavlama algoritması [135] , metalurjideki tavlama sürecini modelleyerek karmaşık veya çok modlu problemlerdeki yerel en iyi çözümleri bulmayı hedeflemektedir. Yerçekimi Arama Algoritması [133], kütle çekim yasasını taklit ederek çözüm adaylarının daha iyi çözümlere doğru yönelmesini sağlar. Elektromanyetik Alan Optimizasyonu [152], yüklü parçacıkların çekim ve itme kuvvetlerini modelleyerek arama sürecini yönlendirir. Ayrıca, yıldırımların rastgele doğasından esinlenen Yıldırım Arama Algoritması [153] gibi yapılar da rastlantısal ve yönlendirilmiş arama arasında denge kurarak çözüm üretmektedir [112,154].

Diğer yandan, kimya temelli algoritmalar, moleküler reaksiyonlar, Brown hareketi, iyon değişimi ve termal transfer gibi kimyasal süreçlerden ilham almaktadır. Bu algoritmalar, parçacıkların rastlantısal hareketleri ve etkileşimlerinden faydalanarak optimizasyon sürecini yönlendirmektedirler. Bu kategoride öne çıkan algoritmalar arasında Gazların Brown Hareketi Optimizasyonu [126], Yapay Reaksiyon Algoritması [127] ve İyon Hareketi Optimizasyonu [125] gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu tür algoritmaların temel amacı, kimyasal süreçlerin enerji değişimlerinden esinlenerek daha kararlı ve etkili çözümler üretmektir [112].

#### 3.1.1.4 Diğer Algoritmalar

Bu sınıflandırma altında toplanan algoritmalar, doğrudan biyolojik, fiziksel ya da kimyasal temellere dayanmayan, bunun yerine sosyal davranışlar, eğitim süreçleri, doğa olayları veya soyut kavramlardan esinlenen yöntemleri içermektedir [112].

Örneğin, Emperyalist Rekabet Algoritması [116] ülkeler arası güç mücadelesini, Öğretme-Öğrenme Algoritması [115] ise bir eğitim sürecini model alır. Küçük Dünya [123], Futbol İlhamlı [117] ve Atmosfer Bulut [121] gibi algoritmalar, sosyal ağlar, takım oyunları, doğa olayları gibi farklı kaynaklardan ilham almaktadırlar.

Bu algoritmalar genellikle klasik yöntemlere alternatif olarak geliştirilmiş olup, özellikle farklı problem türlerine uyarlanabilirlik açısından dikkat çekmektedirler. Soyut ve çeşitli ilham kaynaklarına dayanmaları sayesinde geniş uygulama alanlarına sahiptirler.

### 3.1.2 Tez Çalışmasında Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları

Tez kapsamında yürütülen AAS optimizasyonu çalışmalarında ve buna eşlik eden DÜ optimizasyonu için geliştirilen çatı algoritmalar dahilinde PSO, GA ve GKO optimizasyon arama algoritmaları kullanılmıştır. Bu bölümde, belirtilen arama algoritmalar tanıtılmış ve matematiksel ifadeleri paylaşılmıştır.

#### 3.1.2.1 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

PSO algoritması, her bir parçacığın önceki en iyi pozisyonuna ($p_{best}$) ve sürünün genel en iyi pozisyonuna ($g_{best}$) doğru hareket etmesi ile arama sürecini gerçekleştirmektedir. Bir minimizasyon problemi varsayıldığında, aşağıdaki ifadeler kullanılarak her parçacığın konumu ve hızı güncellenmektedir [149]:

1. En iyi kişisel konumun ($p_{best}$) güncellenmesi:

$$pbest_i^t = x_i^* \mid f(x_i^*) = \min_{k=1,2,\dots,t} \{f(x_i^k)\} \tag{3.1}$$

2. En iyi global konumun ($g_{best}$) güncellenmesi

$$g_{best}^t = x_*^t \mid f(x_*^t) = \min_{\substack{i=1,2,\dots,N \\ k=1,2,\dots,t}} (\{f(x_i^k)\}) \tag{3.2}$$

3. Parçacıklara ait hızların güncellenmesi:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (pbest_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (gbest^t - x_i^t) \tag{3.3}$$

4. Parçacık konumlarının güncellenmesi:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \tag{3.4}$$

Bu formüllerde,

- $v_i^t$: Parçacığın t. iterasyondaki hızını,

- $x_i^t$: Parçacığın t. iterasyondaki konumunu,
- $\omega$: Atalet ağırlığı,
- $c_1, c_2$: Bilişsel ve sosyal hızlanma katsayılarını,
- $c_1 r_1(pbest_i^t - x_i^t)$: Parçacık hızına ait bilişsel bileşeni,
- $c_2 r_2(gbest^t - x_i^t)$: Parçacık hızına ait sosyal bileşeni,
- $r_1, r_2$: [0, 1] aralığında rastgele üretilen sayıları temsil etmektedir.

Atalet bileşeni, parçacığın önceki hızını koruyarak hareket etmesini sağlamakta, bilişsel bileşen, kendi en iyi pozisyonuna doğru çekim uygulamakta ve sosyal bileşen, sürünün en iyi pozisyonuna doğru yönlenmeyi sağlamaktadır. Aşağıda PSO algoritmasına ait sözde kod sunulmuştur [156].

**Sözde PSO kodu**

**Girdi:**
*N* – Parçacık sayısı
*D* – Problem boyutu
*T* – Maksimum iterasyon
*LB* – Arama uzayının alt sınırı
*UB* – Arama uzayının üst sınırı
**Çıktı:**
*gbest* – Şimdiye kadar bulunan en iyi pozisyon (çözüm)

**Başlat**
  Sürüyü rastgele başlat
  **for** $i$ =1:*N*:
    $v_i^0 \leftarrow$ [LB, UB]$^D$ ; Hız vektörünü rastgele başlat
    $x_i^0 \leftarrow$ [LB, UB]$^D$ ; Konum vektörünü rastgele başlat
    $pbest_i^0 \leftarrow x_i^0$ ; Başlangıç konumlarını en iyi kişisel pozisyonlar olarak tanımla
  **end for**
  Eşitlik (3.2) ile $g_{best}^0$ (başlangıç için sürüye ait en iyi pozisyon) değerini bul
  $t \leftarrow 1$; iterasyon sayısını başlangıç değeri olan 1 olarak ata
  **while** $t \leq T$
    **for** $i$ =1:*N;* Sürü boyunca iterasyonu devam ettir
      $r_1, r_2 \leftarrow$ [0, 1]$^D$ Rastgele sayı vektörlerini üret
      Eşitlik (3.3)'ü uygula
      Eşitlik (3.4)'ü uygula
      **if** $f(\mathrm{x_i^t}) < f(pbest_i^{t-1})$
        $pbest_i^t \leftarrow \mathrm{x_i^t}$; İlgili parçacık bireysel en iyi değerini güncelle
      **end if**
    **end for**
    Eşitlik (3.2) ile $g_{best}^t$ değerini bul
    $t \leftarrow t + 1$; İterasyonu ilerlet
  **end while**
**Bitir**

### 3.1.2.2 Genetik Algoritma

Genetik Algoritma (GA), biyolojik evrim ilkelerinden esinlenerek geliştirilmiş bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir. Bu algoritmalar, temel olarak doğal

seçilim, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik işlemleri kullanarak başlangıçta rastgele oluşturulan bir popülasyondan en uygun çözümü elde etmeyi amaçlamaktadır. İlk olarak 1970'lerde John Holland tarafından geliştirilen GA karmaşık ve büyük arama alanlarında etkili bir çözüm aracı olarak öne çıkmaktadır. Genetik Algoritma çalışma prensibi aşağıda açıklanmıştır [148,157].

- **Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması**

GA tarafından üretilen optimizasyon probleminin her bir olası çözümü bir kromozom olarak adlandırılmaktadır. Bu nedenle, bir optimizasyon probleminin matematiksel formülasyonunda, her bir kromozom, ele alınan optimizasyon probleminin olası bir çözümünü temsil eden bir dizi gen (karar değişkenleri) şeklinde ifade edilmektedir [157].

N boyutlu optimizasyon problemi için bir kromozom, 1× $N$ boyutunda bir dizi olarak tanımlanmaktadır. Bu dizi şu şekilde ifade edilir [157]:

$$\text{Kromozom} = X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N) \tag{3.5}$$

Burada:

- $X$, optimizasyon probleminin olası bir çözümünü temsil etmektedir.
- $x_i$, $X$ 'in i. karar değişkenidir.
- N, karar değişkenlerinin sayısını (problem boyutu) ifade etmektedir.

Popülasyon büyüklüğü ($M$), yani olası çözümlerin sayısı, M×N boyutunda bir kromozom matrisini oluşturmaktadır. Bu matris, şu şekilde ifade edilir [157].

$$\text{Popülasyon} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_j \\ \vdots \\ X_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,i} & \dots & x_{1,N} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,i} & \dots & x_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{j,1} & x_{j,2} & \dots & x_{j,i} & \dots & x_{j,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M,1} & x_{M,2} & \dots & x_{M,i} & \dots & x_{M,N} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

Burada:

- $X_j$ j. çözümü (kromozomu) ifade etmektedir.
- $x_{j,i}$, j. çözümdeki i. karar değişkenini (geni) temsil etmektedir.
- $M$, popülasyon büyüklüğünü göstermektedir.

Her bir karar değişkeni reel sayı olarak veya ayrık problemler için önceden tanımlanmış bir değer kümesi olarak temsil edilebilmektedir. Oluşturulan başlangıç popülasyonundaki bazı çözümler, bir sonraki nesli üretmek için ebeveynler olarak seçilmektedir.

- **Seçim**

Seçim aşaması, genetik algoritmanın popülasyondan uygun aday çözümleri belirleyerek bir sonraki neslin ebeveynlerini seçtiği süreçtir. Bu aşamada, popülasyondaki bireylerin uygunluk (fitness) değerleri dikkate alınarak daha iyi performans gösteren bireylerin seçilme olasılığı artırılmaktadır. Seçim işlemi, genellikle aşağıdaki yöntemlerle gerçekleştirilir:

- **Rulet Tekerleği Seçimi (Roulette Wheel Selection):** Bireylerin seçim olasılıkları, uygunluk değerlerine orantılı olarak belirlenir. Daha yüksek uygunluk değerine sahip bireyler, daha fazla seçilme şansına sahiptir.
- **Turnuva Seçimi (Tournament Selection):** Rastgele seçilen bir grup birey arasından en iyi uygunluk değerine sahip olanlar ebeveyn olarak seçilir.
- **Derece Seçimi (Rank Selection):** Bireyler, uygunluk değerlerine göre sıralanır ve seçim olasılıkları bu sıralamaya göre belirlenir.

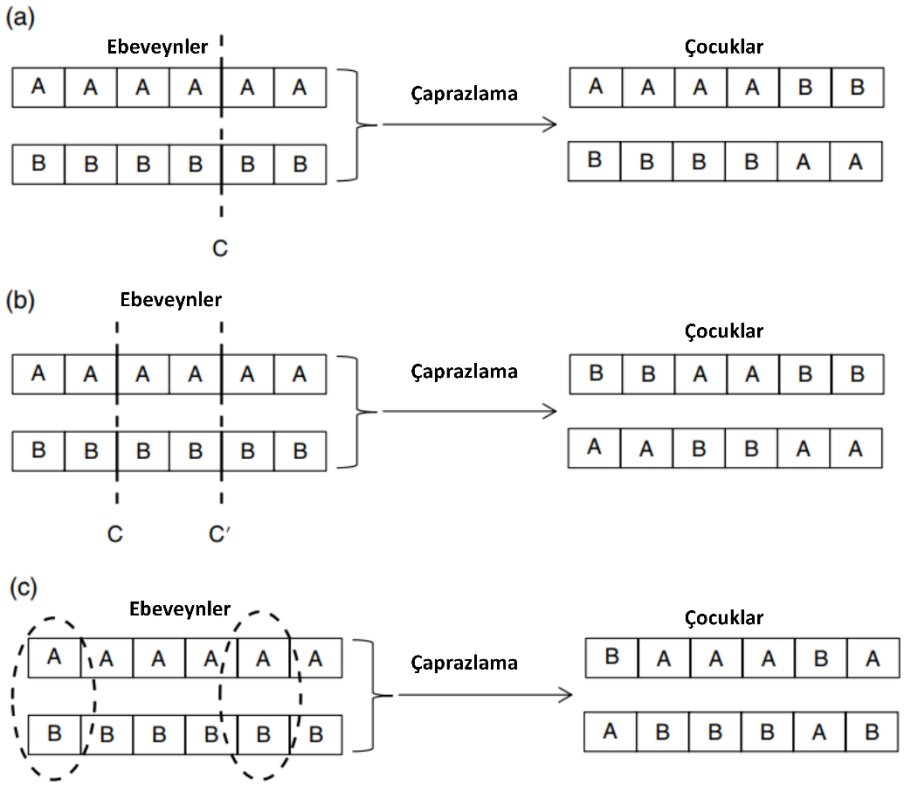
Bu süreç, popülasyondaki en iyi çözümlerin bir sonraki nesilde daha fazla yer almasını sağlar ve çözüm uzayında daha iyi alanların keşfedilmesine olanak tanır [157–159].

- **Çaprazlama:**

Çaprazlama işlemi, iki ebeveyn bireyin genetik bilgisini birleştirerek yeni bir yavru oluşturma sürecidir. Bu işlem, çözüm uzayının farklı alanlarının keşfedilmesini ve genetik çeşitliliğin artırılmasını sağlar. Literatürde kullanılan birçok çaprazlama yöntemi mevcut olsa da genellikle kullanılan çaprazlama yöntemleri şunlardır [157,160]:

- **Tek Noktalı Çaprazlama (Single Point Crossover):** Ebeveynlerin genetik kodları belirli bir noktadan kesilerek, kesim noktasına kadar olan kısım bir ebeveynden, geri kalan kısım ise diğer ebeveynden alınır.

- **Çok Noktalı Çaprazlama (Multi Point Crossover):** Birden fazla kesim noktası belirlenir ve her kesim noktasında ebeveynlerin genetik kodları değiş-tokuş edilir.
- **Düzgün Çaprazlama (Uniform Crossover):** Her gen için rastgele olarak ebeveynlerden birinden gen seçilir. Bu yöntem, genlerin karışımını artırır ve daha çeşitli yavrular oluşturur.




**Şekil 3.2** Farklı Çaprazlama Yaklaşımları (a) Tek Noktalı Çaprazlama (b) İki Noktalı Çaprazlama (c) Düzgün Çaprazlama [157]

Çaprazlama oranı, algoritmanın keşif ve sömürü dengesini sağlar. Yüksek çaprazlama oranı, yeni bölgelerin keşfine olanak tanırken, düşük oran daha fazla sömürüye yönlendirir [157,160]. Farklı çaprazlama yaklaşımlarına yönelik örnek gösterimler Şekil 3.2'de sunulmuştur.

- **Mutasyon:**

Mutasyon, genetik algoritmalarda yeni genetik materyalin popülasyona kazandırılmasını sağlayan önemli bir işlemdir. Bu operatör, bir bireyin bazı genlerini rastgele olarak değiştirmekte ve bu sayede popülasyonda çeşitlilik

yaratmaktadır. Mutasyon işlemi, özellikle yerel minimumdan kaçınmak ve arama uzayını daha geniş kapsamda keşfetmek için kullanılmaktadır.

- **Düzgün (Uniform) Mutasyon:**

Bu mutasyon türü, seçilen bir genin mevcut değerini arama uzayındaki sınırlar dahilinde rastgele bir değer ile değiştirmektedir. Bu yöntem, mutasyon işlemi sırasında çözümlerin fizibilite sınırları içinde kalmasını sağlar. Formülasyonu aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [157]:

$$x_i' = \text{Rnd}(x_i^{(L)}, x_i^{(U)}) \tag{3.7}$$

Burada,

- $x_i'$: Mutasyona uğramış genin yeni değeri,
- $x_i^{(L)}$: Mutasyon alt sınırını,
- $x_i^{(U)}$: Mutasyon üst sınırını,
- Rnd(a,b): [a,b] aralığında rastgele bir sayı üreten operatörü temsil etmektedir.

- **Düzgün Olmayan Mutasyon:**

Bu yöntemde, mutasyon işlemi belirli bir çözümün belirli genlerine uygulanır ve mutasyon miktarı, iterasyon sayısına bağlı olarak ayarlanmaktadır. Bu yöntem, özellikle optimizasyon işleminin ilerleyen aşamalarında daha ince ayar yapılmasını sağlamaktadır. Formülasyonu ise aşağıdaki gibidir [157]:

$$x_i' = \text{Rnd}(x_i - d, x_i + d) \tag{3.8}$$

$$d = d_0 \times (1 - \frac{t}{T}) \tag{3.9}$$

Burada:

- $d_0$: İlk iterasyondaki mutasyon aralığını,
- t: Mevcut iterasyon sayısını,
- T: Maksimum iterasyon sayısını temsil etmektedir.

- **Mutasyonun Uygulanması:**

Mutasyon işlemi genellikle olasılıksal olarak uygulanır. Bir mutasyon olasılığı ($P_m$)belirlenir ve her bir gen, rastgele üretilen bir sayı $R_{rastgele}$ ile karşılaştırılır. $R_{rastgele} \leq P_m$ ise, ilgili gen mutasyona uğratılır [157].

Bu yöntemler, özellikle yerel minimumdan kaçınmak ve çözüm uzayında daha geniş kapsamlı bir arama yapmak için kullanılmaktadır. Bu süreçte mutasyon oranı dikkatli seçilmelidir. Çok yüksek bir mutasyon oranı, algoritmayı rastgele aramaya dönüştürebilirken, çok düşük bir oran da yerel minimumlara sıkışma riskini artırır [158,159].

Genetik Algoritmaya ait algoritma yapısı aşağıda sunulmuştur.

Sözde GA kodu

**Girdi:**
$N$ – Popülasyon büyüklüğü
$T$ – Maksimum iterasyon
$Pc$ – Çaprazlama oranı
$F_m$ – Mutasyon Fonksiyonu
**Çıktı:**
*gbest* – Şimdiye kadar bulunan en iyi pozisyon (çözüm)

**Başlat**
Parametreleri ve başlangıç verilerini belirle
Rastgele olarak N adet çözüm oluştur
t ← 1;
**While** t ≤ T
    Tüm bireylerin uygunluk (fitness) değerlerini hesapla
    **Seçim:** En iyi bireyleri seç ve havuza ekle
    **Çaprazlama:** Rastgele seçilen bireyler üzerinde çaprazlama işlemi uygula
    **Mutasyon**: Bireylerin genlerinde belirli bir olasılıkla mutasyon uygula;
      Yeni nesil popülasyonu oluştur
      Gbest'i güncelle
      t ← t + 1
    **end while**
**Bitir**

### 3.1.2.3 Gri Kurt Optimizasyonu

GKO algoritması, kurtların avlanma davranışını taklit eden bir optimizasyon yöntemidir. Algoritma temel olarak dört aşamadan oluşur: Keşif (Exploration), Kuşatma (Encirclement), Avlanma (Hunting), ve Sömürme (Exploitation). GKO algoritması tasarlanırken kurtların sosyal hiyerarşisini matematiksel olarak modellemek amacıyla, en uygun çözüm alfa (α) olarak kabul edilmektedir. Bu doğrultuda, ikinci ve üçüncü en iyi çözümler sırasıyla beta (β) ve delta (δ) olarak adlandırılmaktadır. Geriye kalan aday çözümler ise omega (ω) olarak kabul edilir [151].

GKO algoritmasında avlanma (optimizasyon) süreci α, β ve δ kurtları tarafından yönlendirilir. ω kurtları ise bu üç kurdu takip eder. Optimizasyon süreci ve ilgili matematiksel ifadeler aşağıda açıklanmıştır [151].

- **Keşif**

Keşif aşaması, kurtların avın yerini aradığı süreçtir. Bu aşamada, kurtlar geniş bir alanda arama yaparak farklı çözümler bulmaya çalışır. Bu süreç, algoritmanın başlangıcında etkindir. Keşif aşamasında, |A|>1'dir. Bu durumda, kurtların avın konumundan uzaklaşması sağlanır ve daha geniş bir arama alanında gezinmelerine neden olur.

- **Kuşatma**

GKO algoritması, kurtların avlarını çevreleme davranışını modellemek için aşağıdaki denklemleri kullanır:

Avın etrafını kuşatmak için her bir kurt, alfa, beta ve delta kurtlarını takip eder.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \tag{3.10}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \tag{3.11}$$

Burada,

- $\vec{X}(t)$: Mevcut kurt pozisyonu,
- $\vec{X}(t+1)$: Güncellenmiş kurt pozisyonu,
- $\vec{X}_p(t)$: Avın (en iyi çözüm) pozisyonu,
- $\vec{D}$: Kurtların avı kuşatma aşamasında av ile olan mesafesini ifade eder.
- $\vec{A}$ ve $\vec{C}$: Katsayı vektörleri olup şu şekilde hesaplanır:

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r_1} - \vec{a} \tag{3.12}$$

$$a = \vec{2} - \frac{2t}{T} \tag{3.13}$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r_2} \tag{3.14}$$

- $\vec{a}$: İterasyon ilerledikçe 2→0 arasında azalır.
- $t$: $Mevcut\ iterasyon\ sayısıdır.$
- $T$: $Maksimum\ iterasyon\ sayısıdır.$

- $\vec{r_1}$ ve $\vec{r_2}$: [0,1] arasında rastgele değerlerdir.

Bu aşamada kurtlar, avın etrafında belirli bir yarıçap oluşturacak şekilde pozisyonlarını güncellemektedirler.

- **Avlanma**

Avlanma süreci, alfa, beta ve delta kurtlarının avın yerini belirlemeye çalışmasıyla gerçekleşmektedir. Diğer kurtlar, bu üç lider kurdun etrafında toplanır ve pozisyonlarını aşağıdaki ifadelere göre güncellemektedirler.

$$\vec{X_1} = \vec{X_\alpha} - \vec{A_1} \cdot |\vec{C_1} \cdot \vec{X_\alpha} - \vec{X}| \tag{3.14}$$

$$\vec{X_2} = \vec{X_\beta} - \vec{A_2} \cdot |\vec{C_2} \cdot \vec{X_\beta} - \vec{X}| \tag{3.15}$$

$$\vec{X_3} = \vec{X_\delta} - \vec{A_3} \cdot |\vec{C_3} \cdot \vec{X_\delta} - \vec{X}| \tag{3.16}$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X_1} + \vec{X_2} + \vec{X_3}}{3} \tag{3.17}$$

Burada,

- $\vec{X_\alpha}$, $\vec{X_\beta}$, $\vec{X_\delta}$ : Sırasıyla en iyi, ikinci en iyi ve üçüncü en iyi çözümlerin pozisyonlarıdır.
- $\vec{X}$: Mevcut kurt pozisyonudur.
- $\vec{X}(t+1)$: Kurt pozisyonunun güncellenmesini ifade etmektedir.

- **Sömürü**

Sömürü aşaması, kurtların avı kuşattığı ve avın konumuna odaklandığı süreçtir. Bu aşamada, kurtlar avın etrafında dar bir alanda yoğunlaşır ve avı ele geçirmeye çalışmaktadır. Sömürü aşamasında, |A|<1'dir. A parametresi, kurtların avın konumuna daha yakın bir şekilde hareket etmelerini sağlar. A parametresinin değeri bu aşamada 0'a yaklaşır. Bu durum, kurtların avın tam konumuna odaklanmasını sağlar. GKO'ya ait sözde kod aşağıda verilmiştir.

Sözde GKO kodu

**Girdi:**
*N* – Popülasyon büyüklüğü
*T* – Maksimum iterasyon
**Çıktı:**
*gbest* – Şimdiye kadar bulunan en iyi pozisyon (çözüm) - $X_\alpha$ (Alpha)

**Başlat**
Popülasyonu rastgele başlat: $X_i$ (i = 1,2 ….,N)
a ← 2 (Başlangıç Değeri)
t ← 1 (İterasyon Sayacı)
**Uygunluk Değerlendirmesi:**
Tüm kurtların uygunluk değerini hesapla
Alpha ($X_\alpha$), Beta ($X_\beta$) ve Delta ($X_\delta$) konumlarını belirle
**while** t ≤ T
  **for** i=1:N
    Kurt Pozisyonlarını Güncelle
    Optimizasyon parametrelerini güncelle
**Uygunluk Değerlendirmesi:**
Tüm kurtların uygunluk değerini hesapla
Alpha ($X_\alpha$), Beta ($X_\beta$) ve Delta ($X_\delta$) konumlarını belirle
    t ← t + 1
**end while**
**Bitir**

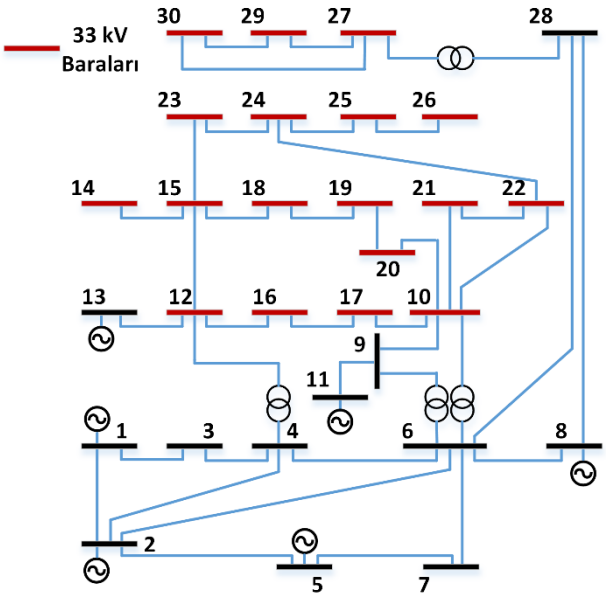
## 3.2 Test Sistemleri

AAS optimizasyonu için geliştirilen algoritmaların etkinliği, IEEE 30 Baralı ve 118 Baralı test sistemleri üzerinde incelenmiştir. Bu bölümde, söz konusu güç sistemlerine ilişkin temel bilgiler sunulmuştur.

### 3.2.1 IEEE 30 Baralı Test Sistemi

IEEE 30 baralı test sistemi, güç sistemleri analizinde yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Test sistemi 30 baradan, 41 hattan, 6 kaynaktan ve 4 transformatörden oluşmaktadır [161].

Sistemde, toplam 283,4 MW aktif güç talebi ve 126,2 MVAr reaktif güç talebi mevcuttur. Tez kapsamında geliştirilen AAS optimizasyon algoritmasının performans karşılaştırmasını yapabilmek amacıyla [4,8,14,17] numaralı çalışmalardaki referans değerler dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, 33 kV seviyesindeki baralardaki arıza akımları analiz edilmiştir. Ayrıca, kaynakların subtransient reaktans değerleri 0,01 p.u. olarak kabul edilmiştir. 33 kV seviyesindeki DK kapasitesi 10 kA olarak tanımlanmıştır. Test sistemi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.




**Şekil 3.3** IEEE 30 Baralı Test Sistemi

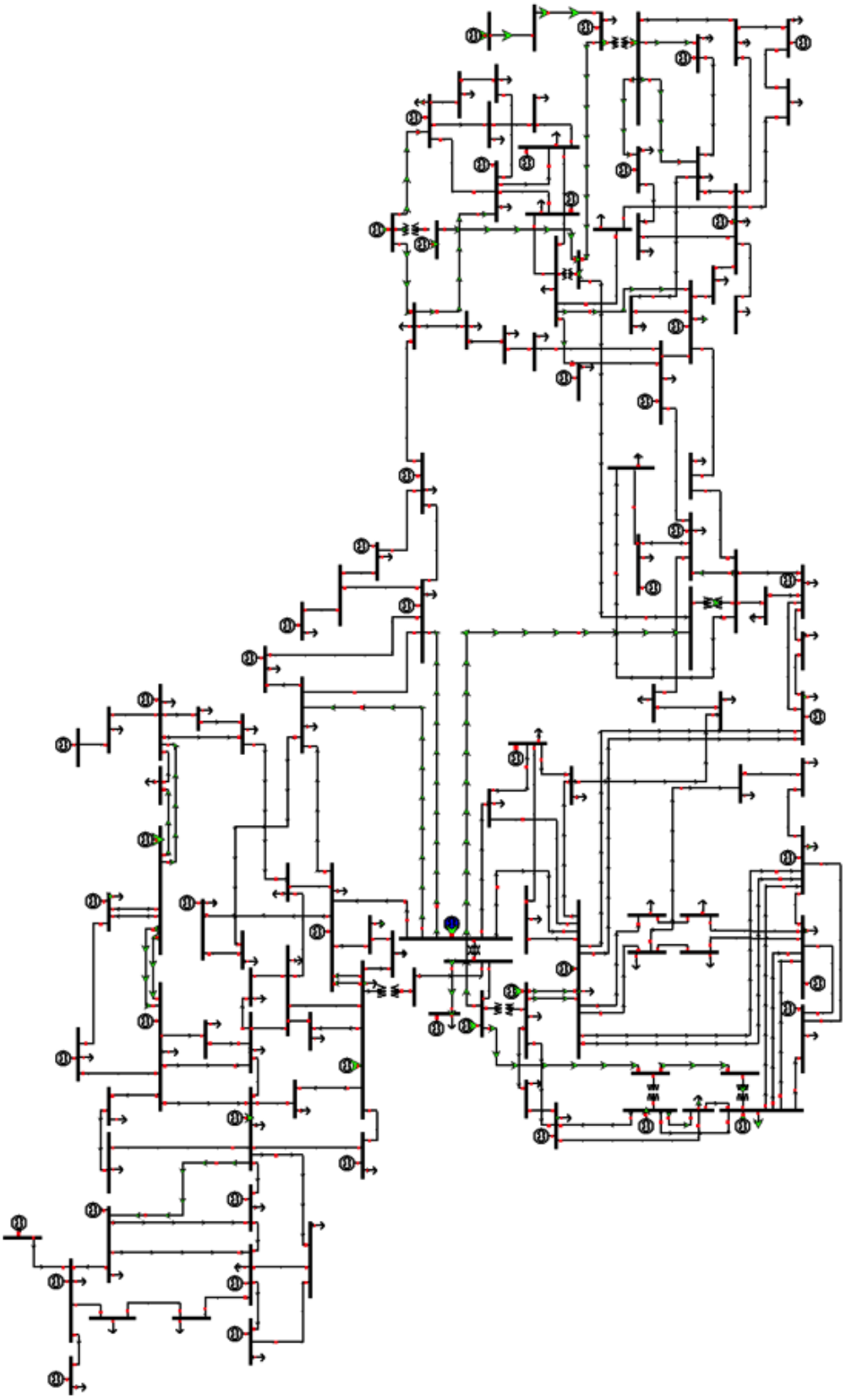
### 3.2.2 IEEE 118 Baralı Test Sistemi

IEEE 118 baralı test sisteminde, 19 adet güç kaynağı ve 186 iletim hattı bulunmaktadır. Baralardan 106 tanesi 138 kV, 11 tanesi 345 kV ve 1 tanesi 161 kV seviyesinde çalışmaktadır. Sistemin toplam aktif ve reaktif güç talebi sırasıyla 4242 MW ve 1438 MVAr olarak belirlenmiştir. Ayrıca, orijinal test sistemi için hesaplanan toplam aktif güç kaybı 132,863 MW olarak tespit edilmiştir [162].

Arıza akımı analizlerinde kullanılan kesici sınır değeri 25 kA olarak belirlenmiştir [5]. Kaynaklara ait subtransient reaktans değerleri Eşitlik (3.18) kullanılarak hesaplanmış ve 0,02 ile 0,25 p.u. arasında değerler almıştır.

$$X_i'' = \frac{0{,}02}{\sqrt{\frac{P_{Kaynak,i}}{P_{Tüm\ Kaynaklar}^{maksimum}}}} \tag{3.18}$$

IEEE 118 baralı test sistemi Şekil 3.4'te sunulmuştur.



**Şekil 3.4** IEEE 118 Baralı Test Sistemi

## 3.3 Optimizasyon Uygulaması

Tez çalışmasının bu bölümünde, gerçekleştirilen AAS optimizasyonuna yönelik, matematiksel altyapı, amaç fonksiyonları ve kısıtlar dahil olmak üzere oluşturulan optimizasyon problemleri açıklanmıştır. Ardından, elde edilen sonuçlar paylaşılarak değerlendirilmiştir.

### 3.3.1 Matematiksel Altyapı

#### 3.3.1.1 Arıza Akımlarının ve AAS'lerin Arıza Akımlarına Etkisinin Hesaplanması

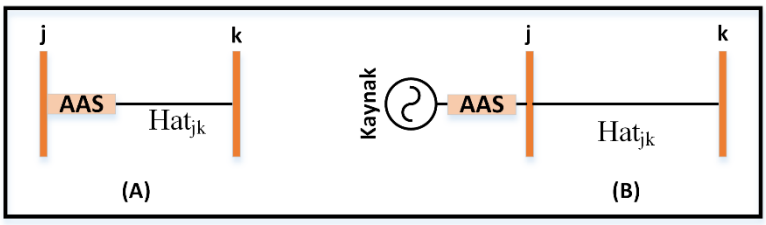
Elektrik güç sistemlerinde faz-toprak, faz-faz, iki faz-toprak, üç faz-toprak ve üç faz arızaları meydana gelebilmektedir. En sık meydana gelen arıza tipi faz-toprak olmasına rağmen, en şiddetli arıza akımları üç faz arızalarında ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, güç sistemlerine yönelik güvenlik ve süreklilik hesaplamaları üç faz arızaları esas alınarak yapılmaktadır. Buradan hareketle, tez kapsamında gerçekleştirilecek olan optimizasyon ve analiz çalışmalarında üç faz arızaları esas alınmıştır. Üç faz arıza akımları, aşağıdaki formüle göre hesaplanmakta ve arıza öncesi bara gerilimi ($U_0$) nominal sistem gerilimi olan 1 p.u. olarak kabul edilmektedir [4].

$$I_f = \frac{U_0}{Z_{nn}} \tag{3.19}$$

Yukarıdaki eşitlikte bulunan baralara ait self-empedans ($Z_{nn}$) değeri Eşitlik (3.20) kullanılarak elde edilmektedir [5].

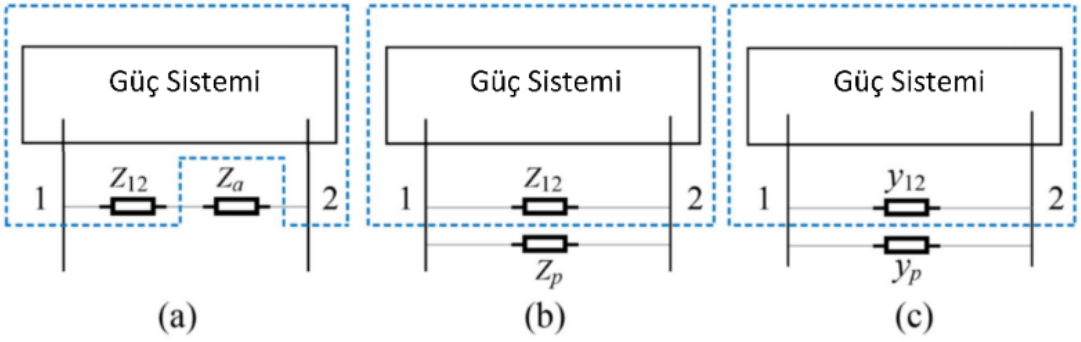
$$\boldsymbol{Y_0 \cdot Z_n = E_n} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{y_{11}} & \cdots & \boldsymbol{y_{1n}} & \cdots & \boldsymbol{y_{1N}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{y_{n1}} & \cdots & \boldsymbol{y_{nn}} & \cdots & \boldsymbol{y_{nN}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{y_{N1}} & \cdots & \boldsymbol{y_{Nn}} & \cdots & \boldsymbol{y_{NN}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{z_{1n}} \\ \vdots \\ \boldsymbol{z_{nn}} \\ \vdots \\ \boldsymbol{z_{Nn}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \vdots \\ \boldsymbol{1} \\ \vdots \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

Burada, $Y_0$ admittans matrisini, $Z_n$ empedans matrisi içerisinde arıza meydana gelen baranın bulunduğu sütunu ve $E_n$ ise sütun birim matrisi ifade etmektedir. Modellenen güç sistemine entegre edilen AAS'nin gösterdiği etki, $Y_0$ admittans matrisini güncelleyerek yansıtılmıştır. Gerçekleştirilen senaryolarda, AAS'ler iletim hattı başlarına ve/veya kaynak uçlarına seri bağlanmıştır. İlgili bağlantı şemaları Şekil 3.5'te sunulmuştur.




**Şekil 3.5** AAS Bağlantı Şekilleri (a) Hat Başına (b) Kaynak Ucuna Bağlı

AAS etkisi admittans matrisinin kompanzasyonu (modifikasyonu) ile elde edilmektedir. Buradan hareketle, AAS empedansına eş değer paralel admittans değeri elde edildiği takdirde, toplama işlemi ile admittans matrisinin güncellenmesi mümkün olacaktır. Buradan hareketle, AAS'lerin hat başlarına bağlandığı durumda, AAS ekipmanının empedansını ($Z_a$) yansıtacak eş değer paralel empedans ($Z_p$) elde edilmekte ve buradan $Y_0$'ın düzenlenmesinde kullanılacak AAS'ye ait eş değer paralel admittans ($y_{AAS}$) değeri hesaplanmaktadır. Bahsi geçen parametreleri gösteren bağlantı şekilleri ve hesaplama yöntemleri aşağıda sunulmuştur [5].




**Şekil 3.6** AAS Hat Bağlantısı (a) Seri (b) Paralel Eşdeğeri (c) Paralel Admittans Eşdeğeri [5]

Admittans matrisinin düzenlenmesinde kullanılacak olan eş değer paralel admittans ($y_{AAS}$) değeri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilmektedir.

$$z_{12} + z_a = (z_{12} \times z_p)/(z_{12} + z_p) \tag{3.21}$$

$$z_p = -({z_{12}}^2 + z_{12} \times z_a)/z_a \tag{3.22}$$

AAS'ye ait eş değer paralel empedans değeri elde edildikten sonra, yukarıdaki formül admittans formunda yazıldığında AAS ekipmanına ait paralel admittans değeri hesaplanmaktadır.

$$y_{AAS} = y_p = -y_{12}^2/(y_{12} + y_a) \tag{3.23}$$

Son olarak, bir veya birden çok AAS'nin hatlara seri bağlandığı durumda $Y_0$ matrisini düzenlemek için Eşitlik 3.24 kullanılarak $\boldsymbol{\Delta Y_{AAS_{Hat}}}$ güncelleme matrisi elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{-1} & \mathbf{-1} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{y_{AAS.1}} & & \\ & \ddots & \\ & & \boldsymbol{y_{AAS.n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{-1} & \mathbf{-1} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{\boldsymbol{T}} = \boldsymbol{\Delta Y_{AAS_{Hat}}} \tag{3.24}$$

AAS'ler, Şekil 3.5(b)'de gösterildiği gibi, kaynak bağlantı noktalarına yerleştirildiğinde, $Y_0$ admitans matrisinin ilgili kaynağa ait diyagonal elemanına etki etmektedir. Bu bağlantı noktalarındaki AAS etkisini sağlamak adına, kaynak bağlantı noktalarına yerleştirilen her bir AAS için $y_{kk}$ elemanı aşağıdaki Eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$y_{kk} = \frac{1}{X_i'' + Z_{AAS}} - \frac{1}{X_i''} \tag{3.25}$$

Burada, $y_{kk}$ AAS'lerin $Y_0$ matrisinin diyagonal elemanları üzerindeki etkisini temsil eden kompanzasyon terimini ifade etmektedir, $X_i''$, ilgili kaynağın sub-transient reaktansını, $Z_{aas}$ ise kullanılan AAS'nin empedansını temsil etmektedir.

Kaynaklara seri olarak yerleştirilen tüm AAS'ler için $y_{kk}$ elemanları hesaplandıktan sonra, Eşitlik (3.26)'da sunulan $\Delta Y_{AAS_{Gen}}$ kompanzasyon(güncelleme) matrisi oluşturulmaktadır.

$$\boldsymbol{\Delta Y_{AAS_{Gen}}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{y_{kk}} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

Son olarak, hatlara ve kaynak bağlantı noktalarına yerleştirilen AAS'lerin etkisi dikkate alınarak üç faz arızası meydana gelen baraların self empedans değerleri Eşitlik (3.27) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\left[\boldsymbol{Y_0} + \Delta \boldsymbol{Y_{AAS_{Hat}}} + \Delta \boldsymbol{Y_{AAS_{Gen}}}\right] \cdot \boldsymbol{Z_n} = \boldsymbol{E_n} \tag{3.27}$$

### 3.3.1.2 AAS Aday Lokasyonları İçin Hassasiyet Analizi

Optimizasyon çalışmalarında, arama alanının daraltılması, toplam hesaplama süresini azaltmak ve global optimum sonuçlara daha verimli bir şekilde ulaşmak açısından önemlidir. Analiz sırasında, değişken empedanslara sahip AAS'ler tüm aday konumlarda test edilir ve belirli bir j konumu (bir hat veya kaynak bağlantı noktası) için hedef baralardaki arıza akımlarının birim empedans başına azalış miktarı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$\text{Hassasiyet}_j = \frac{\sum_{Z_{AAS}=Z_{min}}^{Z_{max}} \left( \sum_{i=1}^{N_{bus}} \left( I_{fault,i}^{Baz} - I_{fault,i}^{AAS}(Z_{AAS}) \right) \right)}{\sum_{Z_{AAS}=Z_{min}}^{Z_{max}} Z_{AAS}} \tag{3.28}$$

Burada:

- $\text{Hassasiyet}_j$: j numaralı AAS aday lokasyonu için hesaplanan hassasiyet değeridir (kA/p.u.). Bu değer, ilgili lokasyondaki AAS'nin belirli bir empedans aralığında sağladığı ortalama arıza akımı azalmasını ifade etmektedir.
- $Z_{AAS}$: AAS'nin empedans değeridir (p.u.).
- $Z_{min}$ ve $Z_{maks}$: hassasiyet analizde kullanılann minimum ve maksimum AAS empedans değerleridir.
- $N_{bus}$: sistem genelindeki toplam bara sayısını ifade etmektedir.
- $I_{fault,i}^{Baz}$: baz durum için i numaralı baradaki arıza akımı değerini göstermektedir (kA).
- $I_{fault,i}^{AAS}(Z_{AAS})$: $Z_{AAS}$ empedansına sahip AAS devredeyken i numaralı baradaki arıza akımı değeridir (kA).
- İç Toplam ( $\sum_{i=1}^{N_{bus}}$ ): Belirli bir AAS empedans değerinde (ör. 0.1 p.u.) tüm baralardaki arıza akımı azalmasını toplar. Her empedans değeri için bu işlem tekrarlanmaktadır.

- Dış Toplam ($\sum_{Z_{AAS}=Z_{min}}^{Z_{max}}$ ): Bu dış toplam ise tüm empedans değerlerindeki arıza akımı azalmasını toplar. Kullanılan her empedans değerinde elde edilen tüm baralardaki arıza akımı azalma değerleri toplanmaktadır.
- Payda: Kullanılan empedans değerlerinin toplamıdır. Bu, arıza akımı azalmalarının ortalamasını almak için kullanılmakta ve empedans etkisini normalize etmektedir.

#### 3.3.1.3 Güç Sistemlerinde Aktif Güç Kayıplarının Hesaplanması

Bilindiği üzere, güç sistemlerinde arıza akımı seviyelerindeki artışın en temel sebeplerinden biri DÜ üretim entegrasyonunun hızlanmasıdır. Tez kapsamında oluşturulan optimizasyon senaryolarının bir bölümünde, güç sistemlerinde aktif güç kaybını göz önünde bulunduracak şekilde DÜ birimleri yerleştirilmiş ve elde edilen yeni sistem topolojisi için arıza akımlarının kontrol altına alınması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, AAS yerleşimi, bazı senaryolarda DÜ birimlerinin optimizasyonunu takiben ardışık olarak, bazı senaryolarda ise DÜ ve AAS'ların birlikte optimize edildiği eş zamanlı bir yaklaşım ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, elektrik güç sistemlerinde genel aktif güç kayıpları tüm baralar arasındaki etkileşimleri dikkate alacak şekilde Eşitlik (3.29)'a göre hesaplanmaktadır [163].

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} \sum_{j=1}^{N_{bus}} [\alpha_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j)] \tag{3.29}$$

Burada:

- $P_i, P_j$ ve $Q_i, Q_j$: i ve j numaralı baradaki aktif ve reaktif güç enjeksiyonlarıdır [MW, MVAr].
- $\alpha_{ij}$: $\frac{r_{ij}}{V_i V_j}\cos(\delta_i - \delta_j)$ ifadesine eşittir.
- $\beta_{ij}$: $\frac{r_{ij}}{V_i V_j}\sin(\delta_i - \delta_j)$ ifadesine eşittir.
- $V_i\angle\delta_i, V_j\angle\delta_j$ : i ve j numaralı baradaki fazör gerilimleri ifade etmektedir [V].
- $r_{ij}$: i ve j baraları arasındaki hattın direncini ifade etmektedir [Ω].
- $N_{bus}$: Güç sistemindeki toplam bara sayısını ifade etmektedir.

Güç sisteminin herhangi bir barasına bağlanmış P aktif gücündeki DÜ biriminin sahip olduğu reaktif güç Eşitlik (3.30) ve Eşitlik (3.31)'e göre hesaplanmaktadır.

$$Q_{DG_i} = a \cdot PD_{G_i} \tag{3.30}$$

$$a = (\mathrm{k}) \cdot \tan\left(\cos^{-1}\left(PF_{DG}\right)\right) \tag{3.31}$$

Burada, k katsayısı DÜ biriminin reaktif güç tükettiği durumda (-1) değerini alırken reaktif güç enjekte ettiği durumda (+1) değerini almaktadır.

Herhangi bir baraya DÜ birimi yerleştirildiğinde ilgili baraya ait aktif ve reaktif güç değerleri aşağıdaki gibi değişmektedir.

$$P_i = PD_{G_i} - PD_i \tag{3.32}$$

$$Q_i = Q_{DG_i} - QD_i = a \cdot PD_{G_i} - QD_i \tag{3.33}$$

$P_i$ ve $Q_i$ eşitlikleri Eşitlik (3.29)'da yerine yazıldığında, DÜ birimlerinin etkisini de göz önünde bulunduran aktif güç kaybı ifadesi aşağıdaki gibi elde edilmektedir [163]. Optimizasyon sürecinde, MATLAB ortamında oluşturulan çatı algoritmalara MATPOWER yazılımına ait komutlar entegre edilmiş olup, güç akışları ilgili yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

$$\begin{aligned} P_k = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \Big[ & \alpha_{ij} \left( \left(PD_{G_i} - PD_i\right) P_j + \left(a \cdot PD_{G_i} - QD_i\right) Q_j \right) \\ & + \beta_{ij} \left( \left(a \cdot PD_{G_i} - QD_i\right) P_j - \left(PD_{G_i} - PD_i\right) Q_j \right) \Big] \end{aligned} \tag{3.34}$$

### 3.3.1.4 Güç Sistemlerinde Ekonomik Fizibilitenin Hesaplanması

Optimizasyon senaryolarının yalnızca teknik açıdan değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da sürdürülebilir ve uygulanabilir olması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, oluşturulan optimizasyon problemlerinin bir bölümünde ekonomik analizler de göz önünde bulundurulmuştur. Bu analiz sayesinde, güç sistemine yapılan DÜ ve AAS yatırımlarının uzun vadede sisteme sağlayacağı mali katkılar değerlendirilmiştir.

Toplam ekonomik kazanç ($\Pi_{\text{total}}$), DÜ ve AAS yatırımları için gerekli sermaye maliyetleri, sistemin işletme ve bakım giderleri ile kayıp güçlerin azaltılması sonucu elde edilen yıllık ekonomik tasarruf dikkate alınarak Eşitlik (3.35) ile hesaplanmıştır.

$$\Pi_{\text{toplam}} = -\left(C_{yat,\,\text{DÜ}} \times P_{\text{DÜ}} + C_{AAS}\right) + N_{\text{yıl}} \cdot \Pi_{yıllık} \tag{3.35}$$

$$C_{AAS} = SM \times N_{AAS} + EM \sum_{i=1}^{N_{AAS}} Z_i \tag{3.36}$$

$$\Pi_{Yıllık} = S_{Yıllık} - C_{\text{İ\&B}_{Yıllık}} \tag{3.37}$$

$$S_{\text{Yıllık}} = \left(P_{kayıp}^{Baz} - P_{kayıp}^{\text{opt}}\right) \cdot C_{\text{enerji}} \cdot H_{\text{yıllık}} \tag{3.38}$$

$$C_{\text{İ\&B}_{Yıllık}} = \left(C_{\text{İB,DÜ}} \cdot P_{\text{DÜ}} \cdot H_{yıllık}\right) + C_{\text{İB,AAS}} \tag{3.39}$$

Burada:

- $\Pi_{\text{toplam}}$: Toplam ekonomik kazancı [$],
- $C_{\text{yat, DÜ}}$: Güç sistemine ilave edilen DÜ birimlerine ait ilk yatırım maliyetini [$],
- $P_{\text{DÜ}}$: Güç sistemine ilave edilen DÜ birimlerinin toplam aktif gücünü [MW],
- $C_{\text{AAS}}$: Güç sistemine bağlanan AAS'lerin ilk yatırım maliyetini [$],
- $N_{\text{yıl}}$: Ekonomik ömrü
- $\Pi_{\text{yıllık}}$: Yıllık karı [$],
- $S_{\text{Yıllık}}$: Yıllık geliri [$],
- $C_{\text{İ\&B}_{\text{Yıllık}}}$: Yıllık işletme bakım giderini [$],
- SM: AAS kurulumundaki sabit maliyeti [$],
- EM: AAS kurulumundaki empedans başına maliyeti [$/p.u.],
- $Z_{\text{i}}$: i. numaralı AAS'nin empedans değerini [p.u.],
- $P_{\text{kayıp}}^{\text{Baz}}$: Güç sisteminin baz durumundaki toplam aktif güç kaybını [MW],
- $P_{\text{kayıp}}^{\text{opt}}$: Güç sisteminin DÜ yerleşimi neticesinde elde edilen toplam aktif güç kaybını [MW],
- $C_{\text{enerji}}$: Elektrik enerjisi birim maliyetini [$/MWh],
- $H_{\text{yıllık}}$: Bir yıldaki toplam saati,
- $C_{\text{İB,DÜ}}$: Dağıtık üretim birimlerinin MWh başına işletme bakım maliyetini [$/MWh],
- $C_{\text{İB,AAS}}$: AAS'lerin yıllık işletme bakım maliyetini göstermektedir [$].

### 3.3.2 Optimizasyon Amaç Fonksiyonları ve Kısıtları

Tez çalışmasında, optimizasyon süreci birden fazla amaç fonksiyonu içermektedir. Her bir amaç fonksiyonu belirli senaryolara bağlı olarak farklı kısıtlamalara tabi tutulmaktadır. Aşağıdaki bölümlerde, kullanılan amaç fonksiyonları ve bunlara ait kısıtlar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

#### 3.3.2.1 Amaç Fonksiyonları

Optimizasyon çalışması sırasında göz önünde bulundurulan amaç fonksiyonlarından ilki AAS'lere ait yatırım maliyetinin (Eşitlik (3.36)) minimize edilmesidir.

$$f_1 = \min (C_{AAS}) \tag{3.40}$$

DÜ birimlerinin yerleşimini içeren senaryolarda, toplam güç kaybının (Eşitlik (3.34)) minimize edilmesi amaçlanmıştır.

$$f_2 = \min (P_k) \tag{3.41}$$

Simülasyon senaryolarının bir bölümünde göz önünde bulundurulan üçüncü ve son amaç fonksiyonu ise kurulu DÜ ve AAS birimlerinin işletme ömrü boyunca toplam ekonomik kazancı maksimize etmeyi hedeflemektedir. Bu kazanç, güç kayıplarındaki azalmadan elde edilmekte olup, aynı zamanda kesici sınır değerlerinin uygun AAS yerleşimi ve boyutlandırması ile ihlal edilmemesi koşulu da sağlanmaktadır.

$$f_3 = \max (\Pi_{toplam}) \tag{3.42}$$

#### 3.3.2.2 Optimizasyon Kısıtları

Bu bölümde, simülasyon çalışmaları sırasında amaç fonksiyonlarına uygulanan optimizasyon kısıtları açıklanmıştır.

- **AAS Optimizasyonu Kısıtları**

AAS optimizasyonunda uygulanan kısıtlar aşağıda sunulmuştur.

AAS'lere ait empedans ve toplam sayı değerleri önceden belirlenen minimum ve maksimum değerler içerisinde yer almalıdır.

$$C_1^{AAS}: N_{AAS}^{min} \leq N_{AAS} \leq N_{AAS}^{maks} \quad (3.43)$$

$$C_2^{AAS}: Z_{AAS,i}^{min} \leq Z_{AAS,i} \leq Z_{AAS,i}^{maks}, \quad \forall i \in \mathcal{N}_{AAS} \quad (3.44)$$

AAS'ler sadece hassasiyet analizi sonucunda belirlenen aday lokasyonlara yerleştirilebilir ve her aday lokasyonda sadece bir tane AAS bulunabilir.

$$C_3^{AAS}: L_{AAS} \in \mathcal{L}_{aday} \quad (3.45)$$

$$C_4^{AAS}: N_{AAS,i} \leq 1, \quad \forall i \in \mathcal{L}_{aday} \quad (3.46)$$

DK kapasitelerinin aşıldığı hedef baralarda AAS yerleşimi sonrası arıza akımları DK kapasitesinin altında olmalı.

$$C_5^{AAS}: I_{arıza,i} \leq I_{DK}^{Kapasite}, \quad \forall i \in \mathcal{B}_{hedeflenen} \quad (3.47)$$

Burada,

- $N_{AAS}^{maks}$ ve $N_{AAS}^{min}$: Maksimum ve minimum AAS sayısını,
- $Z_{AAS,i}^{maks}$ ve $Z_{AAS,i}^{min}$: Maksimum ve minimum AAS empedansını,
- $\mathcal{N}_{AAS}$: AAS kümesini,
- $L_{AAS}$ ve $\mathcal{L}_{aday}$: AAS lokasyonları ve aday lokasyon kümesini,
- $N_{AAS,i}$: i. Aday lokasyondaki AAS sayısını,
- $I_{arıza,i}$ ve $I_{DK}^{Kapasite}$: i baradaki arıza akımını ve DK kapasitesini ifade etmektedir.

➢ **DÜ Optimizasyonu Kısıtları**

DÜ birimlerinin optimizasyonunda uygulanan kısıtlar aşağıda sunulmuştur.

DÜ birimlerinin sayıları ile aktif ve reaktif güçleri belirlenen limitler dahilinde olmalıdır.

$$C_1^{DÜ}: P_{DÜ,i}^{min} \leq P_{DÜ,i} \leq P_{DÜ,i}^{maks}, \quad \forall i \in \mathcal{N}_{DÜ} \quad (3.48)$$

$$C_2^{DÜ}: Q_{DÜ,i}^{min} \leq Q_{DÜ,i} \leq Q_{DÜ,i}^{maks}, \quad \forall i \in \mathcal{N}_{DÜ} \quad (3.49)$$

$$C_3^{DÜ}: N_{DÜ}^{min} \leq N_{DÜ} \leq N_{DÜ}^{maks} \quad (3.50)$$

Her baraya en fazla bir adet DÜ birimi bağlanabilmektedir.

$$C_4^{D\ddot{U}}: N_{D\ddot{U},i} \leq 1, \qquad \forall i \in \mathcal{B}_{D\ddot{U}} \tag{3.51}$$

Burada,

- $P_{D\ddot{U},i}^{maks}, P_{D\ddot{U},i}^{min}$: Maksimum ve minimum aktif güç değerlerini,
- $Q_{D\ddot{U},i}^{maks}, Q_{D\ddot{U},i}^{min}$: Maksimum ve minimum reaktif güç değerlerini,
- $N_{D\ddot{U}}^{maks}$, $N_{D\ddot{U}}^{min}$ : Maksimum ve minimum DÜ birimini sayısını,
- $\mathcal{N}_{D\ddot{U}}$: DÜ setini,
- $\mathcal{B}_{D\ddot{U}}$: DÜ bağlı bara setini göstermektedir.

- **Güç Akışı Kısıtları**

Son olarak güç akışı için göz önünde bulundurulan kısıtlar aşağıdaki gibidir.

Güç akışı sırasında aktif ve reaktif güç dengesi sağlanmalıdır.

$$C_1^{GA}: P_{\ddot{u}retim,j} - P_{y\ddot{u}k,j} = \sum_{k \in B} V_j V_k Y_{jk} \cos\left(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}\right), \qquad \forall j \in \mathcal{B} \tag{3.52}$$

$$C_2^{GA}: Q_{\ddot{u}retim,j} - Q_{y\ddot{u}k,j} = \sum_{k \in B} V_j V_k Y_{jk} \sin\left(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}\right), \qquad \forall j \in \mathcal{B} \tag{3.53}$$

Bara gerilimleri tanımlanmış olan maksimum ve minimum değerler arasında yer almalıdır.

$$C_3^{PF}: V_j^{min} \leq V_j \leq V_j^{max}, \qquad \forall j \in \mathcal{B} \tag{3.54}$$

Tüm hatlarda taşıma kapasitesi aşılmamalıdır.

$$C_4^{PF}: S_{jk} \leq S_{jk}^{\max}, \quad \forall (j,k) \in \mathcal{L}_{hat} \tag{3.55}$$

Burada,

- $P_{\ddot{u}retim,j}$: j barasındaki toplam aktif güç üretimi (MW).
- $P_{y\ddot{u}k,j}$: j barasındaki toplam aktif güç tüketimi (yük) (MW).
- $Q_{\ddot{u}retim,j}$: j barasındaki toplam reaktif güç üretimi (MVAr).
- $Q_{y\ddot{u}k,j}$: j barasındaki toplam reaktif güç tüketimi (MVAr).

- $V_j$, $V_k$: Sırasıyla j ve k baralarındaki gerilim büyüklüğü (p.u.).
- $Y_{jk}$: j ve k baraları arasındaki admittans büyüklüğü (p.u.).
- $\theta_{jk}$: Bara j ile bara k arasındaki admittansın faz açısı (radyan).
- $\delta_j$, $\delta_k$: j ve k baralarının gerilim faz açıları (radyan).
- $\mathcal{B}$: Sistemdeki tüm baraları temsil eden küme.
- $V_j^{min}$, $V_j^{maks}$: j barası için izin verilen minimum ve maksimum gerilim değeri (p.u.).
- $\mathcal{L}_{hat}$: Hat kümesini ifade etmektedir.

### 3.3.3 Optimizasyon Prosedürü

Tez çalışmasında, güç sistemi problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan PSO, GA ve GKO algoritmaları ve çok amaçlı versiyonları olan Çok Amaçlı PSO (ÇAPSO, Çok Amaçlı GA (ÇAGA) ve çok amaçlı GKO (ÇAGKO) algoritmalarının ayrı ayrı entegre edilebildiği çatı optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir. Birden fazla algoritmanın kullanılmasının temel amaçları aşağıda sıralanmıştır:

- **Çözüm Kalitesi ve Sağlamlık**: Farklı algoritmalar, keşif ve sömürü açısından farklı güçlü yönlere sahiptir. Bu nedenle, geliştirilen çatı algoritma dahilinde birden fazla optimizasyon yöntemi kullanılarak yerel minimumlara sıkışma riskinin azaltılması amaçlanmış ve DÜ ile AAS'lerin daha etkin yerleştirilmesi sağlanmıştır.
- **Karşılaştırmalı Performans Analizi**: Farklı güç sistemi yapılarına göre algoritmaların yakınsama hızı ve çözüm doğruluğu açısından çatı algoritma içerisindeki verimliliği değerlendirilmiştir. Böylece, hangi algoritmanın hangi koşullarda daha etkili sonuçlar verdiği karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.
- **Farklı Amaç Fonksiyonlarıyla Uyum**: Bu çalışmada birden fazla amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu nedenle, kullanılan her bir optimizasyon tekniğinin farklı amaç fonksiyonları üzerindeki etkinliğinin gözlemlenmesi istenmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları 3 senaryodan oluşmaktadır. Bu senaryolar aşağıdaki gibidir:

**Senaryo 1 – DÜ ve AAS birimlerinin ardışık optimizasyonu:**

Bu senaryoda, optimizasyon iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, güç sistemindeki aktif güç kayıplarını minimize etmek amacıyla yalnızca DÜ yerleşimi ve boyutlandırmasına odaklanılmıştır. Elde edilen yeni sistem topolojisine göre ikinci aşamada, kısa devre akımlarını devre kesici sınırlarının altına düşürmek amacıyla AAS'lerin optimal yerleşimi ve boyutlandırması gerçekleştirilmiş ve bu süreçte toplam AAS maliyetinin minimum olması hedeflenmiştir.

**Senaryo 2 – DÜ ve AAS birimlerinin eş zamanlı optimizasyonu:**

Bu senaryoda, DÜ ve AAS yerleşimi birlikte ele alınarak çok amaçlı bir optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon sürecinde hem sistemdeki aktif güç kaybı hem de AAS maliyeti aynı anda minimize edilmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, söz konusu hedefler arasında oluşan dengeyi yansıtan bir Pareto optimal çözüm kümesi elde edilmiştir.

**Senaryo 3 – DÜ ve AAS birimlerinin eş zamanlı optimizasyonu (yatırım ve işletme maliyetleri dahil):**

Üçüncü senaryoda, ikinci senaryodaki çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı genişletilerek uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik boyutu da değerlendirmeye katılmıştır. Bu kapsamda, AAS ve DÜ birimlerine ilişkin yatırım, bakım ve işletme maliyetleri dikkate alınarak toplam yatırım karlılığı maksimize edilmesi hedeflenmiştir. Böylece yalnızca teknik performans değil, aynı zamanda ekonomik getiriler açısından da en uygun çözüm noktalarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Senaryo 1 ve Senaryo 2 kapsamında kullanılan amaç fonksiyonlarında herhangi bir doğrudan ekonomik parametre yer almamakla birlikte, her iki senaryoda elde edilen sistem topolojilerine ilişkin uzun vadeli yatırım karlılığı analizleri ayrı olarak hesaplanmıştır. Bu analizler, yatırım, bakım ve işletme maliyetleri gibi parametreler dikkate alınarak harici şekilde yürütülmüştür. Böylece, teknik odaklı optimizasyon senaryolarının ekonomik etkileri de değerlendirilmiş ve bu sonuçlar, doğrudan karlılık maksimizasyonunu hedefleyen Senaryo 3 ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

### 3.3.3.1 DÜ ve AAS Ardışık Optimizasyon Yaklaşımı

Bu bölümde, DÜ ve AAS birimlerinin ardışık optimizasyonunda kullanılan yaklaşım açıklanmıştır. Bu yöntemde, sistemin teknik ihtiyaçları doğrultusunda DÜ birimleri önce optimize edilmekte, ardından elde edilen sistem topolojisine bağlı olarak AAS birimleri yerleştirilmektedir. Bu iki aşamalı yaklaşım, önce güç kayıplarını azaltmaya, ardından kısa devre akımlarını sınırlandırmaya odaklanmaktadır

İlk aşamada, yalnızca DÜ birimlerinin yerleşimi ve boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Burada amaç, sistemin toplam aktif güç kaybını minimize etmektir. Kullanıcı tanımlı meta-sezgisel algoritmalar (örn. PSO, GA, GWO) ile aday DÜ konumları için çözümler oluşturulmakta ve her çözüm, tanımlı teknik kısıtlar altında değerlendirilerek en uygun konfigürasyon elde edilmektedir. Elde edilen nihai DÜ konfigürasyonu, AAS optimizasyon aşamasına giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Bu aşamada geliştirilen çatı algoritmaya ait sözde kod aşağıya paylaşılmıştır:

**DÜ Optimizasyon Çatı Algoritması**

**Girdi:** Güç sistemi verisi, Maksimum DÜ birimi sayısı ($N_{DÜ}^{max}$), Optimizasyon algoritması parametreleri, Kısıtlar

**for** deneme =1:toplam deneme
  Güç sistemi verilerini yükle
  Dü yerleşimi için aday konumları belirle
  Kullanılan arama (optimizasyon) algoritmasına ait parametreleri başlat
  Başlangıç popülasyonunu rastgele oluştur (lokasyon, güç, sayı)
  **for** iterasyon = 1: maksimum iterasyon
    **for** i=1:Birey Sayısı **do**
      DÜ yerleşimlerini, güçlerini ve toplam sayıyı belirle
      Her aday konumda sadece bir DÜ olduğunu kontrol et
      Amaç fonksiyonunu değerlendir
        $f_1$: $min(P_{kayıp})$
      **if** herhangi bir kısıt ihlali mevcutsa
        Amaç fonksiyonuna ($P_{kayıp}$) ceza uygula
      **end if**
    **end for**
    Global en iyiyi güncelle
    Kullanılan optimizasyon algoritması mekanikleri ile optimizasyon bireylerini güncelle
  **end for**
  En iyiçözüme ait yerleşim, güç ve toplam DÜ sayısı ile aktif güç kaybını elde et
**end for**

İkinci aşamada, DÜ optimizasyonu neticesinde elde edilen sistem üzerinde, AAS'lerin konumu, sayısı ve empedans değerleri optimize edilmektedir. Bu süreçte amaç, sistemdeki kısa devre akımlarını devre kesici sınırları altında tutmak koşuluyla, AAS maliyetini minimum seviyeye indirmektir.

Bu aşamada geliştirilen çatı algoritmaya ait ait sözde kod aşağıda sunulmuştur.

**AAS Optimizasyonu Çatı Algoritması**

**Girdi:** Güç sistemi verisi, Maksimum AAS sayısı ve empedans değeri, optimizasyon ayar parametreleri, Kısıtlar

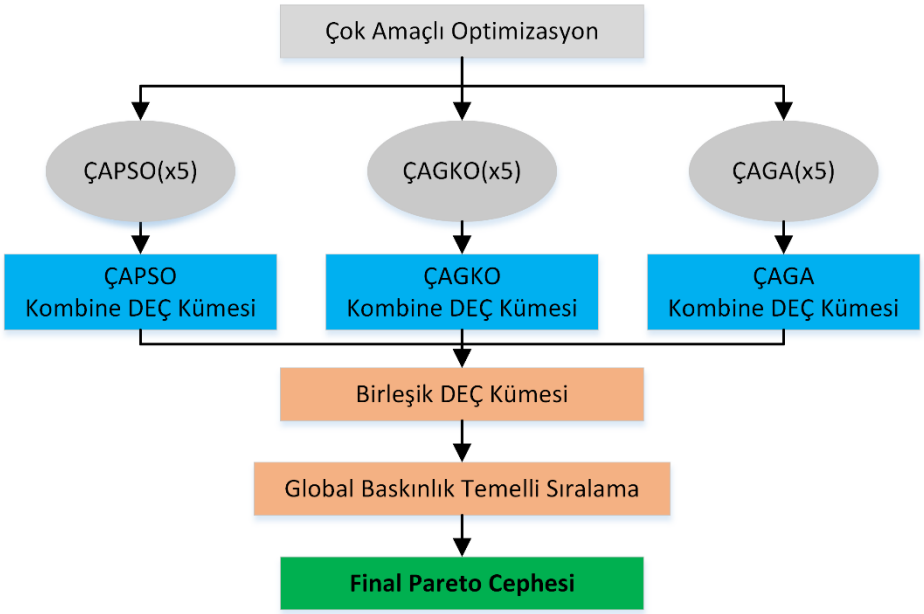
```
for deneme =1:toplam deneme
  Arıza akımlarını baz sistem için hesapla
  Hassasiyet analizi ile aday AAS lokasyonlarını belirle ve arama alanını daralt
  Başlangıç popülasyonunu rastgele oluştur (lokasyon, empedans, sayı)
  for iterasyon = 1:Maksimum İterasyon
    for i=1:Birey Sayısı
      AAS yerleşimlerini, empedanslarını ve toplam sayıyı belirle
      Aynı hatta veya kaynak barasında birden fazla AAS olup olmadığını kontrol et
      AAS yerleşimi ile Y-Barayı güncelle
      Yeni Y-Bara ile bara arıza akımlarını hesapla
      AAS maliyetini hesapla
      (3.43)-(3.47) aralığındaki eşitliklerde belirtlen kısıtları kontrol et
      if herhangi bir kısıt ihlali mevcutsa
        Amaç fonksiyonuna (AAS maliyetinin minimizasyonu) ceza uygula
      end if
    end for
    Global en iyiyi güncelle
    Kullanılan optimizasyon mekanizması ile optimizasyon bireylerini güncelle
  end for
  En iyi çözüme ait yerleşim, empedans, toplam AAS saysı ve maliyetini elde et
end for
```

### 3.3.3.2 DÜ ve AAS Çok Amaçlı (Eş Zamanlı) Optimizasyon Yaklaşımı

Eş zamanlı optimizasyon yaklaşımı Senaryo 2 ve Senaryo 3 dahilinde kullanılmıştır. Senaryo 2'de yalnızda aktif güç kayıpları ve AAS maliyetleri göz önünde bulundurulurken, Senaryo 3'de, Senaryo 2'ye ek olarak uzun vadeli yatırım karlılığı da dikkate alınmıştır.

Eş zamanlı DÜ ve AAS optimizasyonunu göz önünde bulunduran çok amaçlı optimizasyon senaryolarında, çatı algoritma her bir optimizasyon algoritması (PSO, GA, GKO, ÇAPSO, ÇAGA ÇAGKO) için beş kez bağımsız olarak çalıştırılmış ve çözümlerdeki rastlantısallık ile çeşitlilik dikkate alınmıştır. Her algoritmanın beş kere çalışmasından elde edilen domine edilemeyen çözümler (non-dominated solutions) birleştirilerek, o algoritmaya ait final domine edilemeyen çözümler (DEÇ) kümesi oluşturulmuştur.

Ardından, her algoritma için elde edilen bu DEÇ kümeleri birleştirilmiş ve global domine edilemeyen çözümler kümesini elde edebilmek adına son bir baskınlık temelli sıralama (non-dominated sorting) uygulanmıştır. Bu yöntem ile çözüm çeşitliliğinin artırılması ve gerçek Pareto cephesine daha yakın çözümler elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu sürece ait akış şeması Şekil 3.7'de paylaşılmıştır.




**Şekil 3.7** Çok Amaçlı Optimizasyon Çalışmalarında Takip Edilen Prosedür

Domine edilemeyen çözümler ve baskınlık temelli sıralama kavramları aşağıda açıklanmıştır.

- **Domine Edilemeyen Çözüm**

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, bir çözümün kalitesi yalnızca tek bir ölçüte göre değil, birden fazla amaca göre değerlendirilmektedir. Bu tür durumlarda, "en iyi" çözüm kavramı yerine Pareto optimalite yaklaşımı kullanılmaktadır [164].

Bir çözüm, başka hiçbir çözüm tarafından tüm amaç fonksiyonları bakımından daha iyi değilse, domine edilemeyen çözüm olarak adlandırılmakta olup bu tür çözümlerden oluşan küme ise Pareto cephesi olarak ifade edilmektedir [164].

Matematiksel olarak, $x^a$ ve $x^b$ gibi iki çözüm için aşağıdaki baskınlık kriteri tanımlanmaktadır:

$$x^a \prec x^b \Leftrightarrow \begin{cases} f_i(x^a) \leq f_i(x^b) & \text{her } i \in \{1,2,\ldots,M\} \text{ için,} \\ & \text{ve} \\ f_j(x^a) < f_j(x^b) & \text{en az bir } j \text{ için.} \end{cases} \tag{3.56}$$

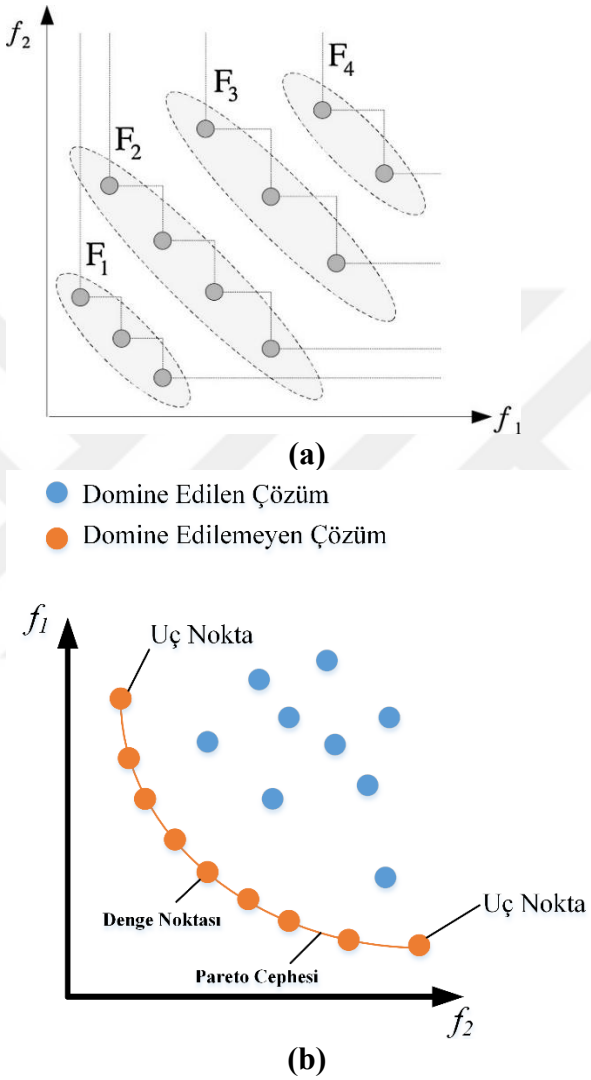
Burada:

- $x^a$ ve $x^b$: İki farklı çözümü,
- $f_i$ ve $f_j$: i. ve j. amaç fonksiyonlarını,

- M: Toplam amaç fonksiyonunu ifade etmektedir.

➢ **Baskınlık Temelli Sıralama**

Baskınlık temelli sıralama işlemi, popülasyondaki çözümleri baskınlık düzeylerine göre sıralamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu sıralama şu adımlarla gerçekleştirilir [165]:




**Şekil 3.8** Pareto Cephesi Örnekleri (a) 12 Çözüm ve 4 Pareto Cephesinden Oluşan Örnek Çözüm Kümesi [165] (b) Analizlerde Kullanılan Çözümlere Ait Örnek Gösterim

Birinci Seviye (Pareto Cephesi): Hiçbir çözüm tarafından baskılanmayan (domine edilemeyen) tüm çözümler belirlenir ve birinci öncelikli küme $F_1$ olarak etiketlenir.

İkinci Seviye: Sadece $F_1$ tarafından baskılanan çözümler belirlenir ve ikinci küme $F_2$ olarak işaretlenir.

Bu işlem, tüm çözümler sınıflandırılana kadar tekrarlanır ve seviyelerine göre Pareto cepheleri elde edilmiş olur ve her çözüm bir öncelik seviyesi ile Şekil 3.8 (a)'da görüldüğü gibi sınıflandırılmış olur.

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere, Senaryo 1 ve Senaryo 2 için ekonomik değerlendirmeler optimizasyon sürecinin dışında, ayrı olarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle Senaryo 2'de, çok amaçlı optimizasyon sonucu elde edilen Pareto cephesi, birbirinden farklı sistem davranışlarını temsil eden çok sayıda çözüm noktası içermektedir. Ancak ekonomik analizlerin uygulanabilmesi için bu çözümler arasından belirli noktaların seçilmesi gerekmektedir.

**Çok Amaçlı ve Eş zamanlı DÜ ve AAS Optimizasyonu Çatı Algoritması**

**Girdi:** Güç sistemi verisi, maks. DÜ ve AAS sayısı ($N_{Dü}^{maks}$-$N_{AAS}^{maks}$), Optimizasyon Algoritması Parametreleri

**for** deneme = 1: maksimum deneme sayısı
  Seçilen güç sistemine ait verileri yükle
  DÜ yerleşimi için aday baraları tanımla
  Kullanılan optimizasyon algoritmasına yönelik parametreleri tanımla
  Optimizasyon popülasyonunu tanımlı olan sınırlar dahilinde oluştur
  **for** iterasyon = 1 : maksimum iterasyon
    **for** her paçacık (ÇAPSO), kromozom (ÇAGA)veya gri kurt (ÇAGKO)
      AAS ve DÜ birimlerinin konum, boyut ve toplam sayılarını çözümle
      DÜ ve AAS yerleşimlerinin benzersiz ve sınırlar dahilinde olmasını sağla
      Güç akışı analizi gerçekleştir ve aktif güç kaybını ($P_k$) hesapla
      Hassasiyet analizi gerçekleştir ve AAS yerleşimi için arama alanını daralt
      AAS konum değişkenlerini duyarlılık analizi sonuçlarına göre yeniden ölçeklendir
      $Y_0$ matrisini DÜ ve AAS yerleşimlerine göre güncelle
      Güncellenen $Y_0$ ile bara arıza akımlarını hesapla ve DK kapasite aşımlarını kontrol et
      Amaç fonksiyonlarını değerlendir
        Aktif güç kaybı minimizasyonu ($P_k$)
        AAS maliyeti minimizasyonu ($C_{AAS}$)
      Kısıtları kontrol et:
        3.43-3.52 aralığındaki eşitlikler
      **if** herhangi bir kısıt ihlali **then**
        Amaç fonksiyonlarına ceza uygula
      **end if**
      **if** Senaryo = 3 **then**
        Yatırım ve işletme&bakım maliyetlerini hesapla
      Amaç fonksiyonunu değerlendir:
        Taplam karlılığın maksimizasyonu ($\Pi_{total}$)
      **end if**
    **end for**
    Parçacıkları (ÇAPSO), kromozomları (ÇAGA) veya gri kurtları (ÇAGKO) güncelle
    Domine edilemeyen çözümlerle Pareto çözüm havuzunu güncelle
  **end for**
  Pareto optimal çözüm havuzundan pareto-optimal çözümleri kaydet
**end for**
Her denemey ait tüm pareto-optimal çözümleri birleştir
Birleştirilmiş Pareto-optimal çözümlere baskınlık temelli sıralama (non-dominated sorting) uygula ve nihai çözüm kümesini elde et.

**Çıktı:** Optimal DÜ ve AAS parametreleri ile bunlara karşılık gelen amaç fonksiyonu değerlerini içeren nihai Pareto ön cephesi

Bu doğrultuda, Şekil 3.8 (b)'de gösterildiği gibi, Pareto cephesi üzerinde üç karakteristik çözüm belirlenmiştir:

- Her iki uçta yer alan uç noktalar, sırasıyla yalnızca bir amacın baskın olarak optimize edildiği çözüm yapılarını temsil etmektedir.
- Bu iki uç arasında yer alan ve Pareto cephesinin geometrik merkezine en yakın nokta, denge noktası olarak tanımlanmış ve her iki amacın dengeli biçimde optimize edildiği bir çözüm olarak değerlendirilmiştir.

Belirlenen bu üç çözüm üzerinden yatırım, işletme ve bakım maliyetleri dikkate alınarak ekonomik analizler gerçekleştirilmiş; böylece Senaryo 2'ye ait teknik çözümlerin ekonomik yönleri de karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

Son olarak, eş zamanlı DÜ ve AAS yerleşimi ve boyutlandırmasını içeren çok amaçlı optimizasyon çalışmalarında kullanılan çatı algoritmaya yönelik sözde kod yukarıda sunulmuştur.

- **Değişken Yapısı**

Tez kapsamında gerçekleştirilen tek amaçlı (Senaryo 1) ve çok amaçlı optimizasyon (Senaryo 1 ve Senaryo 2) çalışmalarında kullanılan değişken yapıları Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Şekil 3.9 (a), tek amaçlı optimizasyon problemlerinde kullanılan değişken yapısını ifade etmektedir. Bu yapıda, toplam karar değişkeni sayısı aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir:

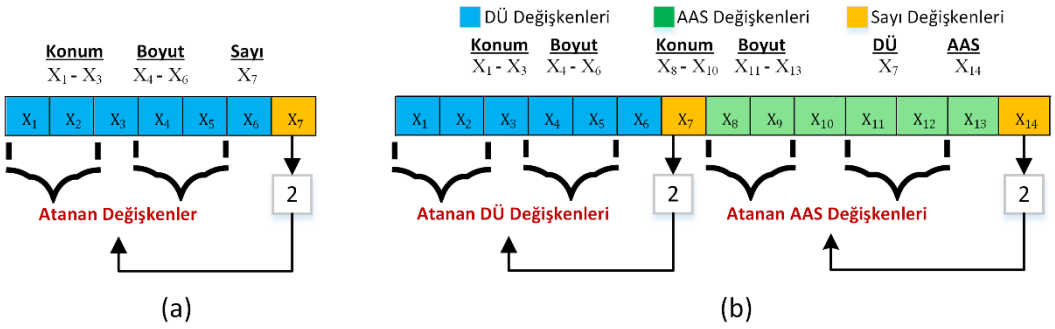
$$n_{var} = 2xN^{max} + 1, \tag{3.57}$$

Burada, $N^{max}$ tek amaçlı optimizasyon senaryolarında yerleştirilebilecek maksimum AAS veya DÜ birimi sayısını ifade etmektedir.

Şekil 3.9 (a)'da, maksimum üç birimin yerleştirilebildiği bir senaryoda yalnızca iki birimin kullanıldığı örnek gösterilmiştir. Bu kapsamda;

- $X_1$–$X_3$: Konum değişkenleri,
- $X_4$–$X_6$ Büyüklük (empedans veya güç) değişkenleri,
- $X_7$: Kurulacak toplam DÜ veya AAS birimi sayısını belirleyen değişkendir.

Bu yapı sayesinde, kurulu birim sayısı da optimizasyon algoritması tarafından karar verilen bir parametre haline getirilmiştir.




**Şekil 3.9** Karar Değişkeni Yapısı (a) Tek Amaçlı Optimizasyon (b) Çok Amaçlı Optimizasyon

Diğer yandan, Şekil 3.9 (b) önerilen çok amaçlı algoritmanın değişken yapısını göstermektedir. Bu yapı, AAS yerleşimi ile arıza akımlarının kontrol edildiği senaryolarda DÜ yerleşimi ile güç kayıplarının da azaltılmasının amaçlandığı ve güç sisteminin ekonomik performansın artırılmasının amaçlandığı optimizasyon problemlerinde DÜ ve AAS birimlerinin eş zamanlı olarak optimize edilmesini sağlamaktadır.

Toplam karar değişkeni sayısı aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir:

$$n_{var} = 2xN_{DÜ}^{maks} + 2xN_{AAS}^{maks} + 2 \tag{3.58}$$

Burada, $N_{DÜ}^{maks}$ ve $N_{AAS}^{maks}$ yerleştirilebilecek maksimum birim sayısını ifade etmektedir.

Bu değişken yapısı aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- $X_1$–$X_3$: DÜ konum değişkenleri
- $X_4$–$X_6$: DÜ güç değişkenleri
- $X_8$–$X_{10}$: AAS konum değişkenleri
- $X_{11}$–$X_{13}$: AAS empedans değişkenleri
- $X_7$: Kurulacak DÜ birim sayısını belirleyen değişken
- $X_{14}$: Kurulacak AAS birim sayısını belirleyen değişken

Şekil 3.9 (b), en fazla üç DÜ ve üç AAS biriminin kurulabildiği bir sistemde, her iki birimden de ikişer adet yerleştirildiği bir örnek senaryoyu temsil etmektedir. Bu

yapı sayesinde, güç sisteminin teknik ve ekonomik performansı çok amaçlı bir yapı içerisinde birlikte optimize edilebilmektedir.

### 3.3.4 AAS Yerleşim ve Boyutlandırma Stratejisinin Uygulamalı Tanıtımı ve AAS Çeşitlerinin Ekonomik Karşılaştırılması

Bu bölümde, tez çalışmasında ele alınan optimizasyon senaryolarının bazını oluşturan AAS yerleşim ve boyutlandırma stratejisi IEEE 30 Baralı test sistemi üzerinde uygulamalı olarak tanıtılmıştır. Optimizasyon yaklaşımının temel amacı AAS maliyetini ($C_{AAS}$) minimize etmek olup, Eşitlik (3.43) ve Eşitlik (3.47) arasındaki ifadeler dikkate alınmıştır (d.a). AAS optimizasyon stratejisi matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{cases} AAS\ Yerleşimi\ ve\ Boyutlandırması \\ \boldsymbol{Minimize}\ \{C_{AAS}\} \\ d.a \\ C_1^{AAS} - C_5^{AAS}\ Eşitlik\ (\ (3.43) - (3.47)\ ) \end{cases} \tag{3.59}$$

Bu bölümde gerçekleştirilen optimizasyonda çatı algoritmaya PSO arama algoritması dahil edilmiştir. PSO algoritmasına ait ayar parametreleri aşağıdaki gibidir.

**Tablo 3.1** PSO Ayar Parametreleri

| **Parametre** | **Değer** |
|---|---|
| Popülasyon Büyüklüğü | 100 |
| Maksimum İterasyon | 300 |
| c1 – Bilişsel Katsayı | 2,8 |
| c2 – Sosyal Katsayı | 1,8 |
| Maksimum Atalet | 0,9 |
| Minimum Atalet | 0,2 |

### 3.3.4.1 IEEE 30 Baralı Test Sistemi için AAS Optimizasyonu

30 baralı test sisteminde literatüre uygunluk açısından, mevcut 6 kaynağın sub-transient reaktans değerleri 0,01 p.u. olarak kabul edilmiştir. Yapılan arıza analizi neticesinde 10-12-15-17-21-22 numaralı baralardaki arıza akımlarının devre kesici kapasitesi olan 10 kA'i aştığı belirlenmiştir. Önerilen algoritmanın sonuçlarını literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırabilmek adına ilk aşamada endüktif AAS (X-AAS) yerleşimi yapılmıştır. Belirtilen hedef baralar için hassasiyet analizi yapıldığında elde edilen aday lokasyonlar Tablo 3.2'de paylaşılmıştır.

**Tablo 3.2** X-AAS Yerleşimi İçin Hassasiyet Analizi Sonuçları

| | **Hedef Baralar** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **10** | **12** | **15** | **17** | **21** | **22** |
| **Aday Hatlar** | 14 | 16 | 18 | 26 | 27 | 14 |
| | 13 | 15 | 16 | 14 | 14 | 29 |
| | 12 | 14 | 15 | 21 | 29 | 27 |
| **Toplam** | 12 – 13 – 14 – 15 – 16 – 18 – 21 – 26 – 27 – 29 | | | | | |

AAS maliyeti hesaplamalarında Tablo 3.3'te paylaşılan maliyet değerleri esas alınmıştır.

**Tablo 3.3** AAS Maliyet Değerleri

| **Referans** | **Tür** | **SM (Milyon $)** | **EM (Milyon $/p.u.)** |
|---|---|---|---|
| [4] | X-AAS | 1 | 1 |
| [17] | R-AAS | 0,40 | 0,15 |
| | X-AAS | 0,45 | 0,10 |

Optimizasyon sonucunda, iki adet AAS, sırasıyla 0,5421 p.u. ve 1,3195 p.u. empedans değerleriyle 14. ve 16. hatlara yerleştirilmiştir. Bunun sonucunda, hedef baralardaki arıza akımları başarıyla 10 kA sınırının altına düşürülmüştür.

**Tablo 3.4** Kurulan AAS'ler ve Literatürdeki Çalışmalar ile Maliyet Karşılaştırması

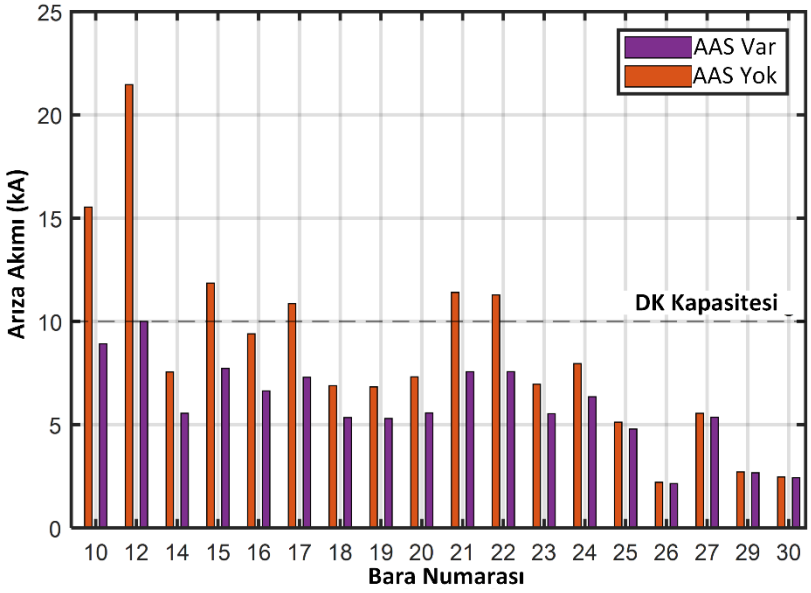
| **Hat** | **Kurulan AAS'ler (p.u.)** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | [14] | [8] | [17] | [4] | **Önerilen Çatı Algoritma** |
| 14 | 1 | - | 0,36 | 0,33 | 0,5421 |
| 26 | 0,8 | - | - | - | - |
| 15 | 0,6 | 0,53 | 0,24 | 0,29 | - |
| 16 | 0,7 | - | 0,39 | 0,43 | 1,3195 |
| 12 | 0,8 | 0,91 | - | - | - |
| 13 | - | 0,79 | - | - | - |
| **Maliyet (Milyon $)**[4] | 8,9 | 5,23 | 3,99 | 4,05 | 3,86 |
| **Maliyet (Milyon $)**[17] | 2,64 | 1,573 | 1,449 | 1,455 | 1,0861 |

Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te gösterildiği üzere, önerilen çatı algoritma yalnızca 2 adet AAS kullanarak kesici sınırlarının altında arıza akımları elde etmeyi başarmıştır. Bu durum, 5 AAS kullanılan [14] ve 3 AAS kullanılan [8], [17] ve [4] numaralı referanslarla karşılaştırıldığında, yöntemin daha az ekipmanla daha etkili sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

**Tablo 3.5** Bara Arıza Akımlarının X-AAS Yerleşimi Öncesi ve Sonrası Karşılaştırması

| Bara | Arıza Akımları (kA) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | [14] | | [4] | | Önerilen Çatı Algoritma | |
| | AAS Yok | AAS Var | AAS Yok | AAS Var | AAS Yok | AAS Var |
| 10 | 15,068 | 9,995 | 15,906 | 9,999 | 15,536 | 8,915 |
| 12 | 14,267 | 9,956 | 21,539 | 9,532 | 21,466 | 9,999 |
| 15 | 11,492 | 9,666 | 11,910 | 7,683 | 11,855 | 7,723 |
| 17 | 11,066 | 5,304 | 10,995 | 7,821 | 10,856 | 7,295 |
| 21 | 12,479 | 9,483 | 11,597 | 8,268 | 11,401 | 7,563 |
| 22 | 12,179 | 9,396 | 11,472 | 8,251 | 11,281 | 7,566 |

Tablo 3.5'te, [8] ve [17] numaralı çalışmalarda arıza akımı değerleri orijinal makalelerde belirtilmediği için karşılaştırma yapılamamaktadır. Tablo incelendiğinde, hedef baralardaki arıza akımları %32,80 ile %53,41 arasında azaltıldığı görülmektedir.




**Şekil 3.10** X-AAS Öncesi ve Sonrası Bara Arıza Akımları

Son olarak, 33 kV baralara ait tüm arıza akımı değerleri, AAS öncesi ve sonrası durumlar için Şekil 3.10'da sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere, 33 kV

baralardaki arıza akımları, referans çalışmalara kıyasla daha düşük maliyetle kesici sınırlarının altına indirilebilmiştir.

- **Rezistif AAS (R-AAS) ve Endüktif AAS (X-AAS) Karşılaştırması**

Bu bölümde, rezistif (R-AAS) ve endüktif (X-AAS) tipteki AAS'lerin karşılaştırmalı bir analizi gerçekleştirilerek hangi AAS tipinin arıza akımı sınırlama açısından en uygun maliyetli çözümü sunduğunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Karşılaştırma için Tablo 3.3'te sunulan [17] numaralı çalışmadan alınan sabit ve empedans maliyet değerleri kullanılmıştır.

R-AAS optimizasyonu için belirlenen aday hatlar, Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Tablo 3.6'dan görüleceği üzere, R-AAS'ler için belirlenen aday hatlar, Tablo 3.2'de sunulan X-AAS aday hatlarından farklılık göstermektedir.

**Tablo 3.6** R-AAS Yerleşimi İçin Hassasiyet Analizi Sonuçları

| | **Hedef Baralar** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **10** | **12** | **15** | **17** | **21** | **22** |
| **Aday Hatlar** | 14 | 16 | 18 | 26 | 27 | 14 |
| | 13 | 15 | 16 | 14 | 14 | 29 |
| | 16 | 14 | 15 | 19 | 29 | 27 |
| **Toplam** | 13 – 14 – 15 – 16 – 18 – 19 – 26 – 27 – 29 | | | | | |

R-AAS optimizasyonu sonucunda, 0,3677 p.u. ve 0,7497 p.u. empedansa sahip iki AAS, sırasıyla hat 14 ve hat 16 üzerine yerleştirilmiştir. R-AAS kullanımının, baralardaki arıza akımlarını kesici sınırlarının altına indirmek için daha ekonomik bir çözüm sunduğu görülmüştür. Yerleştirilen AAS'lere ilişkin özet bilgiler ve ilgili maliyetler Tablo 3.7'de sunulmuştur.

**Tablo 3.7** Kurulan AAS'lerin Konum ve Empedans Bilgileri

| **Hat** | **Kurulan AAS'ler (p.u.)** | |
|---|---|---|
| | **X-AAS** | **R-AAS** |
| 14 | 0,5421 | 0,3677 |
| 16 | 1,3195 | 0,7497 |
| **Toplam Maliyet (Milyon $)** | 1,0861 | 0,9676 |

Tablo 3.7'de görüldüğü üzere, R-AAS optimizasyonu sonucunda yerleştirilen AAS'ler için toplam maliyet, X-AAS'e kıyasla bir miktar daha düşük gerçekleşmiştir. Ayrıca, her iki AAS tipinde de ilgili hatlara yerleştirilen empedans değerleri sistemin arıza akımlarını sınırlandırmada etkin olmuştur

### 3.3.4.2 IEEE 118 Baralı Test Sistemi için AAS Optimizasyon Uygulaması

Önerilen AAS yerleşim yaklaşımının farklı güç sistemlerinde de geçerliliğini göstermek adına, IEEE 30 Baralı test sistemin ek olarak, IEEE 118 Baralı test sistemi de optimizasyon uygulamalarına dahil edilmiştir. IEEE 118 Baralı test sisteminin baz halinde yapılan arıza analizinde 49-66-69-80-89 numaralı baralarda 25 kA olan devre kesicisi sınırının aşıldığı görülmektedir.

Bu baralar için hassasiyet analizi gerçekleştirildiğinde, hem X-AAS hem de R-AAS için ortak aday lokasyonlar elde edilmiştir. Belirlenen aday lokasyonlar Tablo 3.8'de sunulmuştur.

**Tablo 3.8** X-AAS ve R-AAS için Hassasiyet Analizi Sonuçları

| | **Hedef Baralar** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **49** | **66** | **69** | **80** | **89** |
| **Aday Lokasyonlar** | $Gen_{@Bara49}$<br>H98<br>H99 | $Gen_{@Bara66}$<br>H102<br>H98 | $Gen_{@Bara69}$<br>H107<br>H104 | $Gen_{@Bara80}$<br>H127<br>H126 | $Gen_{@Bara89}$<br>H141<br>H142 |
| **Toplam** | H98 – H99 – H102 – H104 – H107 – H126 – H127 – H141 – H142 – $Gen_{@Bara49}$ – $Gen_{@Bara66}$– $Gen_{@Bara69}$– $Gen_{@Bara80}$– $Gen_{@Bara89}$ | | | | |

Optimizasyon neticesinde yerleştirilen AAS'lerin konumları Tablo 3.9'da paylaşılmıştır.

**Tablo 3.9** Kurulan X-AAS ve R-AAS'lere Ait Konum, Empedans ve Maliyet Değerleri

| **Lokasyon** | **Kurulan AAS'ler (p.u.)** | |
|---|---|---|
| | **X-AAS** | **R-AAS** |
| $Gen_{@Bara89}$ | 0,00076 | 0,0057 |
| $Gen_{@Bara80}$ | 0,0296 | 0,0204 |
| $Gen_{@Bara69}$ | 0,1083 | 0,0576 |
| $Gen_{@Bara66}$ | 0,2632 | 0,1212 |
| **Toplam Maliyet (Milyon $)** | 3,1607 | 2,9024 |

Bu güç sisteminde, AAS'ler devre kesicisi kapasitesinin aşıldığı baralarda kaynak uçlarına yerleştirilmiştir. X-AAS ve R-AAS'lere ait yerleşim konumları aynı olmakla birlikte ekonomiklik açısından R-AAS ön plana çıkmaktadır. AAS öncesi ve sonrası elde edilen bara arıza akımları Tablo 3.10'da sunulmuştur.

**Tablo 3.10** Bara Arıza Akımlarının X-AAS ve R-AAS Yerleşimi Öncesi ve Sonrası Karşılaştırması

| | Arıza Akımları (kA) | | |
|---|---|---|---|
| **Bara** | **AAS Yok** | **R-AAS** | **X-AAS** |
| 49 | 27,184 | 25,000 | 25,000 |
| 66 | 33,160 | 17,514 | 17,531 |
| 69 | 32,142 | 17,058 | 15,278 |
| 80 | 31,503 | 24,957 | 19,694 |
| 89 | 25,749 | 24,989 | 24,879 |

Tablo 3.10'daki verilere göre, hem R-AAS hem de X-AAS yerleşimiyle tüm baralarda arıza akımlarında önemli ölçüde düşüş sağlanmıştır. Her iki yöntemin de benzer etkililikte olduğu, ancak R-AAS'ın daha düşük maliyetle bu sonucu elde ettiği görülmektedir.

### 3.3.5 Senaryo Bazlı Optimizasyon Çalışmaları

Bu kısımda, Bölüm 3.3.3'de tanıtılan optimizasyon senaryoları kullanılarak güç sistemlerine AAS ve DÜ birimlerinin entegrasyonu teknik ve ekonomik açılardan incelenmiştir. Çalışmada, AAS'lerin kısa devre akımlarını sınırlandırmadaki etkinliği ile DÜ birimlerinin güç kayıplarını azaltma potansiyeli detaylı olarak ele alınmıştır. Optimizasyon sürecinde, hem tek amaçlı hem de çok amaçlı çalışmalar yürütülmüştür. Bu doğrultuda, arıza akımlarının sınırlandırılması, aktif güç kayıplarının azaltılması ve ekonomik getirilerin maksimize edilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda, GA, PSO VE GKO'nun tek amaçlı ve çok amaçlı versiyonları, geliştirilen çatı algoritma yapılarına entegre edilerek uygulanmıştır. Bu yapı sayesinde, farklı optimizasyon algoritmaları aynı problem üzerinde karşılaştırmalı olarak test edilebilmiş ve sonuçlar arasında kapsamlı bir performans analizi gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon çalışmaları, üç farklı senaryo altında yapılandırılmıştır. Birinci senaryoda, DÜ ve AAS birimlerinin ardışık biçimde optimize edildiği iki aşamalı bir yaklaşım uygulanmıştır. Bu kapsamda, öncelikle aktif güç kayıplarını minimize etmek amacıyla DÜ yerleşimi optimize edilmiş, ardından elde edilen sistem topolojisi üzerinde AAS yerleşimi ve boyutlandırması gerçekleştirilmiştir. Her iki aşamada da ilgili çatı algoritmalar kullanılarak, belirtilen optimizasyon teknikleri ayrı ayrı entegre edilmiştir.

İkinci ve üçüncü senaryolarda ise DÜ ve AAS birimlerinin eş zamanlı optimizasyonuna odaklanılmış ve bu süreç, geliştirilen çok amaçlı çatı algoritması aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yapı içerisinde, seçilen arama algoritması (ÇAGA, ÇAPSO veya ÇAGKO) ile aktif güç kaybı, AAS maliyeti ve yatırım karlılığı gibi çoklu amaç fonksiyonları değerlendirilmiştir.

Bu yaklaşım ile farklı optimizasyon stratejilerinin aynı sistem yapısı üzerindeki etkilerinin araştırılması hedeflenirken hem teknik hem ekonomik açılardan en uygun sistem konfigürasyonlarının belirlenmesine katkı sağlaması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen tüm senaryo bazlı çalışmalarda önceki bölümde maliyet-etkinliği kanıtlanan R-AAS kullanılmıştır.

#### 3.3.5.1 Senaryo 1

Birinci senaryoda, DÜ ve AAS yerleşimi, tek amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı kullanılarak ardışık şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu iki aşamalı optimizasyon sürecinin ilk adımında, DÜ birimlerinin en uygun yerleşimi ve boyutlandırması aktif güç kaybını minimize edecek şekilde belirlenmiştir. İkinci adımda ise, arıza akımlarının kesici kapasitelerinin altında tutulmasını sağlayarak güç sisteminin güvenilir çalışmasını temin etmek amacıyla, minimum maliyet ile AAS yerleşimi ve boyutlandırmasının yapılması amaçlanmıştır

Bu yapının matematiksel optimizasyon çerçevesi, Eşitlik (3.60)'da sunulmuştur.

$$\begin{cases} \textbf{1. Adım: DÜ yerleşimi ve boyutlandırması} \\ \quad \boldsymbol{Minimize}\ \{Pk\} \\ \quad d.a \\ \quad C_1^{D\ddot{U}} - C_4^{D\ddot{U}} \\ \quad C_1^{GA} - C_4^{GA} \\ \textbf{2. Adım: AAS Yerleşimi ve Boyutlandırması} \\ \quad \boldsymbol{Minimize}\ \{C_{AAS}\} \\ \quad d.a \\ \quad C_1^{AAS} - C_5^{AAS} \end{cases} \tag{3.60}$$

Ekonomik ömür boyunca görülen toplam kar değeri ($\Pi_{total}$) yerleştirilen DÜ ve AAS birimlerine ait bilgiler kullanılarak harici olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada, arıza akımlarının kesici sınırları altında tutulması ve AAS maliyetinin

mümkün olan en düşük seviyede olması koşuluyla aktif güç kaybı minimum seviyede tutulmaya çalışılmıştır.

#### 3.3.5.2 Senaryo 2

İkinci senaryoda, güç kaybı ve AAS maliyet minimizasyonu hedefleri dikkate alınarak DÜ ve AAS yerleşimleri çok amaçlı bir optimizasyon çerçevesinde eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Birbirine zıt bu iki amaç fonksiyonu arasındaki etkileşimi analiz edebilmek amacıyla bir Pareto cephesi oluşturulmuştur. Bu Pareto cephesi üzerindeki uç noktalardaki ve denge noktasındaki çözümler aday çözüm olarak belirlenmiş, elde edilen güç sistemi topolojilerine göre 25 yıllık kar değeri harici olarak hesaplanmıştır. Bu optimizasyon sürecine ait matematiksel formülasyon aşağıda sunulmuştur:

$$\begin{cases} \boldsymbol{Minimize}\ \{Pk, C_{AAS}\} \\ \quad d.a \\ C_1^{D\ddot{U}} - C_4^{D\ddot{U}} \\ C_1^{GA} - C_4^{GA} \\ C_1^{AAS} - C_5^{AAS} \end{cases} \tag{3.61}$$

#### 3.3.5.3 Senaryo 3

Üçüncü senaryoda, önerilen algoritma (Algoritma 4) kullanılarak DÜ ve AAS birimlerinin yerleşim ve boyutlandırmaları, amaç fonksiyonlarına 25 yıllık toplam kar değerini ($\Pi_{total}$) göz önünde bulunduran üçüncü bir amaç fonksiyonu da dahil edilerek eş zamanlı olarak optimize edilmiştir. Optimizasyon süreci, aktif güç kayıplarını $P_k$ ve AAS maliyetlerini ($C_{AAS}$ ) en aza indirirken, aynı zamanda $\Pi_{total}$ değerini maksimize ederek ekonomik olarak verimli ve teknik açıdan güvenilir bir güç sistemi elde etmeyi amaçlamaktadır. İlgili matematiksel formülasyon Denklem (3.62)'de sunulmuştur.

$$\begin{cases} \boldsymbol{Minimize}\ \{Ploss, C_{FCL}\} \\ \boldsymbol{Maksimize}\ \{\Pi_{total}\} \\ \quad \boldsymbol{d.a} \\ C_1^{D\ddot{U}} - C_4^{D\ddot{U}} \\ C_1^{GA} - C_4^{GA} \\ C_1^{AAS} - C_5^{AAS} \end{cases} \tag{3.62}$$

Yukarıda açıklanan optimizasyon senaryoları Tablo 3.11'de özetlenmiştir.

**Tablo 3.11** Optimizasyon Senaryoları

| Opt. Parametre | Senaryo 1 | Senaryo 2 | Senaryo 3 |
|---|---|---|---|
| **Amaç Fonksiyonu** | $\text{Min}(P_K)+\text{Min}(C_{AAS})$ (Ardışık) | $\text{Min}(P_K)+\text{Min}(C_{AAS})$ (Eş Zamanlı) | $\text{Min}(P_K)+\text{Min}(C_{AAS})+\text{Max}(\Pi_{toplam})$ (Eş Zamanlı) |
| **Kısıtlar** | (3.43-3.52) | (3.43-3.52) | (3.43-3.52) |

Her iki test sistemi için kullanılan ekonomik parametreler Tablo 3.12'de sunulmuştur [166,167] .

**Tablo 3.12** Ekonomik Parametreler

| Parametre | Birim | Değer |
|---|---|---|
| $C_{yatırım,\text{DÜ}}$ | \$/MW | 1.630.000 |
| $C_{\text{İ}B,\text{DÜ}}$ | \$/MWh | 15 |
| $C_{enerJ\text{İ}}$ | \$/MWh | 326 |
| $H_{yıl}$ | Saat | 8760 |
| $N_{yıl}$ | Yıl | 25 |
| $SM_{33kV} - SM_{138kV}$ | M\$ | 0,4 – 0,7 |
| $EM_{33kV} - EM_{138kV}$ | M\$/p.u. | 0,15 – 0,4 |
| $C_{\text{İ}B,\text{AAS}}$ | M\$ | $C_{yatırım,\text{AAS}} \times 2\%$ |

Tüm hesaplamalar, Intel i5-12400F işlemcili ve 32 GB DDR5 belleğe sahip bir bilgisayarda MATLAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 3.3.6 Sonuçlar

#### 3.3.6.1 IEEE 30 Baralı Test Sistemi

Bu bölümde, 30 baralı test sistemi üzerinde gerçekleştirilen 3 farklı senaryo bazlı optimizasyon çalışmasına ait sonuçlar paylaşılmıştır. Senaryo bazlı çalışmalarda, her biri maksimum 50 MW kapasiteye sahip iki ek DÜ biriminin şebekeye entegrasyonu dikkate alınmıştır. Güç sisteminin orijinalinde bulunan kaynakların subtransient reaktansları 0.1 p.u. olarak ayarlanırken, optimizasyon neticesinde dahil edilen her bir DÜ birimi için subtransient reaktans ($X_i''$) değeri, birimin aktif güç kapasitesine dayalı olarak ölçeklendirilmiştir. Eşitlik (3.63)'de gösterildiği üzere, subtransient reaktans değeri, DÜ biriminin kurulu gücü $P_{\text{DÜ},i}$ ile sistemde

izin verilen maksimum DÜ kapasitesi $P_{D\ddot{U}}^{maks}$arasındaki oran ile ölçeklendirilmektedir.

$$X_i'' = \frac{0{,}06}{\sqrt{\frac{P_{\mathrm{D\ddot{U}},i}}{P_{D\ddot{U}}^{maks}}}} \tag{3.63}$$

Bu yaklaşım, farklı güç seviyelerine sahip DÜ birimlerinin uygun subtransient reaktans değerleri ile modellenmesini mümkün kılmakta ve daha yüksek güçlü birimlere daha düşük reaktans değeri atayarak, bu birimlerin arıza akımına olan katkısını doğru şekilde yansıtmaktadır.

- **Senaryo 1 Sonuçları**

İlk olarak, önerilen DÜ optimizasyonuna yönelik çatı algoritma yapısına entegre edilen arama algoritmaları (PSO, GA ve GKO) kullanılarak, DÜ birimlerinin yerleşim ve boyutlandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tüm arama algoritmalarıyla ulaşılan ortak sonuçlara göre, her biri 50 MW kapasitesine sahip iki DÜ birimi, sırasıyla Bara 10 ve Bara 12'ye yerleştirilmiştir. Bu yerleşim sonucunda, sistemin toplam aktif güç kaybı ($P_{kayıp}$), başlangıç değeri olan 17,559 MW'tan 9,38 MW seviyesine kadar düşürülmüştür.

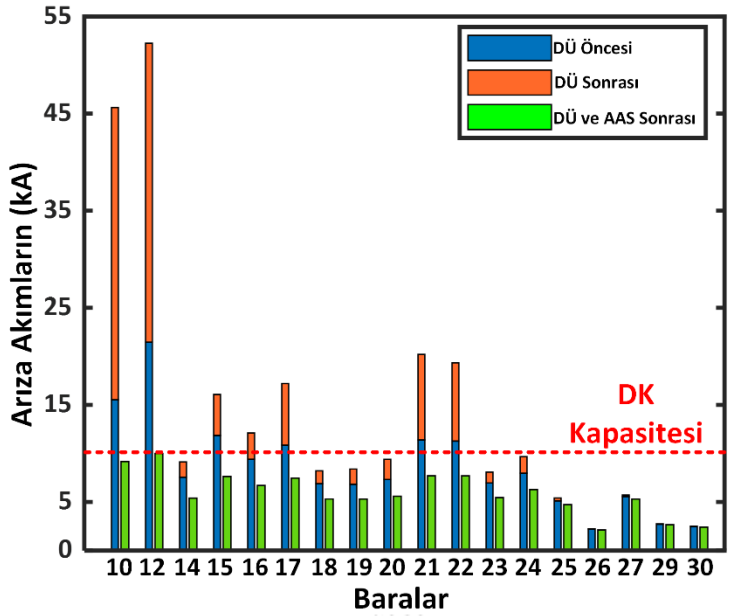
Diğer yandan, Bölüm 3.3.4.1'de de görüldüğü üzere, DÜ entegrasyonu öncesi durumda dahi bazı baraların kesici kapasitelerinin aşıldığı görülmektedir. DÜ birimlerinin eklenmesiyle birlikte bu durum daha da kötüleşmiş ve arıza akımları artmıştır. Buradan hareketle, DÜ optimizasyonu sonucu elde edilen ortak topolojinin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla ikinci aşama olarak AAS optimizasyonu uygulanmıştır.

Tablo 3.13'te, AAS optimizasyonuna çatı algoritma yapısına ayrı ayrı entegre edilen üç farklı meta-sezgisel arama algoritması (PSO, GKO, GA) ile elde edilen AAS yerleşim ve empedans değerleri özetlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, her üç arama algoritmasının da benzer yerleşim noktaları ve yakın empedans değerleri ürettiği görülmektedir. Bu durum, ilgili algoritmaların önerilen çatı yapı içerisinde bu sistem için kararlı ve benzer çözüm kümelerine yakınsadığını göstermektedir.

**Tablo 3.13** IEEE 30 Baralı Test Sistemine Senaryo 1'de Yerleştirilen AAS'ler

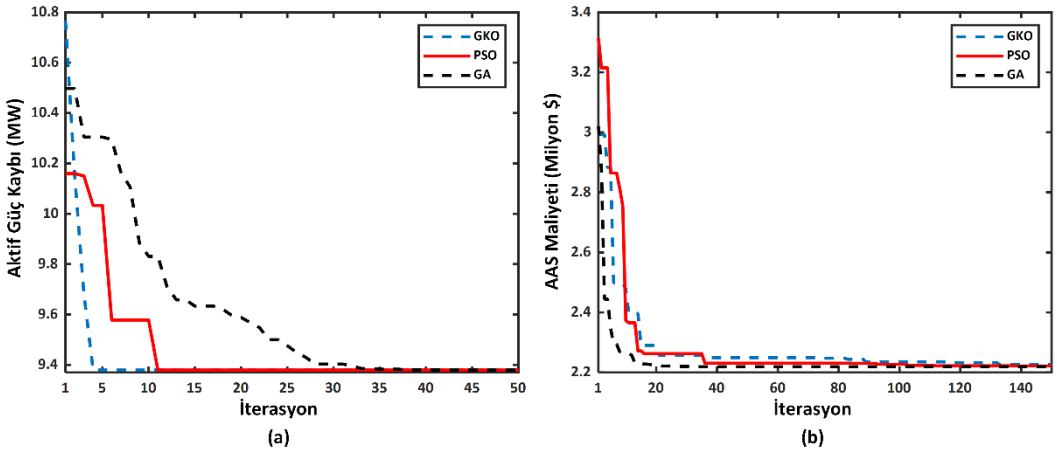
| Konum | PSO | GKO | GA |
|---|---|---|---|
| Hat 14 | 0,7939 | 0,7718 | 0,7889 |
| Hat 16 | 1,2872 | 1,3119 | 1,2716 |
| $DÜ_{@B10}$ | 0,8256 | 0,8209 | 0,8167 |
| $DÜ_{@B12}$ | 1,2180 | 1,2190 | 1,2488 |
| **Maliyet (Milyon $)** | 2,2187 | 2,2185 | 2,2189 |

AAS'lerin ve DÜ birimlerinin sistem üzerindeki etkisi, Şekil 3.11'de, en düşük AAS maliyetini sağlayan, GKO algoritmasıyla elde edilen sonuçlar doğrultusunda gösterilmiştir. Elde edilen bulgular, önerilan algoritma ile birlikte AAS'lerin DÜ entegrasyonu kaynaklı arıza akımı artışlarını etkili bir şekilde sınırlandırdığını açıkça ortaya koymuştur.




**Şekil 3.11** Senaryo 1'de IEEE 30 Baralı Sisteme Ait Arıza Akımları (GKO)

Oluşturulan çatı algoritmaya entegre edilen optimizasyon arama algoritmalarının yakınsama performansı Şekil 3.12'de sunulmuştur. Optimizasyon süreci sonucunda tüm algoritmalar benzer değerlere yakınsamış olup, çözüm kalitesinde belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. DÜ optimizasyonunda, GKO algoritması en hızlı yakınsamayı göstererek elde edilen $P_{Kayıp}$ değerine en kısa sürede ulaşmıştır. Diğer yandan, AAS optimizasyonunda, GKO algoritması en iyi sonucu sağlasa da GA, ihmal edilebilir bir fark ile toplam AAS maliyeti açısından en hızlı yakınsama performansını sergilemiştir.




**Şekil 3.12** IEEE 30 Baralı Test Sisteminde GKO, PSO VE GA Algoritmalarının Yakınsama Performansı (a) DÜ (b) AAS

Görüldüğü üzere, tüm algoritmalar DÜ yerleşiminde aynı aktif güç değerini sağlarken, AAS yerleşiminde en iyi sonucu küçük bir fark ile GKO algoritması sağlamıştır. Tüm algoritmaların sağladığı sonuçlardan yola çıkarak elde edilen sistem topolojisine ait teknik ve ekonomik parametreler Tablo 3.14'de sunulmuştur.

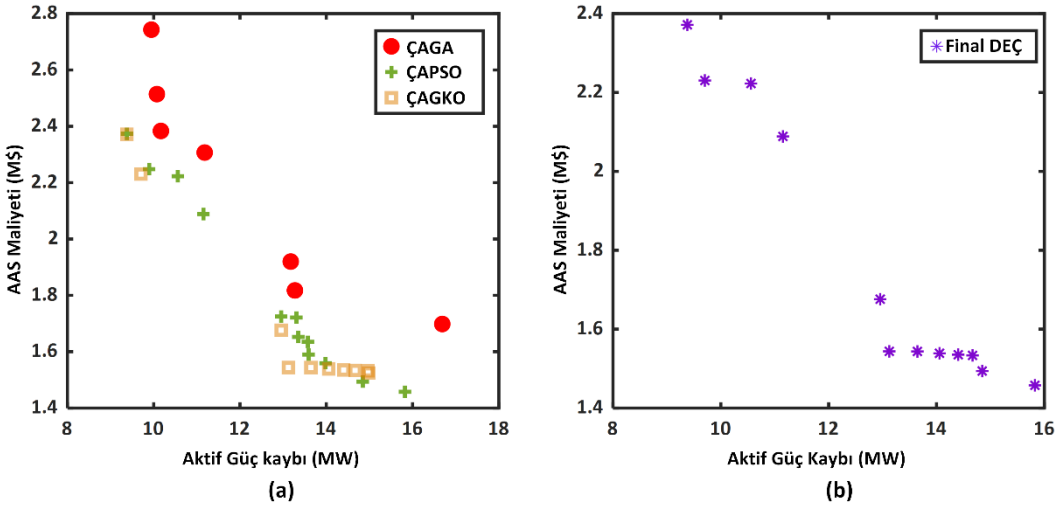
**Tablo 3.14** 1. Senaryoda IEEE 30-Baralı Test Sistemine Ait Teknik ve Ekonomik Parametreleri

| Algoritma | Kurulan DÜ'ler Bara (Boyut – X'') | Kurulan AAS'ler (Konum) (p.u.) | $P_k$ (MW) | $C_{Yatırım,DÜ}$ (M$) / $C_{Yatırım,AAS}$ (M$) | Geri Ödeme Yılı / Net Kar (M$) |
|---|---|---|---|---|---|
| GKO | 10(50-0,06)<br>12(50-0,06) | Hat(14) (0,771)<br>Hat(16) (1,311)<br>Gen(10) (0,820)<br>Gen(12) (1,219) | 9,3794 | 163 M$<br>2,2185 M$ | 16,177 Yıl<br>90,115 M$ |
| PSO | 10(50-0,06)<br>12(50-0,06) | Hat(14) (0,793)<br>Hat(16) (1,287)<br>Gen(10) (0,825)<br>Gen(12) (1,218) | 9,3794 | 163 M$<br>2,2185 M$ | 16,177 Yıl<br>90,114 M$ |
| GA | 10(50-0,06)<br>12(50-0,06) | Hat(14) (0,788)<br>Hat(16) (1,271)<br>Gen(10) (0,816)<br>Gen(12) (1,248) | 9,3794 | 163 M$<br>2,2185 M$ | 16,177 Yıl<br>90,114 M$ |

- **Senaryo 2 Sonuçları**

İkinci senaryoda, AAS ve DÜ optimizasyonlar $P_k$ ve $C_{AAS}$ değerlerinin minimizasyonunu dikkate alarak çok amaçlı optimizasyon çerçevesinde eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiş. Geliştirilen çatı algoritmaya entegre edilen her bir arama algoritmasından elde edilen domine edilemeyen çözümler Şekil 3.13(a)'da sunulmuştur. Şekil 3.13 (a)'da gösterilen çözüm kümeleri birleştirilmiş ve geniş çözüm kümesi elde edilmiştir. Bu kümeye uygulanan baskınlık temelli sıralama ile elde edilen final domine edilemeyen çözüm (DEÇ) kümesi ise Şekil 3.13(b)'de

verilmiştir. IEEE 30 Baralı test sisteminde Senaryo 2'ye ait harici ekonomik analizler, final DEÇ kümesinin oluşturduğu Pareto cephesi üzerinden ve optimizasyon arama algoritmalarının bireysel çözümleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.




**Şekil 3.13** IEEE 30-Baralı Test Sistemi için 2. Senaryoda Elde Edilen Pareto-Optimal Çözümler (a) Bireysel Algoritmalar (b) Final DEÇ

Şekil 3.13 (a), önerilen çok amaçlı optimizasyon çatı algoritma yapısına entegre edilen ÇAPSO, ÇAGA ve ÇAGKO arama algoritmaları ile gerçekleştirilen eşzamanlı DÜ ve AAS optimizasyonu sonucunda elde edilen çözüm kümeleri arasındaki ödünleşim ilişkisini (trade-off) göstermektedir. Algoritmalar arasında ÇAGA, geniş bir çözüm aralığı sunmakta ve oldukça farklı aktif güç kaybı değerlerini kapsayacak şekilde sonuçlar üretmektedir. Ancak, bu çözümler diğer algoritmalar ait sonuçlara kıyasla daha yüksek değerlerden oluşmaktadır. ÇAPSO algoritması ise daha dengeli çözümler üretmekte, orta seviyede güç kaybı ile birlikte nispeten düşük AAS maliyetleri sağlamaktadır. Buna karşılık, ÇAGKO algoritması ise biraz daha yüksek aktif güç değerlerine rağmen en düşük AAS maliyetli topolojileri sunmaktadır.

**Tablo 3.15** IEEE 30 Baralı Sistemde Senaryo 2 İçin Algoritmalara Ait Pareto Cephesi Uç ve Denge Noktaları

| Algoritma | DEÇ Sayısı | ($P_k$, $C_{AAS}$) @Min. Pk | ($P_k$, $C_{AAS}$) @Min. $C_{AAS}$ | ($P_k$, $C_{AAS}$) @Denge Noktası |
|---|---|---|---|---|
| ÇAGA | 7 | 9,94 MW, $2,74M | 16,68 MW, $1,69M | 11,18 MW, $2,30M |
| ÇAPSO | 12 | 9,37 MW, $2,37M | 15,82 MW, $1,45M | 12,95 MW, $1,72M |
| ÇAGKO | 10 | 9,37 MW, $2,37M | 14,98 MW, $1,52M | 12,95 MW, $1,67M |
| Final DEÇ Kümesi | 12 | 9,37 MW, $2,37M | 15,82 MW, $1,45M | 12,95 MW, $1,67M |

Her bir algoritmaya ait Pareto cephesinden elde edilen uç ve denge noktalarına ait aktif güç kaybı ve AAS maliyetleri Tablo 3.15'te sunulmuştur. Uç noktalar, minimum kayıp noktası ($P_k$) ve minimum AAS maliyeti ($C_{AAS}$) noktalarından oluşurken, denge noktası Pareto cephesinin merkezine en yakın çözüm noktasını temsil etmektedir. Son olarak, tüm sistemi temsilen final DEÇ kümesi oluşturulmuştur.

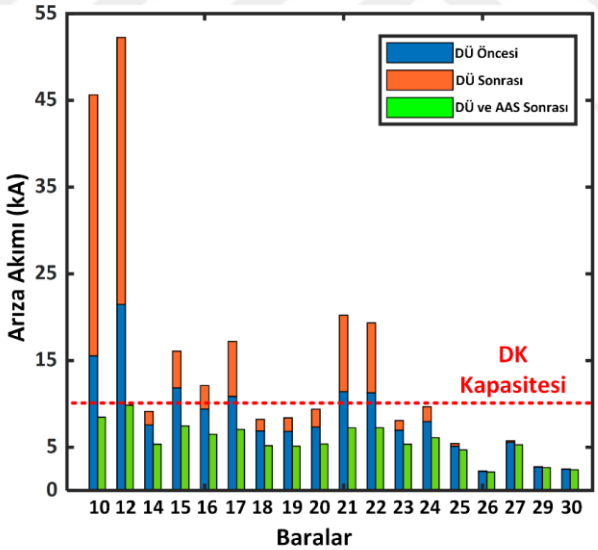
**Tablo 3.16** IEEE 30-Baralı Sistem için 2. Senaryoda Elde Edilen Çözümler

| | Çalışma Noktası | Kurulan DÜ'ler Bara (Boyut – X'') | Kurulan AAS'ler (Konum) (p.u.) | Geri Ödeme Yılı | Net Kar ($) |
|---|---|---|---|---|---|
| **ÇAGKO** | **Min. $P_k$** | 10(50-0,06)<br>12(50-0,06) | • Hat(14) (1,673)<br>• Hat(16) (1,228)<br>• Gen(10) (1,011)<br>• Gen(12) (1,230) | 16,19 | 89,94M |
| | **Denge Noktası** | 10(50-0,06) | • Hat(14) (1,289)<br>• Hat(16) (1,030)<br>• Gen(10) (0,853) | 12,65 | 81,09M |
| | **Min. $C_{AAS}$** | 10(27.11-0,081) | • Hat(14) (0,596)<br>• Hat(16) (0,850)<br>• Gen(10) (0,715) | 12,05 | 49,13M |
| **ÇAPSO** | **Min. Pk** | 10(50-0,06)<br>12(50-0,06) | • Hat(14) (0,958)<br>• Hat(16) (2,239)<br>• Gen(10) (1,176)<br>• Gen(12) (0,781) | 16,19 | 89,93M |
| | **Denge Noktası** | 10(50-0,06) | • Hat(14) (1,579)<br>• Hat(16) (1,450)<br>• Gen(10) (0,468) | 12,66 | 81,04M |
| | **Min. CAAS** | 30(42,009-0,065) | • Hat(16) (0,625)<br>• Line(14) (0,859)<br>• Gen(30) (0,232) | 69,93 | -44,93M |
| **ÇAGA** | **Min. Pk** | 22(47.564-0,061)<br>12(46.653-0,062) | • Hat(16) (2,229)<br>• Hat(14)(1,993)<br>• Gen(12) (1,495)<br>• Gen(22) (1,902) | 16,71 | 77,54M |
| | **Denge Noktası** | 10(50-0,06) | • Hat(14) (1,731)<br>• Hat(16) (1,064)<br>• Gen(19) (0,793)<br>• Gen(22) (1,123) | 19,28 | 41,15M |
| | **Min. CAAS** | 14(19,930-0,095) | • Hat(14) (0,598)<br>• Hat(16) (1,676)<br>• Gen(14) (1,046) | 34,18 | -9,18M |
| **DEÇ** | **Min. Pk** | 10(50-0,06)<br>12(50-0,06) | • Hat(14) (0,958)<br>• Hat(16) (2,239)<br>• Gen(10) (1,176)<br>• Gen(12) (0,781) | 16,19 | 89,95M |
| | **Denge Noktası** | 10(50-0,06) | • Hat(14) (1,289)<br>• Hat(16) (1,030)<br>• Gen(10) (0,853) | 12,65 | 81,09M |
| | **Min. CAAS** | 30(42,009-0,065) | • Hat(16) (0,625)<br>• Hat(14) (0,859)<br>• Gen(30) (0,232) | 69,93 | -44,93M |

Arama algoritmalarının ve final DEÇ kümesinin seçilen temsili çözümlerine (uç noktalar ve denge noktası) karşılık gelen AAS ve DÜ birimlerine ait yerleşim ve boyutlandırma detayları, Tablo 3.16'da gösterilmektedir.

Final DEÇ kümesinde minimum aktif güç kaybı sağlayan konfigürasyon, 16,19 yıl geri ödeme süresi ile 89,95 milyon $ tutarında en yüksek karı sağlamaktadır. Diğer yandan, minimum AAS maliyeti sağlayan konfigürasyon, yetersiz yıllık tasarruf nedeniyle yatırım geri dönüşünü makul bir süre içerisinde sağlayamamaktadır. Bu nedenle, 25 yıllık ekonomik ömrün sonunda –44,93 milyon $ net zararla sonuçlanmaktadır. Bu durum, düşük yatırım maliyetine rağmen, kayıplardaki azalıştan elde edilen tasarrufun yatırımı karşılamaya yetmediğini göstermektedir. Denge noktası ise, 12,65 yıl geri ödeme süresi ile 81,09 milyon $ net kar sağlamaktadır. Bu durum, ekonomik kazanç ile geri dönüş süresi arasında dengeli bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Son olarak, en fazla kar sağlayan senaryo için ($_{\text{Min. P}_k}$) DÜ ve AAS entegrasyonunun etkisi altındaki baralara ait arıza akımı değişimleri, Şekil 3.14'te sunulmuştur.

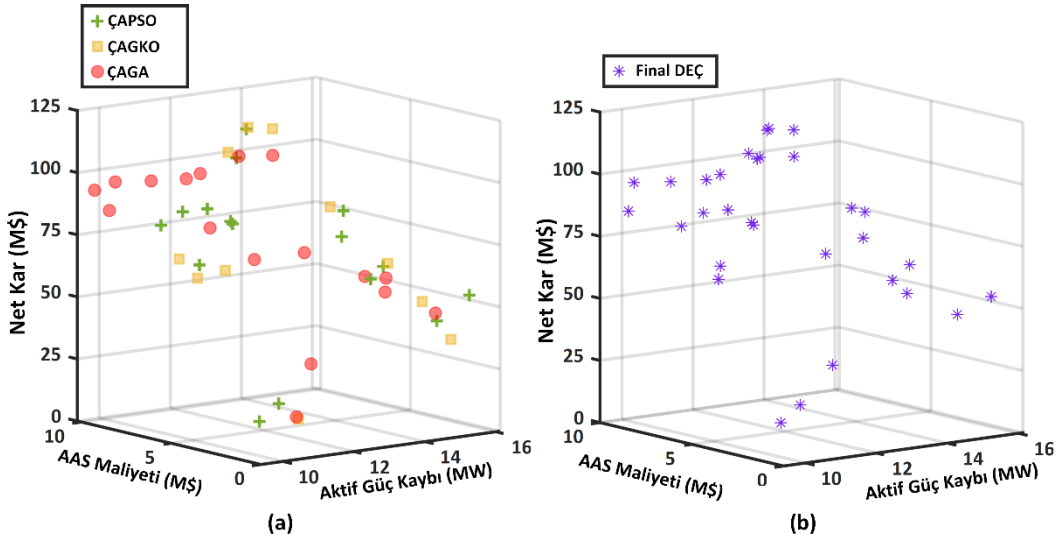



**Şekil 3.14** IEEE 30-Baralı Test Sistemi için 2. Senaryoda Minimum Güç Kaybı Çalışma Noktasına ait Arıza Akımları

- **Senaryo 3 Sonuçları**

3. senaryoda, toplam kar ($\Pi_{total}$) hesaplaması üçüncü amaç fonksiyonu olarak optimizasyon çalışmasına dahil edilmiştir. Bu senaryoda, amaç; aktif güç kaybını ($P_k$) en aza indiren, arıza akımlarını devre kesicisi limitleri dahilinde tutan ve 25 yıllık ekonomik ömür boyunca toplam karı maksimize eden AAS ve DÜ

birimlerinin optimal yerleşimlerini ve boyutlarını belirlemektir. Kullanılan algoritmalarla elde edilen domine edilemeyen çözüm kümeleri Şekil 3.15(a)'da gösterilirken, Şekil 3.15(b)'de ise final DEÇ kümesi sunulmuştur.



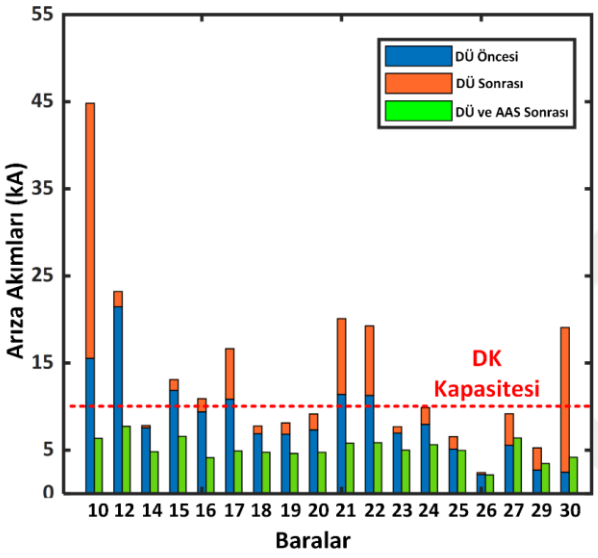

**Şekil 3.15** IEEE 30-Baralı Test Sistemi için 3. Senaryoya Ait Domine Edilemeyen Çözümler (a) Bireysel algoritma sonuçları (b) Final DEÇ Kümesi

ÇAPSO, ÇAGKO ve ÇAGA algoritmaları için elde edilen domine edilemeyen çözüm sayıları sırasıyla 16, 11 ve 17'dir. En yüksek toplam kar ÇAGKO tarafından sağlanmış olup, bu değer ÇAPSO sonucu ile oldukça yakın bir seviyededir. ÇAGA, en fazla domine edilemeyen çözüm sayısını sunmasına rağmen, üç algoritma arasında en düşük maksimum net karı elde etmiştir.

**Tablo 3.17** IEEE 30-Baralı Test Sistemi İçin 3. Senaryoda Algoritmalara Göre En Karlı Senaryolara Ait Teknik ve Ekonomik Parametreler

| Algoritma | Kurulan DÜ'ler Bara (Boyut – X'') | Kurulan AAS'ler (Konum) (p.u.) | $P_k$ (MW) | $C_{Yatırım,DÜ}$ (M$) / $C_{Yatırım,AAS}$ (M$) | Geri Ödeme Yılı / Net Kar (M$) |
|---|---|---|---|---|---|
| ÇAGKO | 30(16,47-0,104) 10(50-0,060) | Hat(14) (2,479)<br>Hat(16) (1,767)<br>Hat(21) (2,491)<br>Gen(10) (2,149)<br>Gen(13) (2,862)<br>Gen(30) (0,698) | 11,173 | 108,35<br>4,267 | 11,85 Yıl<br>124,84 |
| ÇAPSO | 30(16,99-0,10) 10(50-0,06) | Hat(14) (0,830)<br>Hat(19) (0,917)<br>Hat(16) (1,873)<br>Hat(18) (1,997)<br>Hat(27) (0,611)<br>Gen(10) (0,949)<br>Gen(30) (2,868) | 11,145 | 109,21<br>4,307 | 11,94 Yıl<br>124,15 |
| ÇAGA | 24(23,12-0,088)<br>10(42,57-0,065) | Hat(14) (2,1395)<br>Hat(16) (4,3922)<br>Gen(10) (2,4994)<br>Gen(24) (2,3001) | 11,379 | 107,1<br>3,299 | 12,25 Yıl<br>114,83 |

Bu durum, daha fazla sayıda Pareto çözümüne sahip olmanın, en iyi çözümün elde edildiği anlamına gelmediğini göstermektedir. Ayrıca, ÇAGKO ve ÇAPSO algoritmalarının maksimum karlılık açısından benzer sonuçlar vermesi, bu algoritmaların ekonomik ve teknik hedefleri dengeleme konusundaki etkinliğini ortaya koymaktadır. İlgili çalışma noktaları ve yerleştirilen birimlere ait bilgiler Tablo 3.17'de sunulmuştur.




**Şekil 3.16** IEEE 30-Baralı Test Sistemi için 3. Senaryoda ÇAGKO Algoritması ile Elde Edilen En Karlı Senaryoya Ait Arıza Akımları Değişimi

1. senaryoda gerçekleştirilen optimizasyon neticesinde, minimum aktif güç kaybı değeri 9.37 MW olarak bulunmasına rağmen, 3. senaryoda en karlı aktif güç kaybı noktasının 11.17 MW olarak elde edildiği görülmektedir ÇAGKO tarafından sağlanan topolojide arıza akımlarının değişimi Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere, AAS optimizasyonu ile arıza akımlarının etkin bir şekilde sınırlandığı gözlemlenmektedir.

### 3.3.6.2 IEEE 118 Baralı Test Sistemi

Bu test sisteminde, izin verilen maksimum DÜ gücü 150 MW olarak belirlenmiştir. Sisteme yeni eklenen her bir DÜ biriminin subtransient reaktansı ($X_i''$) Eşitlik (3.18) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu formülasyonda, reaktans değeri, DÜ biriminin aktif gücü ile sistemdeki tüm kaynaklar arasındaki maksimum gücün oranı ile ölçeklendirilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, daha yüksek kapasiteli DÜ

birimlerine daha düşük subtransient reaktans değerleri atanmakta ve bu durum, yüksek güçlü DÜ birimlerinin arıza akımına daha fazla etki etmesini sağlamaktadır.

- **Senaryo 1 Sonuçları**

İlk aşamada, sistemin aktif güç kaybını minimize etmek amacıyla, DÜ birimlerinin optimal konumları ve aktif güç kapasiteleri belirlenmiştir. Bu optimizasyon sonucunda, sistemin toplam aktif güç kaybı, başlangıçtaki 132,863 MW seviyesinden daha düşük değerlere indirgenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.18'de sunulmakta olup, DÜ yerleşimine özgü çatı algoritma içerisinde kullanılan GA, PSO ve GKO tekniklerinin performansları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

**Tablo 3.18** 1. Senaryo İçin IEEE 118 Baralı Test Sistemine Yerleştirilen DÜ Birimleri

| | **GA** | **PSO** | **GKO** |
|---|---|---|---|
| | **Konum - Boyut (MW)** | **Konum - Boyut (MW)** | **Konum - Boyut (MW)** |
| | • Bara 1 – 69,798<br>• Bara 40 – 150,000<br>• Bara 112 – 67,3486<br>• Bara 74 – 150,000<br>• Bara 53 – 117,3629 | • Bara 1 – 72,307<br>• Bara 118 – 144,049<br>• Bara 112 – 66,093<br>• Bara 53 – 117,049<br>• Bara 40 – 150 | • Bara 1 – 70,411<br>• Bara 40 – 150,000<br>• Bara 76 – 94,044<br>• Bara 74 – 116,945<br>• Bara 53 – 119,094 |
| $P_k$ | 98,300 MW | 100,085 MW | 98,824 MW |

Sonuçlara göre, GA algoritması 98,30 MW, GKO ise 98,824 MW toplam kayıpla birbirine oldukça yakın ve düşük kayıplı çözümlere ulaşmıştır. Buna karşın, PSO algoritması ile elde edilen 100,085 MW'lık kayıp değeri, diğer iki algoritmaya kıyasla daha yüksek kalmış ve daha az etkin bir performans sergilemiştir.

Görüldüğü üzere, en düşük aktif güç kaybı, DÜ optimizasyon aşamasında GA tarafından elde edilen sistem topolojisi ile sağlanmıştır. Bu sonucun ardından, ikinci aşamada söz konusu topoloji sabitlenmiş ve AAS yerleşimi ile boyutlandırması işlemleri, her biri ayrı ayrı PSO, GKO ve GA algoritmalarının entegre edildiği AAS optimizasyonuna özgü çatı algoritma aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.19, AAS yerleşimlerini ve karşılık gelen empedans değerlerini sunmaktadır. Karşılaştırılan algoritmalar arasında, GA algoritması tüm AAS'leri kaynak baralarına yerleştirmiş ve 3.5562 milyon dolar ile en düşük toplam maliyeti sağlamıştır. Buna karşılık, PSO algoritması, hem kaynak hem de hat konumlarını kullanarak 3,5733 milyon dolar ile en yüksek toplam maliyeti ortaya koymuştur.

Benzer şekilde, GKO algoritması AAS kurulumuna kaynak baralarının yanı sıra Hat 98'i dahil etmiş ve 3,5965 milyon dolarlık bir maliyet sunmuştur.

**Tablo 3.19** 1. Senaryoda IEEE 118-Baralı Sisteme Yerleştirilen AAS'ler

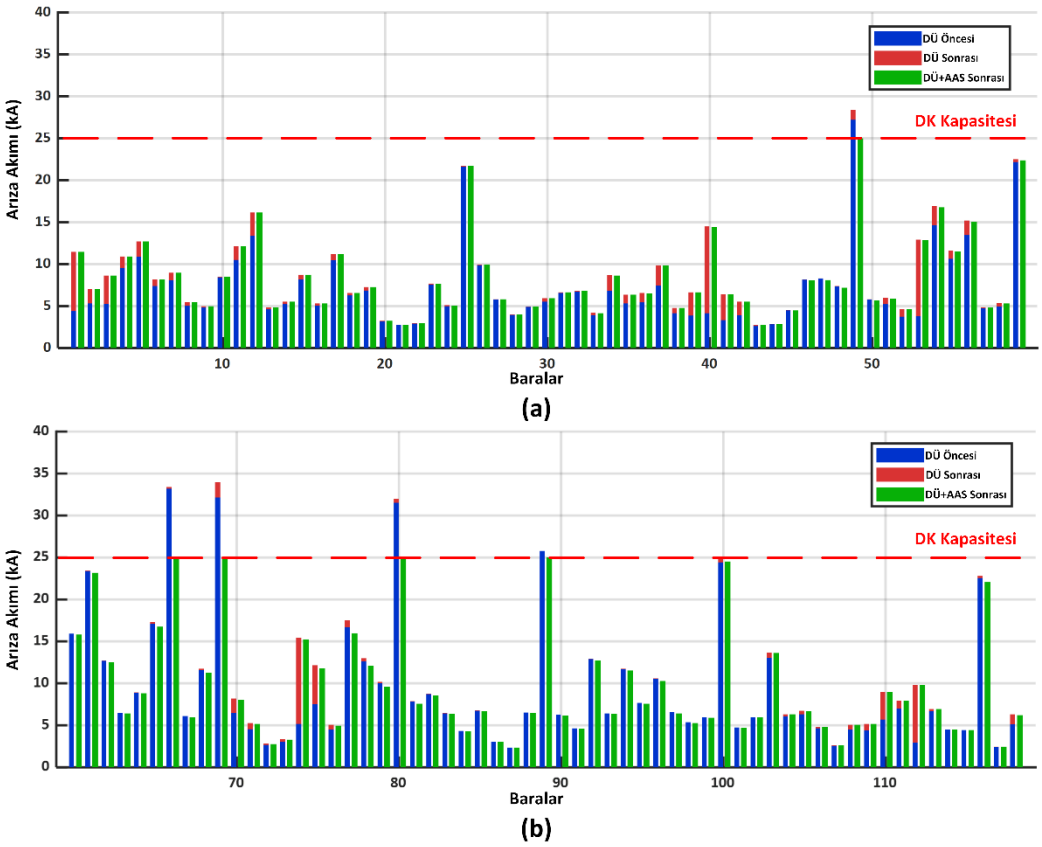
| Konum | PSO | GKO | GA |
|---|---|---|---|
| $GEN_{@Bara89}$ | 0,0060 | 0,0067 | 0,0058 |
| $GEN_{@Bara49}$ | - | - | 0,0255 |
| $GEN_{@Bara66}$ | 0,0386 | - | 0,0309 |
| $GEN_{@Bara80}$ | 0,0244 | 0,0233 | 0,0233 |
| $GEN_{@Bara69}$ | 0,0283 | 0,0268 | 0,0269 |
| Hat 98 | 0,0492 | 0,0607 | - |
| Hat 102 | - | 0,0755 | - |
| **Toplam Maliyet** | $3,5733M | $3,5965M | $3,5562M |

Tablo 3.20'de, yerleştirilen birimlerin teknik özellikleri ile birlikte sisteme ait ilgili ekonomik ve teknik parametreler sunulmuştur. Görüldüğü üzere, DÜ yerleşimi ile güç kayıpları önemli ölçüde azaltılmış ve AAS yerleşimi ile arıza akımı güvenliği sağlanmış olsa da bu yapılandırma ekonomik açıdan uygulanabilir değildir

**Tablo 3.20** 1. Senaryoda IEEE 118-Baralı Test Sistemine Çözümlerin Teknik ve Ekonomik Parametreleri

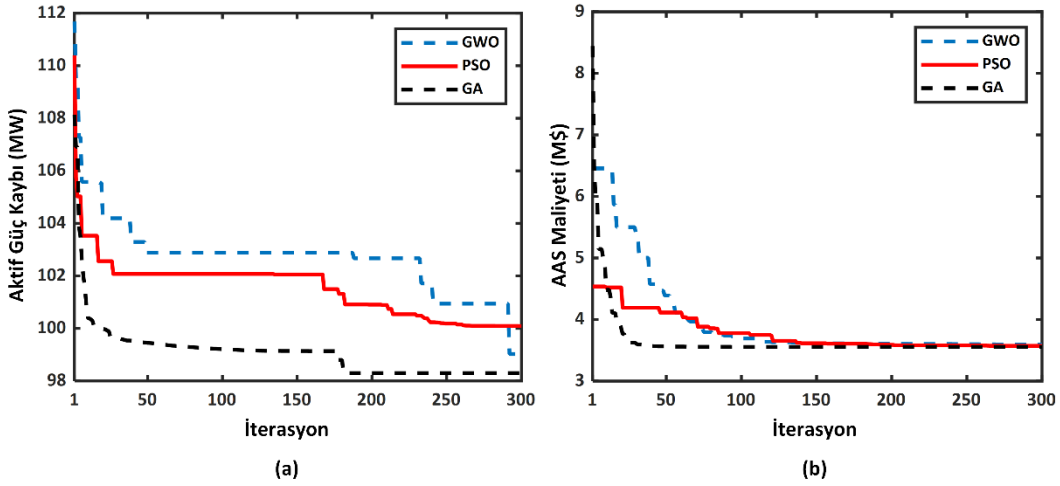
| Algoritma | Kurulan DÜ'ler Bara (Boyut – X'') | Kurulan AAS'ler (Konum) (p.u.) | $P_k$ (MW) | $C_{Yatırım,DÜ}$ (M$) | Geri Ödeme Yılı |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $C_{Yatırım,AAS}$ (M$) | Net Kar (M$) |
| GA | 1(69,79-0,0590)<br>40(150-0,040)<br>112(67,34-0,060)<br>74(150,00-0,040)<br>53 (117,36-0,045) | Gen(89) (0,0058)<br>Gen(49) (0,0255)<br>Gen(66) (0,0309)<br>Gen(80) (0,0233)<br>Gen(69) (0,0269) | 98,30 | 903,85 M$ | 35,114 Yıl |
| | | | | 3,5562 M$ | -261,379 M$ |
| PSO | 1(72.31-0.0579)<br>118(144.05-0.0411)<br>112(66.09-0.0606)<br>53(117.05-0.0455)<br>40(150.00-0.0402) | Gen(89) (0,0060)<br>Gen(66) (0,0386)<br>Gen(80) (0,0244)<br>Gen(69) (0,0283)<br>Hat(98) (0,0492) | 100,085 | 895,68 M$ | 42,017 Yıl |
| | | | | 3,5733 M$ | -364,203 M$ |
| GKO | 1(70.41-0.0587)<br>40(150.00-0.0402)<br>76(94.04-0.0508)<br>74(116.94-0.0456)<br>53(119.09-0.0452) | Gen(89) (0,0067)<br>Gen(80) (0,0233)<br>Gen(69) (0,0268)<br>Hat(98) (0,0607)<br>Hat(102) (0,0755) | 98,824 | 897,30 M$ | 36,22 Yıl |
| | | | | 3,5965M$ | -279,040 M$ |

Şekil 3.17'de IEEE 118 Baralı test sisteminin Senaryo 1'deki arıza akımı değişimleri gösterilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere, Bara 49, Bara 66, Bara 69 ve Bara 80, 25 kA'lık kesici kapasitesini aşmaktadır. AAS optimizasyonu sonrasında, bu kritik baralardaki arıza akımları önemli ölçüde azalmış ve kesici kapasitesi altına indirilmiştir. Bu sonuçlar, gelişen güç sistemlerinde, sistem korumasının sürdürülmesi konusunda AAS kullanımının gerekliliğini ve etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır.




**Şekil 3.17** IEEE 118 Baralı Test Sisteminde Senaryo 1 Sırasında Arıza Akımlarının Değişimi – GA Sonuçları (a) Bara 1-59 (b) 60-118

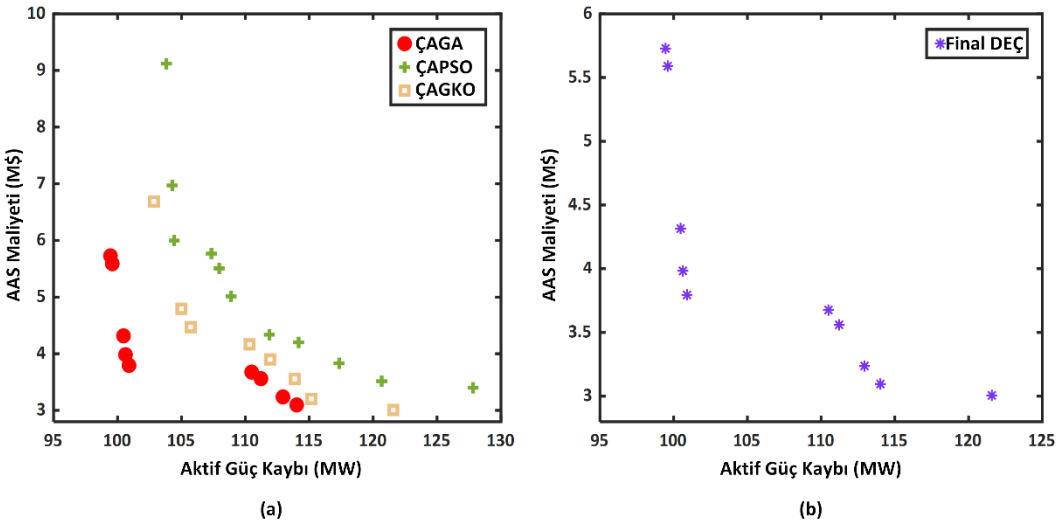
Şekil 3.18'de arama algoritmalarının yakınsama performansları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde performans sıralamasının GA, PSO ve GKO şeklinde olduğu görülmektedir.




**Şekil 3.18** IEEE 118 Baralı Test Sisteminde GKO, PSO VE GA Algoritmalarının Yakınsama Performansı (a) DÜ (b) AAS

➢ **Senaryo 2 Sonuçları**

Bu senaryoda, AAS ve DÜ optimizasyonu eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiş ve aktif güç kaybı ile buna karşılık gelen AAS maliyeti için Pareto-optimal çözümler elde edilmiştir.




**Şekil 3.19** IEEE 118-Baralı Test Sistemi için 2. Senaryoda Elde Edilen Pareto-Optimal Çözümler (a) Bireysel Algoritmalar (b) Final DEÇ

Şekil 3.19(a), ÇAGA, ÇAPSO ve ÇAGKO algoritmaları tarafından elde edilen domine edilemeyen çözümleri, Şekil 3.19(b) ise Final DEÇ kümesini göstermektedir. Algoritmalar arasında, ÇAPSO, daha geniş bir çözüm aralığı sağlayarak keşif yeteneği açısından üstün performans sergilemiştir. Bununla birlikte, ÇAGA, ilgili Aktif güç kaybı değerleri için görece daha düşük AAS maliyetleriyle daha yoğun çözümler sunarak, bazı bölgelerde daha iyi yakınsama sağlamıştır. ÇAGKO, rekabetçi sonuçlar sunmakla birlikte, Pareto sınırı boyunca daha az sayıda domine edilemeyen çözüm üretmiştir.

**Tablo 3.21** IEEE 118 Baralı Sistemde Senaryo 2 İçin Algoritmalara Ait Pareto Cephesi Uç ve Denge Noktaları

| Algoritma | DEÇ Sayısı | ($P_k$, $C_{AAS}$) @Min. Pk | ($P_k$, $C_{AAS}$) @Min. CAAS | ($P_k$, $C_{AAS}$) @Denge Noktası |
|---|---|---|---|---|
| ÇAGA | 9 | 99,45 MW, $5,72M | 114,01 MW, $3,09M | 100,90 MW, $3,79M |
| ÇAPSO | 11 | 103,83 MW, $9,11M | 127,81 MW, $3,39M | 108,89 MW, $5,01M |
| ÇAGKO | 8 | 102,85 MW, $6,68M | 121,57 MW, $3,00M | 110,33 MW, $4,16M |
| Final DEÇ | 10 | 99,45 MW, $5,72M | 121,57 MW, $3,00M | 110,49 MW, $3,67M |

Elde edilen Pareto cepheleri incelendiğinde, güç kaybı ile AAS maliyeti arasında belirgin bir ödünleşim eğilimi görülmektedir. Aktif güç kaybı azaldıkça AAS

maliyetinin arttığı açıkça gözlemlenmektedir. Bu durum, bir amacın minimize edilmesinin diğerinden ödün verilmesini gerektirdiği klasik bir Pareto davranışını yansıtmaktadır. Bu doğrultuda, her bir algoritmaya ait uç ve denge noktalarına ait çözümler Tablo 3.21'de sunulmuştur.

Tablo 3.21'e bakıldığında, ÇAPSO algoritmasının daha fazla sayıda domine edilemeyen çözüm sağladığı görülmektedir. Öte yandan, ÇAGA, daha düşük maliyetli çözümler üreterek öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, nihai DEÇ kümesinin büyük bir kısmı ÇAGA algoritmasından elde edilen çözümlerden oluşmaktadır. Seçilen uç noktalar, minimum kayıp noktası ($P_k$) ve minimum AAS maliyeti ($C_{AAS}$) çözümlerinden oluşurken; denge noktası, Pareto cephesinin merkezine en yakın çözüm noktasını temsil etmektedir.

Bir sonraki aşamada, geliştirilen çatı algoritma yapısına entegre edilen üç farklı arama algoritması — ÇAGA (GA tabanlı çatı algoritma), ÇAPSO (PSO tabanlı çatı algoritma) ve ÇAGKO (GKO tabanlı çatı algoritma) — ile elde edilen ayrı Pareto çözüm kümeleri bir araya getirilmiştir. Bu birleşik çözüm havuzu üzerinde, baskınlık temelli sıralama yöntemi (non-dominated sorting) uygulanarak, tüm çözümler içerisinden domine edilemeyen son çözüm kümesi yani final DEÇ (Final Non-dominated Set) elde edilmiştir.

Senaryo 2 kapsamında güç sistemini temsil edecek karakteristik çözüm noktalarının belirlenmesinde, bu final DEÇ kümesi esas alınmış ve harici ekonomik değerlendirmeler bu çözümler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.21'de sunulan çözüm noktalarına ait, DÜ ve AAS yerleşimlerinin detaylı bilgileri Tablo 3.22'de sunulmuştur.

Görüldüğü üzere, güç sisteminin çalışma karakteristiğini temsil eden Final DEÇ çözüm kümesi içerisinde ekonomik ömrün sonunda herhangi bir kar sağlayan senaryo bulunmamaktadır. Bu durum, güç kayıplarında veya AAS maliyetlerinde sağlanan azalışlara rağmen, DÜ ve AAS birimlerinin yatırım maliyetlerinin 25 yıllık ekonomik ömür süresince işletme tasarruflarıyla karşılanamadığını açıkça göstermektedir.

**Tablo 3.22** IEEE 118-Baralı Sistem için 2. Senaryoda Elde Çözümler

| | Çalışma Noktası | Kurulan DÜ'ler Bara(Boyut – X'') | Kurulan AAS'ler (Konum) (p.u.) | Geri Ödeme Yılı | Net Kar (M$) |
|---|---|---|---|---|---|
| ÇAGKO | **Min. $P_k$** | 36(106,788-0,047)<br>53(93,365-0,050)<br>40(140,718-0,041)<br>72(15,675-0,124)<br>76(111,792-0,046) | • Hat(102) (0,960)<br>• Hat(127) (0,728)<br>• Gen(49) (0,702)<br>• Gen(69) (0561)<br>• Gen(80) (1,089)<br>• Gen(89) (0,929) | 31,862 | -165,84 |
| | **Denge noktası** | 42(109,322-0,047)<br>33(87,413-0,052)<br>14(74,831-0,056)<br>53(57,641-0,064) | • Gen(49) (0,201)<br>• Gen(66) (0,298)<br>• Gen(69) (0,346)<br>• Gen(80) (0,200)<br>• Gen(89) (0,282) | 25,659 | -13,899 |
| | **Min. $C_{AAS}$** | 11(61,661-0,062)<br>19(91,213-0,051)<br>18(56,782-0,065)<br>13(40,977-0,076) | • Gen(66) (0,169)<br>• Gen(69) (0,166)<br>• Gen(80) (0,068)<br>• Gen(89) (0,008) | 411,54 | -386,54 |
| ÇAPSO | **Min. $P_k$** | 42(135,351-0,042)<br>1(65,695-0,060)<br>118(76,903-0,056)<br>58(93,081-0,051)<br>112(86,063-0,053) | • Hat(127) (1,008)<br>• Hat(102) (0,059)<br>• Hat(98) (2,341)<br>• Gen(69) (3,000)<br>• Gen(80) (0,782)<br>• Gen(89) (1,244) | 33,01 | -183,01 |
| | **Denge noktası** | 42(95,339-0,050)<br>74(147,983-0,040)<br>41(105,362-0,048)<br>67(22,244-0,104) | • Hat(102) (0,513)<br>• Gen(66) (1,474)<br>• Gen(69) (0,396)<br>• Gen(80) (0,103)<br>• Gen(89) (0,535) | 30,901 | -116,42 |
| | **Min. $C_{AAS}$** | 73(118,587-0,045)<br>2(150-0.040)<br>17(19,6508-0,111)<br>21(120,506-0,044) | • Hat(141) (0,175)<br>• Gen(66) (0,318)<br>• Gen(69) (0,044)<br>• Gen(80) (0,659) | 669,65 | -644,65 |
| ÇAGA | **Min. $P_k$** | 40(91,490-0,0515)<br>53(105,676-0,047)<br>74(108,198-0,047)<br>42(114,257-0,046)<br>76(88,822-0,0522) | • Hat(98) (1,184)<br>• Gen(66) (0,908)<br>• Gen(69) (0,928)<br>• Gen(80) (1,228)<br>• Gen(89) (0,209) | 29,168 | -119,25 |
| | **Denge noktası** | 42(98.860-0,049)<br>40(103.898-0,048)<br>44(47.656-0,071)<br>76(118.092-0,045)<br>53(119.119-0,045) | • Hat(102) (0,159)<br>• Hat(98) (0,186)<br>• Gen(69) (0,133)<br>• Gen(80) (0,092)<br>• Gen(89) (0,017) | 29,358 | -121,55 |
| | **Min. $C_{AAS}$** | 19(90,27-0,051)<br>36(122,268-0,044)<br>35(45,804-0,072)<br>76(120,128-0,044) | • Gen(66) (0,207)<br>• Gen(69) (0,149)<br>• Gen(80) (0,179)<br>• Gen(89) (0,055) | 152,18 | -518,23 |
| DEÇ | **Min. $P_k$** | 40(91,490-0,0515)<br>53(105,676-0,047)<br>74(108,198-0,047)<br>42(114,257-0,046)<br>76(88,822-0,0522) | • Hat(98) (1,184)<br>• Gen(66) (0,908)<br>• Gen(69) (0,928)<br>• Gen(80) (1,228)<br>• Gen(89) (0,209) | 29,168 | -119,25 |
| | **Denge noktası** | 19(93,261-0,051)<br>39(120,744-0,044)<br>36(42,354-0,075)<br>76(114,758-0,045) | • Gen(66) (0,643)<br>• Gen(69) (0,481)<br>• Gen(80) (0,391)<br>• Gen(89) (0,236) | 40,278 | -230,85 |
| | **Min. $C_{AAS}$** | 11(61,661-0,062)<br>19(91,213-0,051)<br>18(56,782-0,065)<br>13(40,977-0,076) | • Gen(66) (0,169)<br>• Gen(69) (0,166)<br>• Gen(80) (0,068)<br>• Gen(89) (0,008) | 411,54 | -386,54 |

Seçilen işletme noktaları arasında, Minimum aktif güç kaybı senaryosu, kayıp azaltımı sayesinde en yüksek toplam tasarrufu sağlamaktadır. Ancak, yine de, bu topoloji, –119,25 M$ net zarar ile sonuçlanmaktadır.

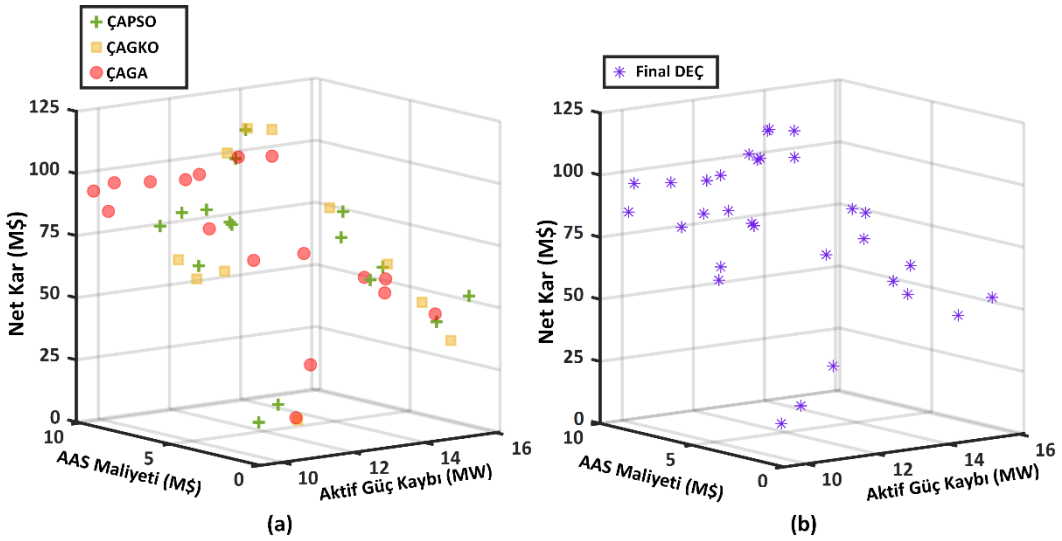
Denge noktası, hem kayıplar hem de AAS maliyetleri açısından daha dengeli bir yapı sunmakta olup, yüksek DÜ yatırım maliyetleri ve kayıplardaki azalıştan elde edilen yetersiz tasarruflar nedeniyle yine ciddi bir finansal kayıpla sonuçlanmaktadır.

Diğer yandan, Minimum AAS maliyeti senaryosu, AAS yatırımlarını en aza indirgemesine rağmen, güç kayıpları ve net kar açısından en kötü performansı göstermektedir. 400 yılı aşan geri ödeme süresiyle, bu senaryo ekonomik olarak uygulanabilir olmadığını açıkça ortaya koymaktadır.

- **Senaryo 3 Sonuçları**

Bu bölümde, 25 yıllık toplam karı üçüncü amaç fonksiyonu olarak dikkate alan domine edilemeyen çözümler, önerilen çok amaçlı optimizasyona ait çatı algoritma kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3.20(a)'da her bir algoritmanın performansı ayrı ayrı sunulmuştur. Optimizasyon süreci sonunda ulaşılan domine edilemeyen çözüm sayısı ÇAGA için 33, ÇAGKO için 22 ve ÇAPSO için 24 olarak bulunmuştur. ÇAGA algoritmasının daha yüksek net kar sağlayan çözümler sunduğu gözlemlenmiştir.

Diğer yandan, ÇAPSO ve ÇAGKO algoritmaları, özellikle AAS maliyeti ve güç kaybı açısından amaç fonksiyonu uzayında daha geniş bir dağılım sunsalar da, elde edilen çözümler karşılaştırmalı olarak daha düşük toplam net kar değerlerine sahip olduğu görülmektedir.




**Şekil 3.20** IEEE 118-Baralı Test Sistemi için 3. Senaryoya Ait Domine Edilemeyen Çözümler (a) Bireysel algoritma sonuçları (b) Final DEÇ Kümesi

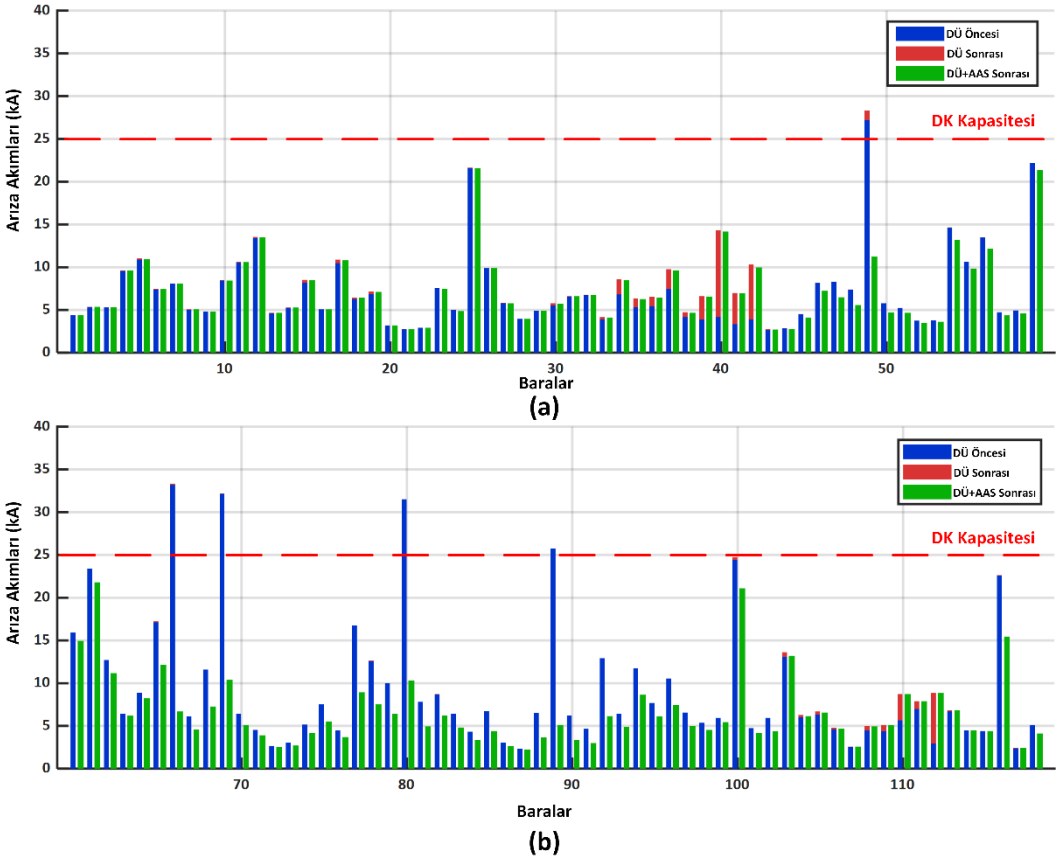
Şekil 3.20(b)'de sunulan Final DEÇ kümesi, her üç amaç fonksiyonu açısından da iyi dağılmış bir Pareto cephesini ortaya koymaktadır.

Tüm algoritmalardan elde edilen domine edilemeyen çözümlerin birleştirilmesi sonrasında uygulanan ek baskınlık temelli sıralama işlemi, daha çeşitli ve rekabetçi bir çözüm kümesinin elde edilmesini sağlamıştır.

**Tablo 3.23** IEEE 118-Baralı Test Sistemi İçin 3. Senaryoda Algoritmalara Göre En Karlı Senaryolara Ait Teknik ve Ekonomik Parametreler

| Algoritma | Kurulan DÜ'ler Bara (Boyut – X'') | Kurulan AAS'ler (Konum) (p.u.) | $P_k$ (MW) | $C_{Yatırım,DÜ}$ (M$) / $C_{Yatırım,AAS}$ (M$) | Geri Ödeme Yılı / Net Kar (M$) |
|---|---|---|---|---|---|
| ÇAGKO | 53(41,455-0,076)<br>40(129,714-0,043) | Hat107) (2,353)<br>Hat(102) (1,926)<br>Hat(127) (0,489)<br>Hat(98) (0,973)<br>Gen(66) (0,685)<br>Gen(80) (0,901)<br>Gen(89) (1,388) | 115,28 | 279,01<br>9,259 | 10,399<br>404,73 |
| ÇAPSO | 40(49,088-0,070)<br>41(62,416-0,062)<br>33(10,000-0,155)<br>1(23,671-0,101)<br>76(10,000-0,155) | Hat(141) (2,346)<br>Hat(102) (0,657)<br>Hat(107) (1,496)<br>Hat(98) (3,000)<br>Gen(80) (2,552)<br>Gen(89) (1,594) | 116,06 | 252,94<br>10,023 | 9,53<br>426,87 |
| ÇAGA | 112(49,474-0,070)<br>40(111,030-0,046)<br>42(33,800-0,084) | Hat(102) (1,084)<br>Gen(49) (0,532)<br>Gen(66) (0,872)<br>Gen(69) (1,872)<br>Gen(80) (1,876)<br>Gen(89) (0,338) | 113,01 | 316,72<br>7,4886 | 10,406<br>454,65 |

Kullanılan algoritmalar için domine edilemeyen çözümler arasından en yüksek net karı sağlayan sonuçlara ait detaylar Tablo 3.23'te sunulmuştur. Tablo 3.23'te görüldüğü üzere, ÇAGA algoritması 454,65 milyon dolar net kar ile en karlı çözümü sağlamaktadır. Bu sonucu sırasıyla 426,87 milyon dolar ile ÇAPSO ve 404,73 milyon dolar ile ÇAGKO takip etmektedir.




**Şekil 3.21** IEEE 118 Baralı Test Sisteminde Senaryo 3 Sırasında Arıza Akımlarının Değişimi (a) Bara 1-59 (b) 60-118

ÇAGA çözümü en yüksek DÜ yatırım maliyetine sahip olmasına (316,72 milyon dolar) rağmen, daha düşük güç kaybı ve AAS maliyeti sayesinde en avantajlı finansal sonucu sunduğu görülmektedir. Ayrıca, her üç algoritma için de geri ödeme süreleri yaklaşık 10 yıl civarında kalmakta, bu da en iyi performans gösteren çözümler arasında ekonomik fizibilitenin benzer düzeyde olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, ÇAPSO algoritması 9,53 yıl ile en kısa geri ödeme süresine ulaşarak, erken geri dönüş beklentileri açısından daha avantajlı bir seçenek sunmaktadır.

Şekil 3.21, ÇAGA algoritması tarafından sağlanan algoritmalar içerisindeki en karlı optimizasyon senaryosu altında arıza akımlarındaki değişimi göstermektedir. İlgili şekilde DÜ birimlerinin entegre edildiği bölgelerde arıza akımlarında artış eğilimi açık şekilde görülmektedir. Ancak, bu çalışmada kurulan DÜ'lerin göreceli olarak daha düşük güç kapasitelerine sahip olması nedeniyle, Senaryo 1'e kıyasla arıza akımındaki artış daha kontrollü bir şekilde gerçekleşmiştir. Ayrıca, 25 kA sınırını aşan arıza akımlarının AAS optimizasyonu ile başarıyla kesici limitlerinin altına indirildiği gözlemlenmiştir.

### 3.3.7 Değerlendirme

Gerçekleştirilen çalışmanın ilk aşamasında, hem DÜ hem de AAS optimizasyonunu ayrı ayrı ele alabilen ve farklı arama algoritmalarının (PSO, GA, GKO) entegre edilebildiği çatı algoritmalar geliştirilmiştir. Bu temel yapılar esas alınarak, DÜ ve AAS birimlerinin eşzamanlı olarak ve birden fazla amaç fonksiyonu doğrultusunda optimize edilmesine olanak tanıyan, çok amaçlı bir çatı algoritma yapısı oluşturulmuştur. Bu yapının, teknik performans ve ekonomik etkinliğin birlikte değerlendirilmesini mümkün kılarak, sistem planlaması için kapsamlı bir optimizasyon çerçevesi sunması hedeflenmiştir. Entegre edilen optimizasyon arama algoritmaları performanslarının arama alanının büyüklüğüne bağlı olarak değiştiği görülmüştür. IEEE 30 Baralı test sistemi üzerinde yapılan çalışmalarda, Gri Kurt Optimizasyonu algoritması hızlı yakınsama ve güvenilirlik açısından üstün performans sergilemiştir. Buna karşılık, arama uzayının genişlediği IEEE 118 Baralı sistemde, Genetik Algoritma, daha yüksek çeşitlilik sağlaması ve ekonomik yönden daha avantajlı çözümler üretmesiyle GKO ve PSO algoritmalarına kıyasla daha iyi performans göstermiştir.

Elde edilen Pareto-optimal çözümler, aktif güç kaybı ve AAS maliyeti arasında belirgin bir ödünleşim (trade-off) ilişkisi olduğunu ortaya koymuştur. Güç kayıplarındaki önemli azalmalar, genellikle daha yüksek AAS yatırım maliyetleri ile sonuçlanmıştır. Pareto eğrilerinde yer alan denge noktaları, makul düzeyde güç kaybı azalımı sağlarken, ekonomik olarak kabul edilebilir AAS yatırımları ile daha uygulanabilir çözümler sunmuştur.

Öte yandan, ardışık tek amaçlı optimizasyon senaryoları, aktif güç kaybı ve AAS maliyeti gibi bireysel amaç fonksiyonları için daha düşük değerler elde etmiştir.

Ancak, eş zamanlı optimizasyon sağlayan çok amaçlı optimizasyon senaryoları, karşılıklı hedefler arasındaki ödünleşim nedeniyle bu bireysel minimum değerlere ulaşamamıştır. Özellikle, tek amaçlı yöntemler maksimum düzeyde optimizasyon sağlarken, çok amaçlı yöntemler daha dengeli çözümler aramakta, bu da herhangi bir tekil amaç için mutlak minimuma ulaşmayan ancak genel anlamda uygulanabilir sonuçlar sağlamaktadır.

Ayrıca, gerçekleştirilen ekonomik analizler, teknik hedeflerin yanı sıra uzun vadeli karlılığın dikkate alınmasının pratik önemini ortaya koymuştur. DÜ ve AAS birimlerinin artan yatırım maliyetleri nedeniyle, minimum güç kaybı sağlayan senaryolar her zaman maksimum ekonomik kazancı garanti etmemiştir. Buna karşılık, AAS yatırımını en aza indiren senaryolar, yetersiz güç kaybı kazancı nedeniyle ekonomik açıdan uygulanabilir olmayan sonuçlar doğurmuştur. Bu noktada, 3. senaryoda toplam kar hesabı hedef fonksiyonu olarak optimizasyona dahil edilerek, güç kaybı ile AAS yatırım maliyeti arasında ekonomik açıdan en avantajlı kombinasyonların belirlenmesi mümkün olmuştur.

Tablo 3.24 ve Şekil 3.22 (a)–(b), IEEE 30 Baralı ve IEEE 118 Baralı test sistemleri için uygulanan optimizasyon senaryolarına ait 25 yıllık toplam net kar değerlerini ve bu karların yıllık değişimini göstermektedir.

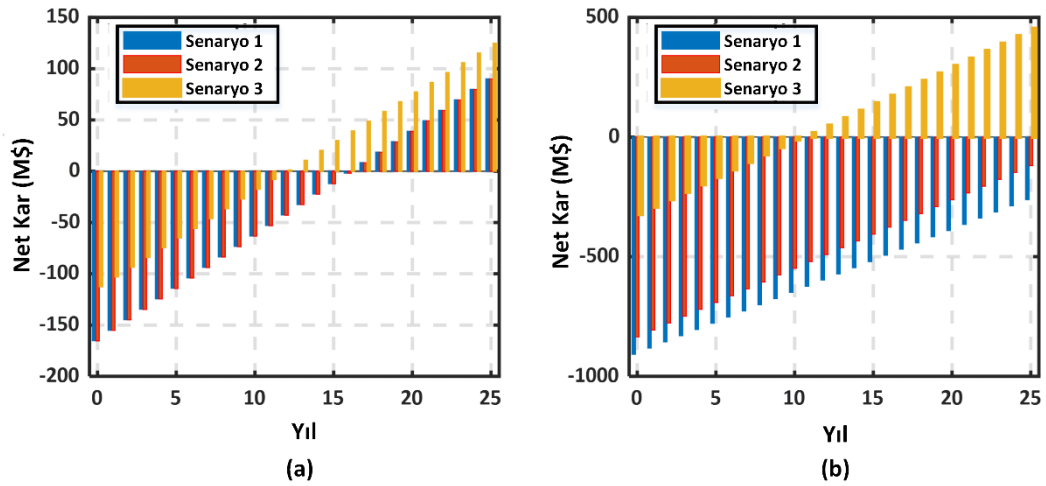
Her iki sistem için gerçekleştirilen analizlerde:

- Senaryo 1, DÜ ve AAS birimlerinin ardışık şekilde optimize edildiği ve nihai çözümün tek bir algoritma çıktısı ile belirlendiği bir yapıya sahiptir. Bu nedenle sonucu sağlayan algoritma doğrudan tabloya yansıtılmıştır.
- Senaryo 2, DÜ ve AAS birimlerinin çok amaçlı ve eş zamanlı olarak optimize edildiği bir yapı sunmakla birlikte, amaç fonksiyonları yalnızca teknik kriterlere (güç kaybı ve AAS maliyeti) dayanmaktadır. Dolayısıyla bu senaryoda doğrudan bir ekonomik kriter optimize edilmemekte; sonuç olarak birden fazla Pareto-optimal çözüm elde edilmektedir. Bu nedenle, net kar hesaplamaları, final domine edilemeyen çözüm kümesi (final DEÇ) üzerinden seçilen temsili çözümler temel alınarak gerçekleştirilmiş ve tabloya "Birleşik Çözüm" olarak yansıtılmıştır.
- Senaryo 3 ise, Senaryo 2'nin aksine, DÜ ve AAS birimlerinin çok amaçlı ve eşzamanlı optimizasyonuna ek olarak, ekonomik parametreleri doğrudan

içeren bir net kar maksimizasyon fonksiyonu da içermektedir. Bu sayede, optimizasyon doğrudan ekonomik hedefle sonuçlanmakta ve tekil, doğrudan uygulanabilir bir çözüm üretmektedir. Bu nedenle sonucu sağlayan algoritma açık biçimde tabloda belirtilebilmiştir.

**Tablo 3.24** Uygulanan Senaryolar İçin 25 Yıllık Net Kar Karşılaştırması

| | IEEE 30 Baralı Test Sistemi | IEEE 118 Baralı Test Sistemi |
|---|---|---|
| | 25 Yıllık Kar - Algoritma | 25 Yıllık Kar - Algoritma |
| Senaryo 1 | $90,114M – GKO | -$261,379M – GA |
| Senaryo 2 | $89.95M–Birleşik Çözüm (ÇAGKO) | -$119,25M–Birleşik Çözüm (ÇAGA) |
| Senaryo 3 | $124.84M – ÇAGKO | $454,65M – ÇAGA |




**Şekil 3.22** Uygulanan Optimizasyon Senaryoları için 25 yıllık Ekonomik Ömür Boyunca Net Kar Karşılaştırması: (a) IEEE 30-Baralı Test Sistemi (b) IEEE 118-Baralı Test Sistemi

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, DÜ birimlerinin güç sistemine teknik ve ekonomik katkılar sağladığını, ancak bu katkıların anlamlı hale gelebilmesi için sistemin kısa devre arızalarına karşı dayanıklılığının da sağlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. AAS'lerin uygun konum ve değerlerle yerleştirilmesi, yalnızca kısa devre akımlarının kesici sınırları altına çekilmesini değil, aynı zamanda DÜ birimlerinden elde edilen faydaların korunmasını da mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, önerilen optimizasyon algoritmaları aracılığıyla hem teknik performansın artırılması hem de uzun vadeli ekonomik karlılığın sağlanması mümkün olmuştur. Dolayısıyla, DÜ ve AAS birimlerinin birlikte optimize edilmesi, gelecekteki güç sistemleri için daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir çözümler geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

# 4
# KHAAS BÜNYESİNDE ÇALIŞAN HAVA ÇEKİRDEKLİ REAKTÖR İÇİN OPTİMAL TASARIM UYGULAMASI VE PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, katı-hal arıza akım sınırlayıcı (KHAAS) topolojisi içerisinde sürekli olarak devrede olan bir hava çekirdekli reaktörün (HÇR) çok fizikli analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde reaktörün normal ve arıza durumlarındaki elektromanyetik, termal ve elektrostatik davranışları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Simülasyon çalışmaları SEY tabanlı yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, oluşturulan modellerin alçak gerilim test prototipi ile deneysel doğrulamaları sağlanmıştır. Ayrıca, yüksek gerilimli sistem koşulları altında reaktör performansı değerlendirilmiş ve PSCAD ile yapılan karşılaştırmalı analizlerle sonuçların doğruluğu teyit edilmiştir. Bu çalışma ile, modern AAS yapıları içinde görev alan hava çekirdekli reaktörlerin gerçek işletme koşullarında karşılaşabileceği zorlayıcı parametreler çok yönlü bir bakış açısıyla ele alınmış ve güvenilir çalışmayı sağlayacak tasarım yaklaşımları ortaya konmuştur.

## 4.1 Matematik Altyapısı

Bu bölümde, gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarına ait matematik altyapısı sunulmuştur.

### 4.1.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), mühendislikte sınır değer problemlerinin yaklaşık çözümlerini elde etmek için kullanılan sayısal bir tekniktir. Bu yöntemde, çözüm alanı belirli fiziksel özelliklere sahip bir malzeme hacmi olarak tanımlanır ve bu hacimde bir alan değişkeni (örneğin sıcaklık, yer değiştirme vb.) tanımlanarak çözüm aranır. Analitik çözümler çoğu zaman karmaşık geometri ve diferansiyel

denklemler nedeniyle mümkün olmadığından, SEY bu tür problemler için sayısal ve yaklaşık çözüm imkanı sunar.

Her bir sonlu eleman, belirli sayıda düğüm içerir ve bu düğüm noktalarındaki değerler üzerinden eleman içi diğer noktalardaki değerler interpolasyon fonksiyonları aracılığıyla yaklaşık olarak elde edilir. Örneğin, üç düğümlü bir üçgen eleman için alan değişkeni şu şekilde tanımlanabilir [168]:

$$\boldsymbol{\varphi(x,y) \approx N_1(x,y)\varphi_1 + N_2(x,y)\varphi_2 + N_3(x,y)\varphi_3} \quad (4.1)$$

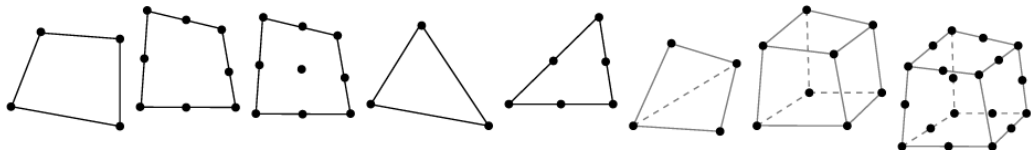
Burada $\varphi_i$, düğüm noktalarındaki değerler; $N_i$, bu değerlere karşılık gelen şekil fonksiyonlarıdır. Şekil fonksiyonları genellikle polinom türündedir ve düğüm noktalarında belirli koşulları sağlamak üzere tasarlanır. Her bir elemanın serbestlik derecesi, düğüm sayısı ile her düğümde hesaplanması gereken alan değişkeni (veya türevlerinin) sayısının çarpımıdır.

SEY yaklaşımında, tüm elemanlar sınır düğümleri üzerinden birbirine bağlanır. Bu yapı sayesinde, alan değişkeninin düğüm noktalarında sürekliliği sağlanır ve fiziksel olarak kabul edilemez olan boşluklar veya kesintiler önlenmiş olur. Ancak, alan değişkeninin türevleri (örneğin gerinim) genellikle elemanlar arasında süreksizdir. Bu durum, özellikle gerinim ve gerilme gibi türevsel büyüklüklerin incelendiği analizlerde dikkatle değerlendirilmelidir. Türevlerdeki süreksizliklerin büyüklüğü, çözümün doğruluğu ve yakınsaklığı hakkında bilgi verir.

#### 4.1.1.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Adımları

SEY analizlerin temel adımları aşağıdaki gibidir [169]:

1. **Verilen çözüm alanının önceden belirlenmiş sonlu elemanlara bölünmesi (mesh generation).**
    - Önceden seçilmiş elemanlardan oluşan bir sonlu elemanlar ağı oluşturulur.
    - Düğüm ve elemanlar numaralandırılır. Örnek eleman ve düğüm yapıları Şekil 4.1'de verilmiştir.
    - Geometrik özellikleri oluşturulur (Koordinatlar, eleman bağlantı bilgileri gibi.).



**Şekil 4.1** SEY İçin Örnek Eleman ve Düğüm Yapıları [170]

2. **Birincil ve ikincil değişkenler arasındaki cebirsel ilişkilerin türetilmesi.**

**Ayrık Sistemler İçin:**

- Sistem içinde tipik eleman tanımlanır.
- Birincil ve ikincil değişkenler (örneğin elektriksel potansiyel ve elektrik alan) arasındaki noktasal (düğüm) ilişkiler cebirsel olarak ifade edilir.

**Sürekli Ortam Problemleri İçin**

- Tipik bir eleman üzerinde diferansiyel denklemlerin zayıf formu oluşturulur.
- Tipik bir bağımlı değişken $u(x)$, aşağıdaki şekilde yaklaşık olarak ifade edilir:

$$u(x) \approx u_i^r(x) = \sum_{j=1}^{n} u_j^r \psi_j^r(x) \tag{4.2}$$

Bu ifadede $u(x)$, çözüm alanındaki bağımlı değişkenin bilinmeyen dağılımını temsil ederken; $u_i^r(x)$, r. eleman için bu değişkenin yaklaşık çözümünü ifade etmektedir. Yaklaşık çözüm, o elemana ait n adet düğüm noktasında tanımlı bilinmeyen $u_j^r$ katsayıları ve önceden belirlenmiş şekil fonksiyonları $\psi_j^r(x)$ kullanılarak elde edilir. Şekil fonksiyonları genellikle polinom yapısındadır ve düğüm noktalarında belirli interpolasyon koşullarını sağlamak üzere seçilir. Bu sayede, çözüm yalnızca sınırlı sayıdaki düğüm değerine indirgenmekte olup, bu değerler üzerinden eleman içindeki tüm noktalar için çözüm yaklaşık olarak elde edilmektedir. Son olarak, Eşitlik (4.2)'de paylaşılan yaklaşık ifade, ilk adımda bahsedilen zayıf forma yerleştirilerek aşağıdaki matris denklem formu elde edilir.

$$K^r u^r = F^r \tag{4.3}$$

Bu ifadede, $K^r$ r. elemana ait sertlik (stifness) matrisi olup malzeme özellikleri, şekil fonksiyonları ve türevlerinden oluşur.

- Literatürde mevcutsa, uygun interpolasyon fonksiyonları $\psi_j^r(x)$ doğrudan seçilmektedir. Aksi takdirde, bu fonksiyonlar problem geometrisine ve düğüm yerleşimine bağlı olarak türetildikten sonra, elde edilen ifadeler kullanılarak ilgili eleman matrisleri hesaplanır. $u^r$ r. elemanın bilinmeyen düğüm noktası değerleridir. Birincil çözüm değişkenini ifade eder. $F^r$ r. elemana ait yük vektörü veya kaynak terimidir. Tablo 4.1'de bahsi geçen kavramlar özetlenerek elektriksel analizler için örneklendirilmiştir.

**Tablo 4.1** SEY Kavramları

| Kavram | Değişken Türü | SEY'deki Görevi |
|---|---|---|
| Potansiyel | Birincil değişken | SEY ile çözülür. $u$ vektörünü oluşturur |
| Elektrik Alan | İkincil Değişken | Potansiyel' |
| Yük Yoğunluğu | Kaynak Terimi | F vektörünü belirler |
| Sertlik Matrisi (K) | Sistem katsayısı | Fiziksel sistemin davranışını yansıtır. |

**3. Eleman denklemlerinin tüm probleme ait denklemlere dönüştürülmesi.**

Sonlu elemanlar yönteminde her eleman için ayrı ayrı elde edilen matris denklemleri, sistemin tamamına uygulanabilmesi için birleştirilmelidir. Bu sürece bir araya getirme (assembly) adı verilir.

- Öncelikle, birincil değişkenler açısından elemanlar arası süreklilik koşulları belirlenir. Bu, yerel serbestlik dereceleri ile küresel (global) serbestlik dereceleri arasındaki bağlantının kurulması anlamına gelir. Eleman düzeyinde tanımlanan düğüm noktaları, tüm sistemdeki küresel düğümlere karşılık gelecek şekilde eşleştirilir. Böylece, aynı fiziksel noktaya denk gelen farklı eleman düğümlerinin ortak bir değeri paylaşması sağlanarak fiziksel tutarlılık korunur.
- Daha sonra, ikincil değişkenler açısından denge koşulları tanımlanır. Buradaki amaç, yerel kaynak terimlerinin ya da iç kuvvetlerin, sistem genelindeki sınır ve yük koşullarıyla tutarlı olacak şekilde dağıtılmasını sağlamaktır.

- Son olarak, yukarıdaki adımlarında kurulan süreklilik ve denge koşulları dikkate alınarak, her bir elemanın denklemleri sistem matrisinde doğru konumlara yerleştirilir. Böylece tüm çözüm alanını temsil eden küresel sistem denklem seti elde edilir.

4. **Problemin sınır koşullarının uygulanması**

- Küresel birincil serbestlik dereceleri belirlenir.
- Eğer daha önce yapılmamışsa, küresel ikincil serbestlik dereceleri de belirlenir.

5. **Elde edilen denklem sisteminin çözülmesi.**
6. **Sonuçların işlenmesi**

- 5. adımda elde edilen birincil serbestlik derecelerine dayalı olarak, çözümün gradyeni ya da analiz türüne bağlı olarak istenen diğer fiziksel büyüklükler hesaplanır.
- Sonuçlar tablo veya grafik biçiminde sunulur.

### 4.1.2 Temel Alan Denklemleri

#### 4.1.2.1 Manyetik Alan ve Elektrik Alan Analizlerine Ait Denklemler

Zamana bağlı elektromanyetik analizlerde kullanılan manyetik alan denklemleri aşağıdaki gibidir [171]:

$$\boldsymbol{J} = \sigma(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathrm{t}}) + \boldsymbol{J_e} + \sigma \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \tag{4.4}$$

$$\nabla \times \mathrm{H} = \boldsymbol{J} \tag{4.5}$$

$$\boldsymbol{B} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{4.6}$$

Hava çekirdekli reaktöre J akım yoğunluğunun uygulanması, B akı yoğunluğunun oluşmasına neden olur. Daha sonra, HÇR akımının akı yoğunluğu ile etkileşimi, $d\mathbf{F_L}$ kuvvet yoğunluğu ile karakterize edilen Lorentz kuvvetlerini üretir ve bu kuvvet yoğunluğu şu şekilde ifade edilir:

$$d\boldsymbol{F}_L = \boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B} \tag{4.7}$$

Ayrıca belirli bir hacimde Lorentz kuvveti şu şekilde hesaplanır:

$$\boldsymbol{F}_L = \int_{\boldsymbol{v}} d\boldsymbol{F}_L dV \tag{4.8}$$

Burada σ elektriksel iletkenlik (S/m), **H** manyetik alan (A/m), **A** vektör potansiyeli (Wb/m), **B** manyetik akı yoğunluğu (T), $\boldsymbol{v}$ hız (m/s), **J** akım yoğunluğu (A/m$^2$), $\mathbf{J_e}$

harici akım yoğunluğu (A/m$^2$), $\mathbf{F_L}$ Lorenz Kuvveti (N) ve V hacimdir (m$^3$). Simülasyon modeli herhangi bir dinamik nesne içermediğinden $\boldsymbol{v}$ sıfırdır.

Diğer yandan, elektrik alan analizleri aşağıdaki formüllere göre gerçekleştirilmektedir [172]:

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = 0 \tag{4.9}$$

Eşitlik (4.9) elektrik alanın irrotasyonel olduğunu göstermektedir.

$$\nabla . \boldsymbol{D} = \rho \tag{4.10}$$

$$-\nabla \mathrm{V} = \boldsymbol{E} \tag{4.11}$$

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \boldsymbol{E} \tag{4.12}$$

Denklem (4.11) ve (4.12)'de tanımlanan elektrik alan ve elektriksel yer değiştirme ifadeleri, Denklem (4.10)'da yerine konulduğunda, ortaya çıkan Denklem (4.13), elektrostatik potansiyel ile uzay yükü yoğunluğu arasındaki ilişkiyi ortaya koyar. Bu ifade, potansiyel ile incelenen sistemdeki elektrik yükü dağılımı arasındaki bağlantıyı kurduğundan dolayı elektrostatik analiz açısından kritik öneme sahiptir.

$$-\nabla . (\varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla \mathrm{V}) = \rho \tag{4.13}$$

#### 4.1.2.2 Isıl Analizler

HÇR üzerinde gerçekleştirilen termal analizlerdeki ısı kaynağı, Eşitlik (4.14)'de ifade edidiği üzere, HÇR'nin çalışması sırasında meydana gelen manyetik (eddy akımı) ve direnç kaynaklı kayıpların toplamından oluşmaktadır.

$$Q_e = Q_{rh} + Q_{ml} \tag{4.14}$$

Burada $Q_e$, toplam ısı kaynağını (W/m³), $Q_{rh}$ direnç kaynaklı kayıpları (W/m³) ve $Q_{ml}$ manyetik (eddy) kayıpları (W/m³) temsil etmektedir. Rezistif ve manyetik kayıplara ilişkin denklemler aşağıda verilmiştir [173]:

$$Q_{rh} = \frac{1}{2} R_e(\boldsymbol{J} \cdot \boldsymbol{E}^*) \tag{4.15}$$

$$Q_{ml} = \frac{1}{2} R_e(i\omega \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{H}^*) \tag{4.16}$$

Burada $\boldsymbol{J}$ akım yoğunluğunu (A/m²), $\boldsymbol{E}$ elektrik alan yoğunluğunu (kV/mm), $\omega$ açısal frekansı (rad/s), $\boldsymbol{B}$ manyetik akı yoğunluğunu (T), $\boldsymbol{H}$ manyetik alanı (A/m) ve Re() operatörü ise verilen büyüklüğün reel kısmını temsil etmektedir.

Rezistif ve manyetik kayıplar nedeniyle üretilen ısı, iletim (conduction), taşınım (convection) ve ışıma (radiation) olmak üzere üç farklı mekanizma yoluyla ortamdan uzaklaştırılmaktadır [173,174]. İletim mekanizmasına ait ifade aşağıda paylaşılmıştır.

$$q = -k \,.\nabla \mathrm{T} \tag{4.17}$$

Burada $q$, ısı akısı yoğunluğunu (W/m²), $k$, ısıl iletkenlik katsayısını (W/m·K) ve ∇T, sıcaklık gradyanını (K/m) temsil eder. Sıcaklık gradyanı, sıcaklığın uzayda konuma göre değişim hızını gösteren vektörel bir alan büyüklüğüdür.

HÇR katmanları etrafındaki hava tarafından sağlanan taşınım (konveksiyon) süreci; süreklilik denklemi, momentum denklemleri (Navier-Stokes) ve enerji denklemi ile tanımlanmaktadır [174]. İlgili mekanizmalara ait ifadeler sırasıyla aşağıda paylaşılmıştır [173,175,176].

$$\nabla.(\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{4.18}$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \tag{4.19}$$

$$\rho \mathrm{Cp}(\mathrm{u} \cdot \nabla)\mathrm{T} = \nabla \cdot (\mathrm{k}\nabla \mathrm{T}) + \mathrm{Q} \tag{4.20}$$

Burada ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m³), **u** akışkanın hızını (m/s), p akışkanın sabit basıncını (Pa), μ akışkanın dinamik viskozitesini (Pa·s), **g** yerçekimi ivmesini (m/s²), Cp sabit basınçtaki özgül ısı kapasitesini (J/kg·K), T sıcaklığı (K), k ısıl iletkenliği (W/m·K) ve Q içsel ısı üretimini (W/m³) temsil etmektedir.

Süreklilik denklemi, sıkıştırılamaz akışkanlar için, akışkanın herhangi bir noktada birikme veya azalma göstermediğini ifade ederken, momentum denklemi, bir akışkan parçacığı üzerine etki eden kuvvetleri (taşınımla oluşan ivme, basınç kuvvetleri, viskoz kuvvetler ve yerçekimi kuvvetleri) arasındaki dengeyi

tanımlamaktadır. Enerji denklemi ise bir malzeme içindeki sıcaklık değişiminin; ısı taşınımının (convection), ısı iletiminin (conduction) ve ısı üretiminin (heat generation) toplamına bağlı olduğunu ifade etmektedir.

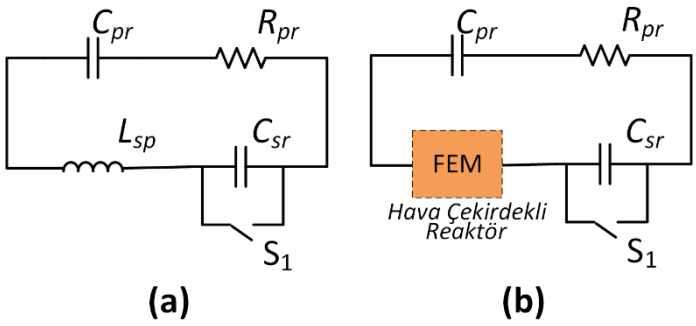
Simülasyonlar sırasında, ışıma yoluyla gerçekleşen ısı transferi, enerji denkleminin içinde doğrudan yer almasa da sistemin sınır koşullarında ayrı bir mekanizma olarak modellenmiştir. Bu sürece ilişkin matematiksel ifade aşağıda verilmiştir [175,176].

$$q_{ışınım} = \epsilon \sigma_b (T_1^4 - T_2^4) \tag{4.21}$$

Burada $q$, net ışıma ile ısı transferini (W/m²), $\epsilon$, malzemelerin yayınım katsayısını, $\sigma_b$Stefan–Boltzmann sabitini (W/m²·K⁴), $T_1$ ve $T_2$ ise sırasıyla sıcak ve soğuk yüzeylerin sıcaklıklarını (K) temsil etmektedir.

## 4.2 SPRAAS Topolojisinin ve Test Sistemlerinin Tanıtılması

Tez çalışmasında, etkinliği daha önce kanıtlanmış olan seri-paralel rezonans tipi KHAAS kullanılmıştır [97,177]. Simülasyon çalışmaları ve SEY tabanlı modelin doğrulanmasında kullanılan alçak gerilim prototipi, Şekil 4.2'de gösterilen KHAAS topolojisine göre yapılandırılmıştır.




**Şekil 4.2** SPRAAS (a) Topoloji (b) SEY Entegrasyonu

Normal çalışma sırasında, $L_{sp}$ ve $C_{sr}$ bileşenleri 50 Hz şebeke frekansında seri rezonans halindedir. Bu durumda hat akımı, AAS'nin alt kolundan geçer ve sistem, güç sistemine karşı ihmal edilebilir düzeyde bir empedans gösterir. Diğer yandan, bir arıza meydana geldiğinde $S_1$ anahtarı kapanır ve $C_{sr}$ bileşeni devre dışı bırakılarak kısa devre edilir. Böylece seri rezonans durumu ortadan kalkar ve AAS, $L_{sp}$ ile $C_{pr}$ arasındaki paralel rezonans sayesinde yüksek empedans göstermeye

başlar. SPRAAS alçak gerilim prototipine ait bileşenlerin değerleri Tablo 4.2'de sunulmuştur.

**Tablo 4.2** SPRAAS Parametreleri

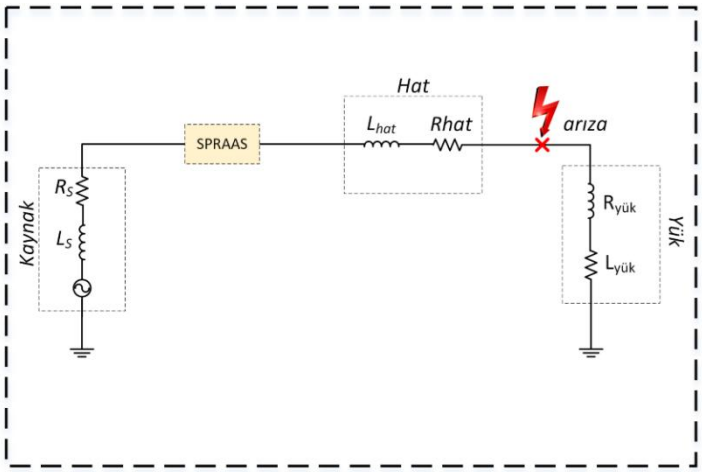
| Parametre | | Değer |
|---|---|---|
| Seri – Paralel Endüktans | $L_{sp}$ | 101.6 mH |
| Seri Kapasitör | $C_{sr}$ | 100 µF |
| Paralel Kapasitör | $C_{pr}$ | 100 µF |
| Direnç | $R_{pr}$ | 21 Ω |
| $S_1$ anahtarlama süresi | $t_s$ | 14 µs |

Normal çalışma koşullarında, $L_{sp}$ neredeyse tüm hat akımını taşımaktadır. Ayrıca, herhangi bir güç sistemi arızası durumunda $C_{pr}$ ve $R_{pr}$ bileşenleriyle birlikte yüksek empedans gösterme görevine sahip olduğundan dolayı arıza akımlarının sınırlandırılmasında kritik bir rol üstlenmektedir. Hem normal hem de arıza koşullarında işletimde olması nedeniyle, $L_{sp}$ SPRAAS topolojisinin en önemli bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Buradan hareketle, $L_{sp}$ simülasyon ortamında hava çekirdekli reaktör olarak modellenmiş ve SPRAAS topolojisine entegre edilmiştir.

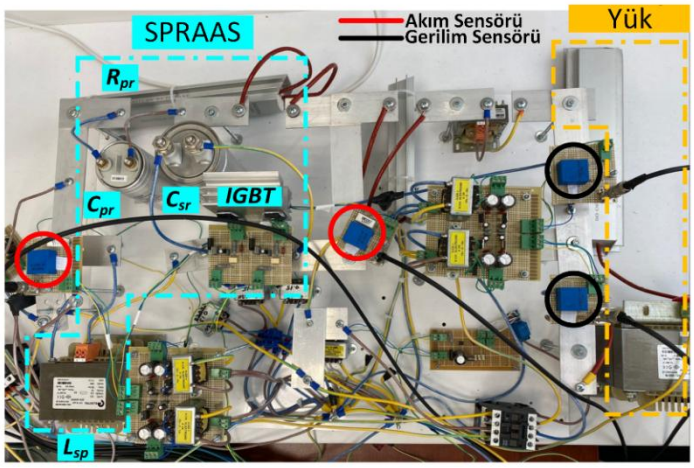
SPRAAS içerisindeki HÇR'nin termal ve elektriksel performans analizleri, Şekil 4.3 (a)'da paylaşılan iki baralı test sistemini temel alan yüksek gerilim simülasyonlarında gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan HÇR modelini içeren SPRAAS davranışının deneysel doğrulaması ise Şekil 4.3 (b)'de gösterilen alçak gerilim prototipi ile karşılaştırmalı analizler neticesinde elde edilmiştir. Alçak gerilim prototipi, Şekil 4.3 (a)'da verilen iki baralı test sisteminden yola çıkarak oluşturulmuştur. Yüksek gerilim test sistemi ve alçak gerilim test prototipinin devre parametreleri aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Hava çekirdekli reaktör tercihi, arıza anında oluşabilecek manyetik doyumun önlenmesi gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu tercih, geleneksel bir güç sistemi ekipmanının modern bir AAS yapısı içinde entegre edilmesine olanak sağlamaktadır.




(a)




(b)

**Şekil 4.3** İki Baralı Test Sistemi (a) Bağlantı Şeması (b) Alçak Gerilim Prototipi

**Tablo 4.3** Kullanılan Test Sistemlerine Ait Devre Parametreleri

| **Parametere** | | **Alçak Gerilim Test Prototipi** | **Yüksek Gerilim Simülasyonu** |
|---|---|---|---|
| Gerilim (RMS) | V | 220 V | 20 kV |
| Frekans | f | 50 Hz | 50 Hz |
| Kaynak Direnci | $R_s$ | - | 1 Ω |
| Kaynak Endüktansı | $L_s$ | - | 0.01 H |
| Hat Direnci | $R_{hat}$ | 3.5 Ω | 1 Ω |
| Hat Endüktansı | $L_{hat}$ | 0.01 H | 0.01 H |
| Yük Direnci | $R_{yük}$ | 52.23 Ω | 48.4 Ω |
| Yük Endüktansı | $L_{yük}$ | 0.095 H | 0.1 H |
| Arıza Direnci | $R_a$ | 0.1 Ω | 0.1 Ω |
| Arıza Süresi | $t_a$ | 0.13 s | 0.13 s |

## 4.3 Yüksek Gerilim Seviyesi İçin Hava Çekirdekli Reaktör Tasarım Parametrelerinin İncelenmesi ve Optimal Yapının Belirlenmesi

Bu bölümde, HÇR modelinin yüksek gerilim seviyesindeki performansına yönelik tasarım parametrelerinin incelenmesi ve SPRAAS bünyesine entregre edilecek en uygun yapının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, SPRAAS topolojisinin bir bileşeni olarak görev yapan hava çekirdekli reaktörün (HÇR) performansını etkileyen temel tasarım parametreleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, farklı iletken kesitleri, katman (encapsulation) sayıları ve hava kanalı (air duct) açıklıkları dikkate alınarak, SPRAAS prototipindeki endüktans değeri olan, 101.6 mH endüktansı sağlayan alternatif tasarımlar oluşturulduktan sonra, sonlu elemanlar yöntemi ile ısıl ve elektriksel analizlere tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek optimal tasarım belirlenmiştir. Bu sayede, yüksek gerilim simülasyon çalışmasında kullanılacak HÇR yapısının belirlenmesi hedeflenmiştir.

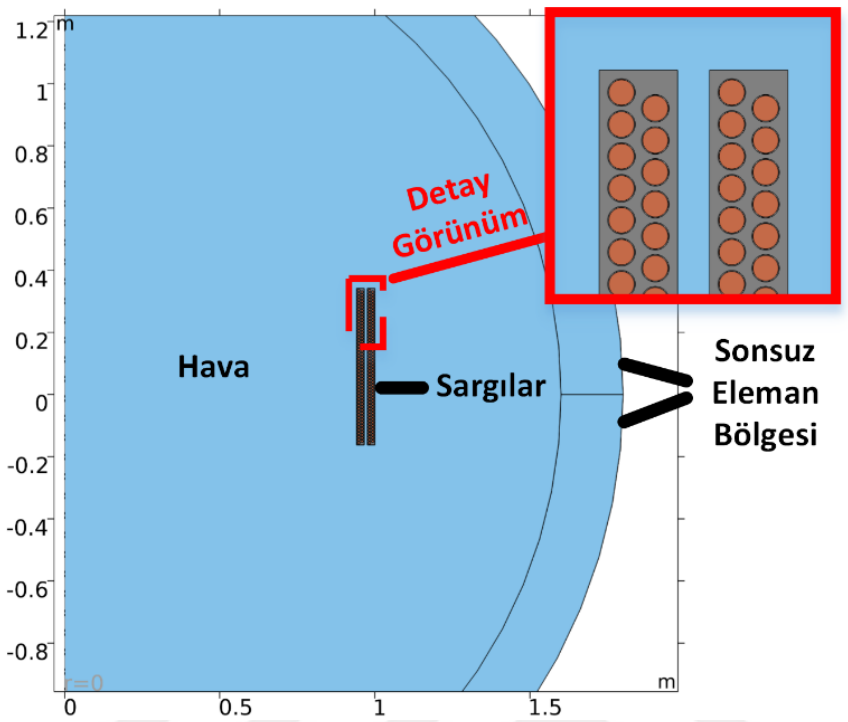
Tablo 4.3'te paylaşılan yüksek gerilim test sisteminde, HÇR nominal akımı 257.7 A değerindedir. Bölüm 4.2'de belirtildiği üzere SPRAAS yapısındaki HÇR nominal çalışma sırasında, seri rezonans nedeniyle, hat akımının neredeyse tamamını taşımaktadır. Bu nedenle, sürekli çalışmada göstereceği termal ve elektriksel davranış önemlidir. Buradan hareketle, farklı HÇR yapıları nominal akım ile test edilmiş ve değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon çalışmaları, HÇR'nin eksenel simetrik yapısı göz önünde bulundurularak 2B eksenel simetrik geometride gerçekleştirilmiştir. Bu sayede hem işlem yükü hem de çözüm süresi kayda değer ölçüde azaltılmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen Sonlu Elemanlar Yöntemi temelli simülasyonlara ait işlem adımları aşağıdaki gibidir:

**a. Geometrinin Tanımlanması (2B Eksenel Simetrik):**

Bu aşamada, iletken sargıların, hava bölgesinin, katman malzemesinin ve hava kanallarının geometrik yapıları oluşturulmaktadır. Örnek simülasyon geometrisi Şekil 4.4'de göstermiştir. Bilindiği üzere, sonlu elemanlar yöntemi temelli simülasyon çalışmalarında, toplam simülasyon alanı, sonuçların yüksek doğrulukla elde edilebilmesi açısından yeterli büyüklükte seçilmelidir. Şekil 4.4'te gösterilen "Sonsuz Eleman Bölgesi", simülasyon alanının büyüklüğünü sanal bir şekilde

sonsuz hale getirmekte olup, sonuçların yüksek doğrulukla elde edilmesini sağlamaktadır.



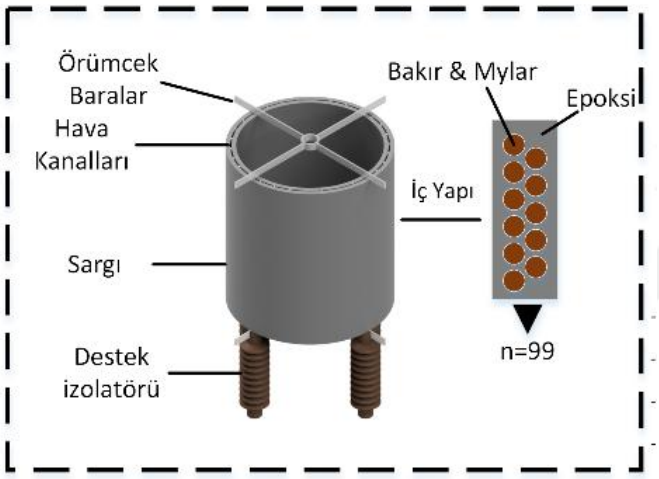

**Şekil 4.4** Örnek 2B Eksenel Simetrik Simülasyon Görüntüsü

**b. Fiziksel Modül Seçimi**

Bu adımda, gerçekleştirilen ısıl ve elektriksel analizlerde kullanılacak fizik modelleri seçilmektedir. Simülasyon süreci, çok fizikli bir yaklaşımla kurgulanmış olup dört temel fiziksel modeli içermektedir. İlk aşamada, sistemin elektriksel davranışı devre temelli bir model aracılığıyla analiz edilerek HÇR üzerine düşen gerilim elde edilmektedir. Gerilim bilgisi, ikinci aşamada elektrik ve manyetik alanların çözümlendiği modele aktarılmış olup, burada hem manyetik hem de elektrik alan dağılımları belirlenmiştir. Üçüncü aşamada, elektromanyetik modelin çıktısı olan Eddy kayıpları ve direnç kaynaklı ısı üretimi bilgisi, ısıl analiz modeline aktarılmış ve sistemin sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Son olarak, sıcaklık dağılımı ve sınır koşulları temel alınarak gerçekleştirilen akış modelinde, hava hareketinin etkileri simülasyona dahil edilerek doğal taşınım (konveksiyon) mekanizması simüle edilmiştir. Tüm bu fiziksel etkileşimler, elektriksel ve termal çıktılarla birlikte kapsamlı bir performans analizine olanak sağlamıştır.

**c. Malzeme Atamaları**

Bu aşamada, iletken, hava, yalıtım malzemesi gibi bölgeler için uygun malzeme seçimleri yapılmaktadır. Sargı katmanlarını oluşturan muhafaza malzemesi olarak epoksi, sargı iletkeni olarak bakır ve sargı yalıtkanı olarak Mylar (PET) simülasyon programı içerisindeki malzeme kütüphanesi kullanılarak modele entegre edilmiştir. HÇR malzeme ve geometrik yapısı Şekil 4.5'te sunulmuştur.




**Şekil 4.5** HÇR Genel Yapısı

**d. Bobin Sarımlarının Tanımlanması**

Manyetik alan fiziği içeresinden bobin (coil) elemanı seçilerek, Şekil 4.4'te turuncu renkte gösterilen sargı elemanları tanımlanmaktadır.

**e. Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması**

HÇR ve çevresindeki tüm simülasyon alanı için sonlu elemanlar ağı oluşturulmaktadır.

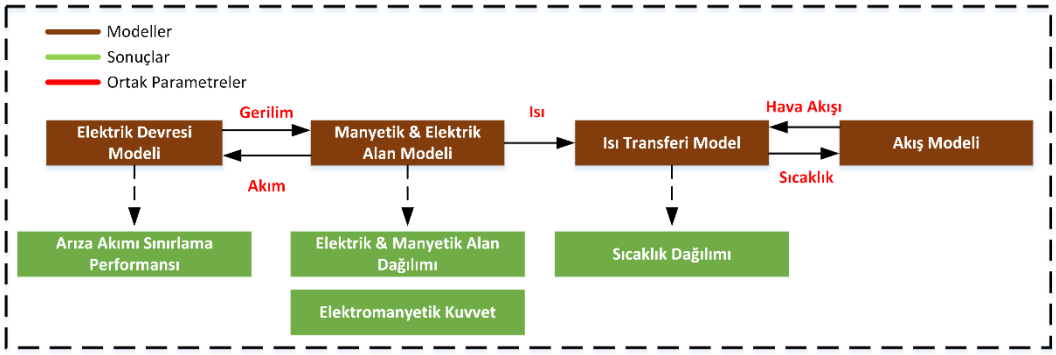
**f. Çözücü Ayarları**

HÇR modelinin hem frekans domeninde hem de zamana bağlı olarak incelenebilmesi için frequency-transient çalışma türü uygulanmıştır. Sayısal çözüm sürecinde yüksek performanslı doğrudan çözücü olan PARDISO kullanılmıştır.

**g. Sonuçların Analizi**

Simülasyon sonucunda ilgili ısıl ve elektriksel büyüklükler 2 boyutlu dağılım grafikleri ve sayısal değerler aracılığıyla değerlendirilmiştir.

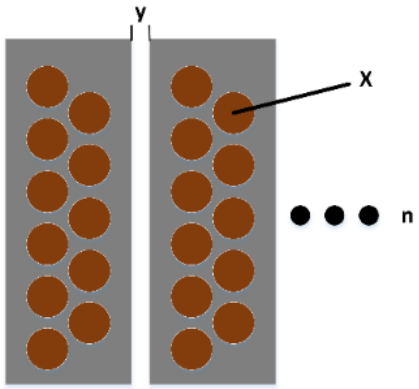
Şekil 4.6'da HÇR modelleme yöntemi ve simülasyon neticesinde elde edilen büyüklükler gösterilmiştir.




**Şekil 4.6** Hava Çekirdekli Reaktör İçin Çok Fizikli Simülasyon Yaklaşımı

### 4.3.1 HÇR Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu bölümde, HÇR temel yapısını oluşturan, sargı katman sayısı (n), iletken kesiti (x) ve katmanlar arası hava kanalı mesafeleri (y) belirlenmiştir. İlgili parametreler Şekil 4.7'de sunulmuştur.




**Şekil 4.7** HÇR Tasarım Parametreleri

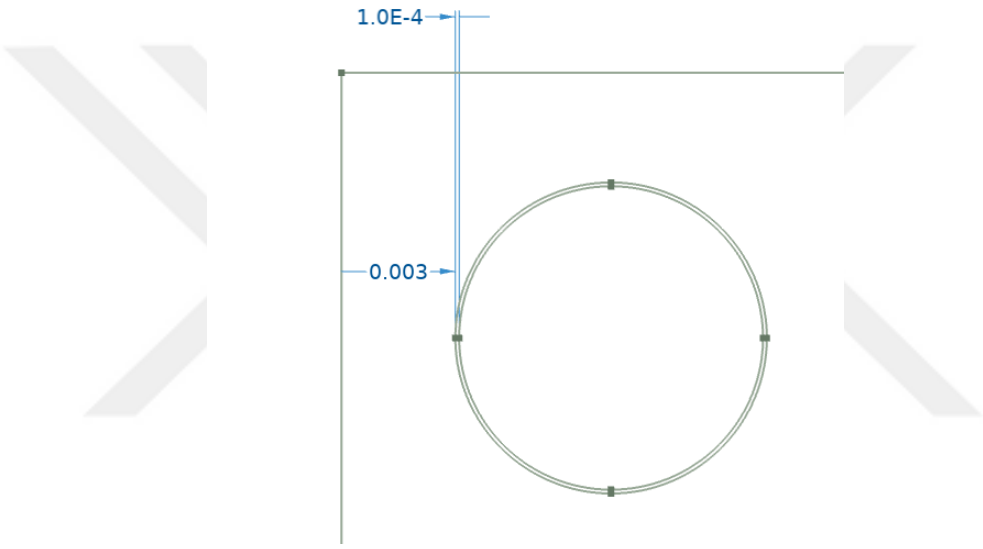
Tasarımlar sırasında, HÇR'nin sürekli akımı olan 257,7 A esas alınmış ve endüktans değerinin alçak gerilim prototipine uygun şekilde 101.6 mH olması hedeflenmiştir. Simülasyon öncesi, yaklaşık endüktans değeri, Eşitlik (4.22)'de gösterilen Wheeler Formülü ile hesaplanmıştır [178].

$$L_{HÇR} = \frac{(\frac{(r_{dış} + r_{iç})}{2})^2 \times {N_{Sarım}}^2}{19\left(\frac{r_{dış} + r_{iç}}{2}\right) + 29l + 32(r_{dış} - r_{iç})} \times 10^{-3} \qquad (4.22)$$

Burada $L_{HÇR}$, reaktörün endüktansı (mH), $r_{dış}$ ve $r_{iç}$, reaktörün dış ve iç yarıçapları (cm), N toplam sarım sayısı ve $l$ reaktörün toplam yüksekliği (cm) olarak

tanımlanmıştır. Bu formül ile yaklaşık endüktans hesabı gerçekleştirildikten sonra, hedeflenen endüktans değerine ulaşmak amacıyla gerekli ayarlamalar simülasyon ortamında yapılmıştır. SEY temelli simülasyonlar, hava kanalları, sarım yerleşimlerindeki düzensizlikler gibi geometrik detayları ve reaktör içerisindeki elektromanyetik etkileşimleri dikkate alabilme yeteneğiyle bu süreçte hassas bir endüktans hesaplaması sağlamıştır.

Tasarlanan tüm HÇR modellerinde, sargı yalıtımı için 0,1 mm kalınlığında Mylar ve sargıların dış koruması için ise 3 mm kalınlığında epoksi muhafaza kullanılmıştır. İlgili mesafeler Şekil 4.8'de gösterilmiştir.




**Şekil 4.8** Metre Cinsinden Mylar Kalınlığı ve Epoksi Sargı Muhafazası Dış Kalınlığı

Çalışmada kullanılan yüksek gerilim test sisteminde, normal çalışma sırasında HÇR'nin taşıdığı akım 257,7 A ve üzerine uygulanan gerilim değeri 8 kV olmaktadır. Buradan hareketle, tasarım parametreleri bu işletme koşulları dikkate alınarak seçilmiştir. Simülasyon çalışmaları sırasında ortam sıcaklığı 20 °C olarak belirlenmiş ve tüm malzemelerin başlangıç sıcaklıkları bu değere sabitlenmiştir. Modelin dış sınırları, akışkan hareketine izin verecek şekilde açık sınır koşulu ile tanımlanmıştır.

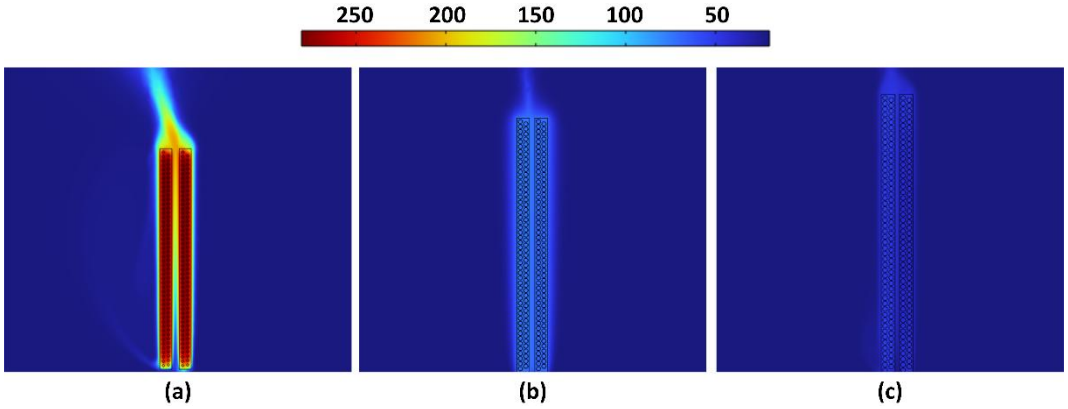
Elektrik alan analizleri sırasında, simülasyonun dış sınırına toprak sınır koşulu uygulanmış, sargılar boyunca oluşan gerilim düşüşü ile elektriksel potansiyel sınır koşulu otomatik olarak tanımlanmıştır. Bu durum, elektrik alanın katmanlar

arasında yoğunlaştığı bir dağılıma neden olmakta ve yüksek gerilim stresinin oluşabileceği bölgeleri işaret etmektedir.

#### 4.3.1.1 Sargı İletken Kesitinin Belirlenmesi

Hava çekirdekli reaktörün elektriksel ve termal performansını doğrudan etkileyen en önemli tasarım parametrelerinden biri sargı iletken kesitidir. Bu kapsamda, HÇR sargılarında kullanılabilecek iletken boyutunun belirlenmesi amacıyla, yarıçapları sırasıyla 2 mm, 4 mm ve 6 mm olan bakır iletkenler, 257,7 A nominal akım altında 2 katmanlı HÇR yapısında test edilmiştir. Isıl ve elektriksel etkiler dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda, sargı iletken kesitine karar verilmiştir. İletken kesitinin endüktans değeri üzerindeki doğrudan etkisi nedeniyle, hedeflenen 101,6 mH endüktans değerine ulaşmak amacıyla reaktörün fiziksel genişliği ilgili endüktans değerini sağlayacak şekilde ayarlanarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.9'da, belirtilen kesit değerleri için sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda, 2 mm yarıçaplı iletkenin yüksek akım yoğunluğu nedeniyle aşırı ısındığı ve HÇR'nin 280,4 °C sıcaklık ile yalıtım termal sınırlarının çok üzerinde sıcaklıklara ulaştığı görülmüştür.



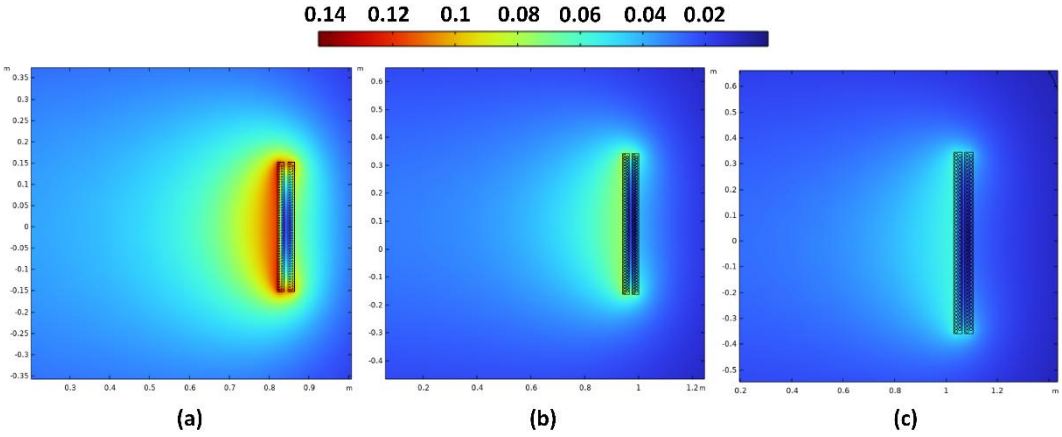

**Şekil 4.9** İletken Yarıçaplarına Göre HÇR Sıcaklık Dağılımı (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm

Hava çekirdekli reaktörlerin sargı yalıtımlarında sıkça kullanılan [179,180] ve tez kapsamındaki tasarımlara dahil edilen Mylar, termal kararlılığını +150°C'ye kadar koruyabilirken, 250°C civarındaki sıcaklıklarda erimeye başladığı üretici kataloglarında belirtilmektedir [181–184]. Epoksi malzemeler F sınıfı yalıtkan olarak sınıflandırılmakta ve Mylar malzemeler ise farklı üretim teknikleri ile birlikte B veya F sınıfı yalıtkan olarak değerlendirilmektedir [181–185]. Bu

malzemeleri barındıran hava çekirdekli reaktörler, ortam sıcaklığına göre sargılara ait ortalama sıcaklık artışı 80°C (Sınıf B) ve 100°C (Sınıf F), maksimum sıcaklık artışı ise 110°C (Sınıf B) ve 135°C (Sınıf F) ile sınırlandırılmaktadır [186, 187]. Bu durum, bu kesitin istenilen HÇR yapısı için uygun olmadığını ortaya koymaktadır.

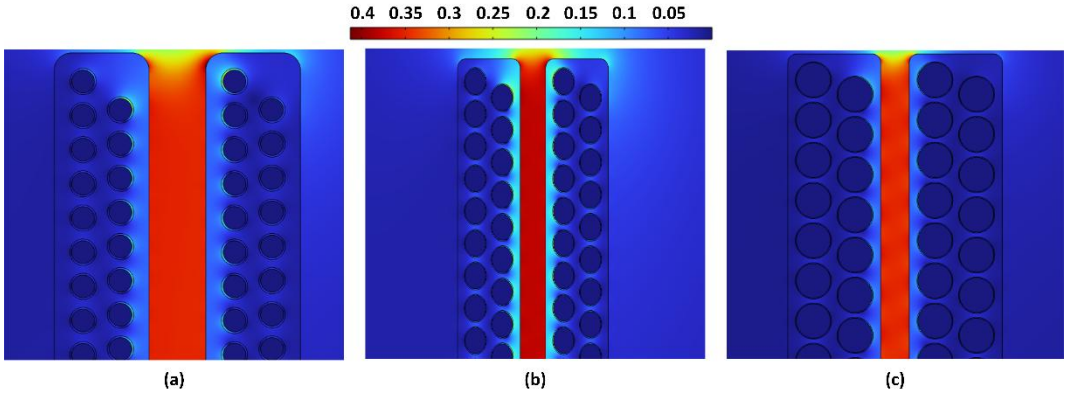
Diğer yandan, 6 mm yarıçaplı iletkenin sıcaklık dağılımı daha homojen bir davranış sergilerken, HÇR maksimum sıcaklık değeri 54,76°C olmuştur. 4 mm yarıçaplı iletkene sahip HÇR yapısı ise 74,60°C maksimum sıcaklığa erişmiştir.

Manyetik alan analizleri neticesinde elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları Şekil 4.10'da sunulmuştur. Manyetik akının iletken kesiti ile ters orantılı şekilde değiştiği görülmüştür. Maksimum manyetik akı yoğunluğu değerleri 2, 4 ve 6 mm iletken yarıçapına sahip HÇR'ler için sırasıyla, 0,1486 T, 0,0860 T ve 0,0620 T olmuştur.



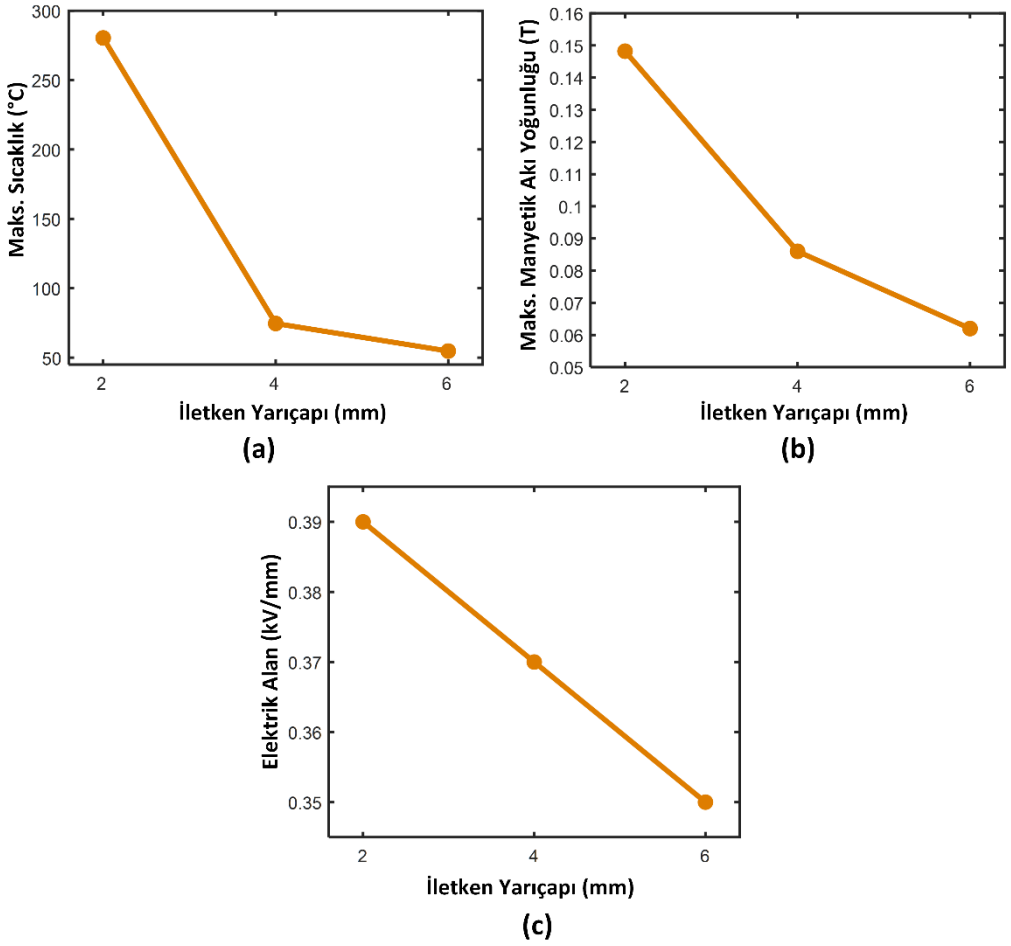

**Şekil 4.10** İletken Yarıçaplarına Göre Manyetik Akı Yoğunluğu Dağılımı (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm

Şekil 4.11 incelendiğinde elektrik alanın sargı katmanları arasında yoğunlaştığı açıkça görülmektedir. Gerçekleştirilen elektrik alan analizleri neticesinde, iletken kesitinin oluşan toplam elektrik alan üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olduğu görülmüştür. 2, 4 ve 6 mm'lik yarıçaplar için sırasıyla oluşan maksimum elektrik alan değerleri; 0,39 kV/mm, 0,37 kV/mm ve 0,35 kV/mm olmuştur. Üretici kataloglarında, sargı yalıtımı olan Mylar malzemenin 0.1 mm'lik üretimleri için delinme geriliminin 11 kV - 15 kV aralığında değiştiği görülmektedir [181–184].




**Şekil 4.11** İletken Yarıçaplarına Göre Elektrik Alan Dağılımı (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm

Meydana gelen elektrik alan büyüklüklerinin yalıtım malzemesini zorlamadığı açık şekilde görülmektedir.




**Şekil 4.12** Farklı İletken Yarıçaplarının HÇR Performansına Etkisi (a) Maksimum Sıcaklık (b) Maksimum Manyetik Akı Yoğunluğu (c) Maksimum Elektrik Alan

Şekil 4.12'de iletken yarıçaplarının HÇR performansına etkisi özetlenmiştir. Grafikler incelendiğinde, 2 mm yarıçaplı iletkenin yüksek akım yoğunluğu nedeniyle aşırı ısındığı ve ulaştığı 280,4 °C ile termal sınırların çok üzerinde sıcaklıklara ulaştığı görülmüştür. Bu durum, bu kesitin HÇR uygulamaları için uygun olmadığını ortaya koymaktadır. Diğer yandan, 6 mm yarıçaplı iletkene sahip HÇR'nin maksimum sıcaklık değeri (54,76°C) daha düşük olsa da bu durumda kullanılan iletken miktarı önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, ekonomik açıdan gereksiz malzeme tüketimine yol açmaktadır. 4 mm yarıçaplı iletken ise hem yalıtım malzemelerinin termal güvenli çalışma sınırları içinde kalmakta hem de malzeme kullanımı açısından daha dengeli bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, teknik yeterlilik ve maliyet-etkinlik dengesine göre 4 mm yarıçaplı iletken en uygun seçenek olarak ortaya çıkmıştır.

#### 4.3.1.2 HÇR Katman Sayısının Belirlenmesi

Hava çekirdekli reaktörün temel tasarım parametrelerinden biri de iletken sargıların katman (encapsulation) sayısıdır. Bu bölümde, sabit endüktans ve nominal işletme koşulları altında, sabit sarım sayısında farklı katman sayıları ile oluşturulan HÇR yapılarına ait ısıl ve elektriksel davranışlar karşılaştırılarak optimal katman sayısı belirlenmiştir.

Tüm yapılarda iletken yarıçapı önceki bölümde belirlendiği gibi 4 mm olarak ayarlanmıştır. Karşılaştırması yapılan HÇR yapılarına ait geometrik bilgiler Tablo 4.4'te sunulmuştur.

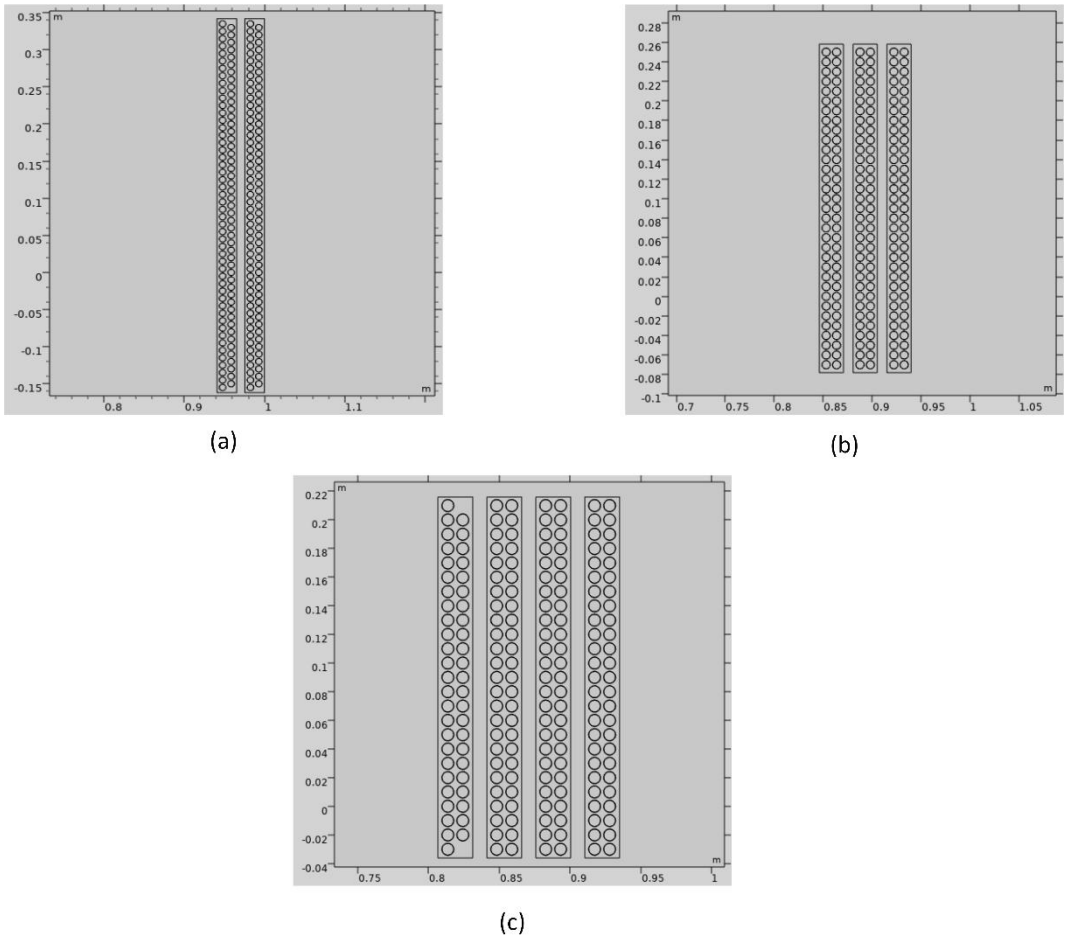
**Tablo 4.4** Farklı Katman Sayılarına Sahip HÇR'lere Ait Parametreler

| Parametre | 2 Katmanlı | 3 Katmanlı | 4 Katmanlı |
|---|---|---|---|
| Endüktans Değeri | 101.6 mH | 101.6 mH | 101.6 mH |
| Toplam Sarım Sayısı | 198 | 198 | 198 |
| Dış Yarıçap | 100 cm | 94 cm | 93.5 cm |
| İç Yarıçap | 94.08 cm | 84.62 cm | 80.66 cm |
| Katman Yüksekliği | 50 cm | 33.6 cm | 25.2 cm |
| Hava Boşluğu Mesafesi | 1 cm | 1 cm | 1 cm |

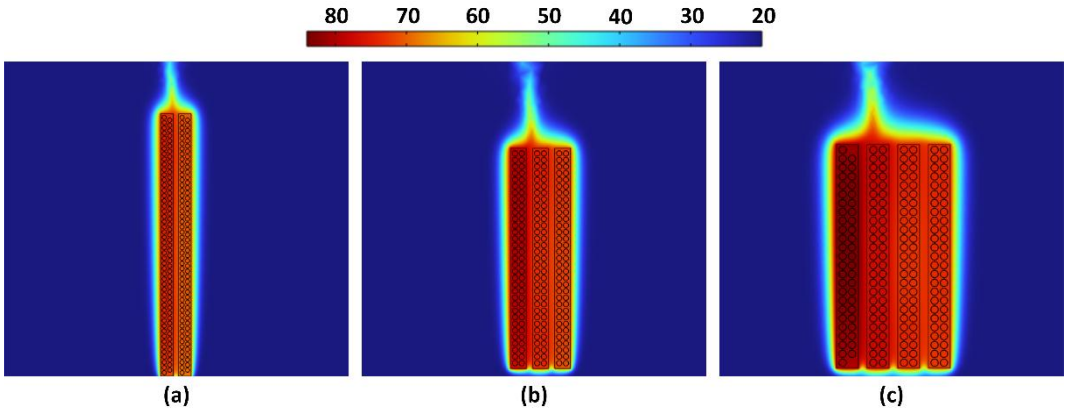
Tablo 4.4'te geometrik özellikleri paylaşılan HÇR'lere ait 2 boyutlu simülasyon görüntüleri Şekil 4.13'te sunulmuştur.

Öncelikle, farklı katman sayılarına bağlı olarak oluşan sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Yapılan ısıl analizler sonucunda, katman sayısındaki artış ile

HÇR'nin nominal çalışma koşullarında ulaştığı maksimum sıcaklık arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Katman sayılarına göre sıcaklık dağılımı görselleri Şekil 4.14'te paylaşılmıştır.

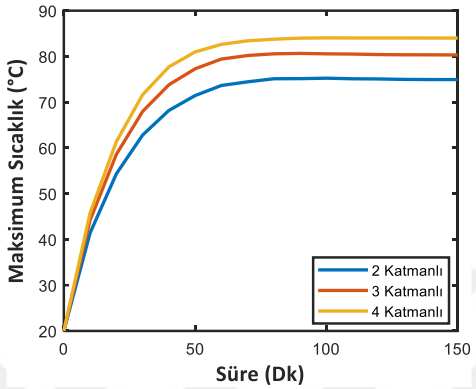



**Şekil 4.13** Farklı Katman Sayısına Sahip Hava Çekirdekli Reaktör Tasarımlarının 2B Geometrik Gösterimleri (a) 2 Katmanlı (b) 3 Katmanlı (c) 4 Katmanlı



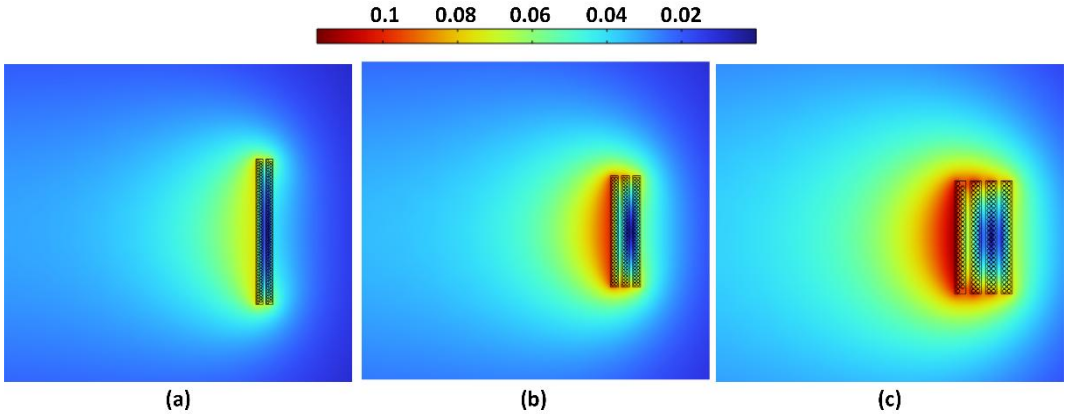

**Şekil 4.14** Katman Sayılarına Göre Sıcaklık Dağılımları (a) 2 Katman (b) 3 Katman (c) 4 Katman

Buna göre, 257,7 A nominal akım altında, iki katmanlı HÇR 74,6 °C maksimum sıcaklığa ulaşırken, üç ve dört katmanlı yapıların sırasıyla 80,31 °C ve 84,01 °C'ye kadar ısındığı gözlemlenmiştir. 2 katmanlı ve 4 katmanlı tasarımlar arasında yaklaşık olarak 10 °C sıcaklık farkına sahip olduğu görülmektedir. Katman sayısına bağlı olarak HÇR'lerin çalışma sıcaklıklarının kararlı duruma erişene kadar zamana bağlı değişimi Şekil 4.15'te sunulmuştur.



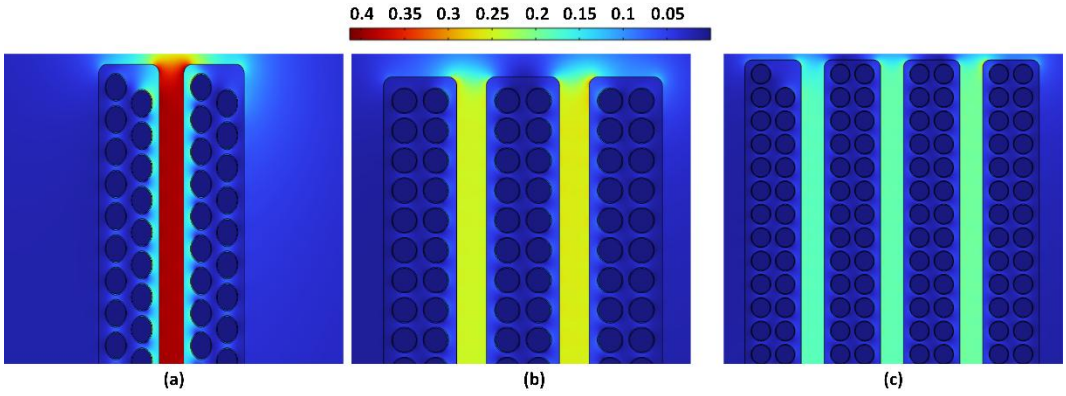

**Şekil 4.15** Katman Sayılarına Göre Maksimum Sıcaklık Değişimi

Diğer yandan, aynı yapıların nominal çalışma koşullarında oluşturduğu maksimum manyetik akı yoğunluğu değerlendirildiğinde, katman sayısındaki artışla birlikte bu değerin de yükseldiği gözlemlenmiştir. İlgili tasarımlara ait manyetik akı yoğunluğu dağılımları Şekil 4.16'da sunulmaktadır.



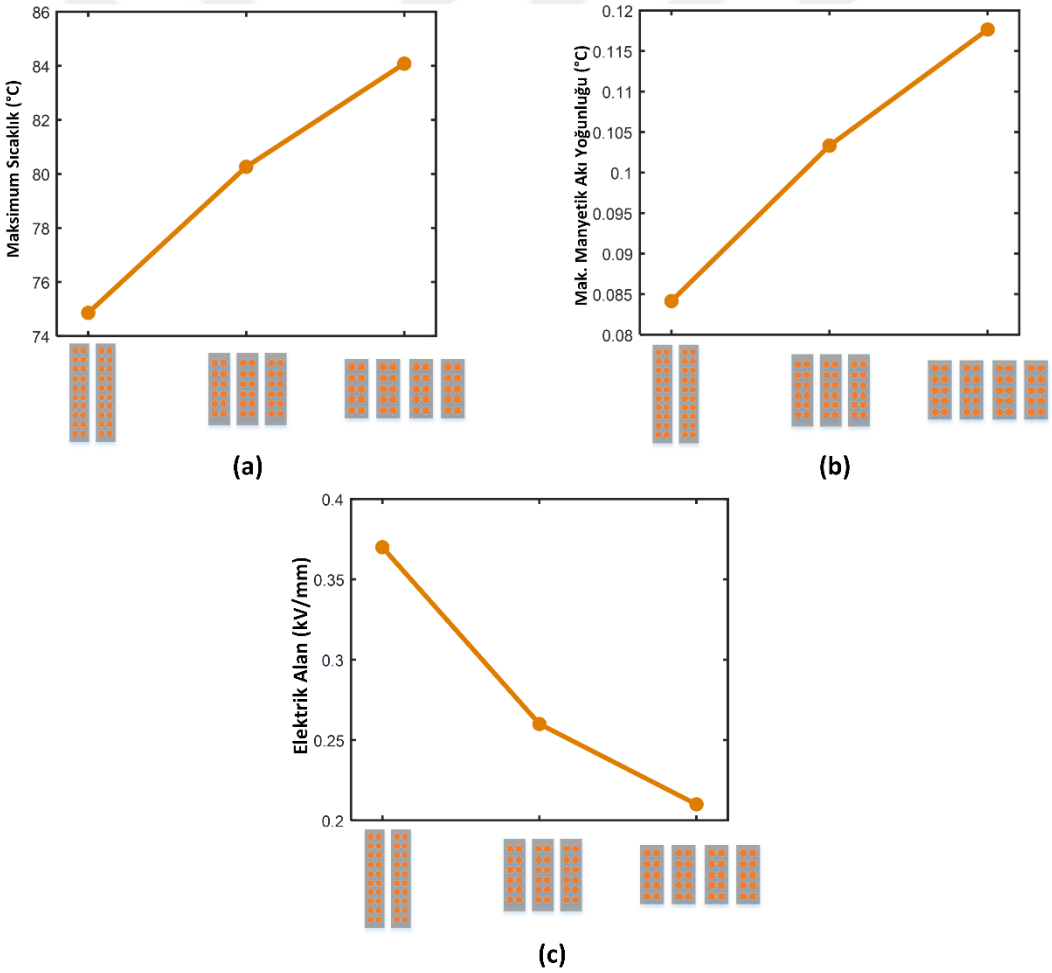

**Şekil 4.16** Katman Sayılarına Göre Manyetik Akı Yoğunluğu Dağılımları (a) 2 Katmanlı (b) 3 Katmanlı (c) 4 Katmanlı

Yapılan analizlere göre, iki katmanlı HÇR 0,086 T, üç katmanlı yapı 0,1033 T, dört katmanlı yapı ise 0,1176 T seviyesinde maksimum manyetik akı yoğunluğuna ulaşmıştır.




**Şekil 4.17** Katman Sayılarına Göre Elektrik Alan Dağılımları (a) 2 Katmanlı (b) 3 Katmanlı (c) 4 Katmanlı

Katman sayısının elektrik alan dağılımına etkisi incelendiğinde, katman sayısı arttıkça maksimum elektrik alan değerinin azaldığı tespit edilmiştir.



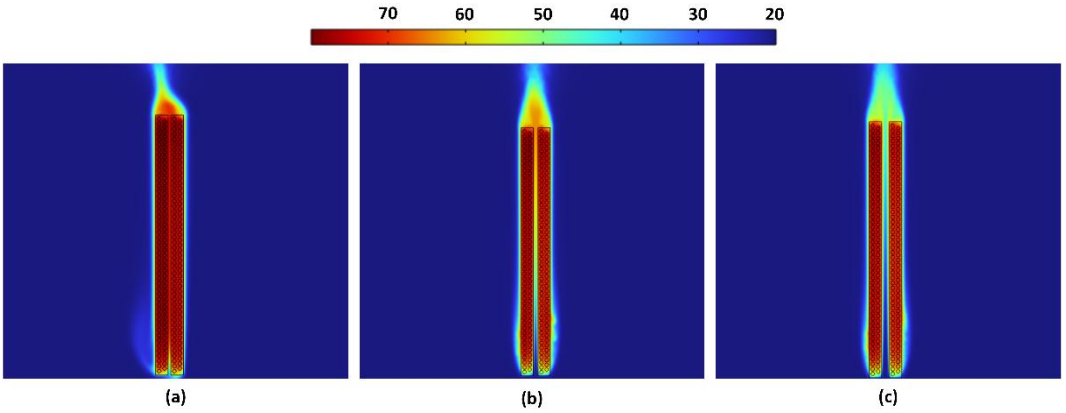

**Şekil 4.18** Farklı Katman Sayılarının HÇR Performansına Etkisi (a) Maksimum Sıcaklık (b) Maksimum Manyetik Akı (c) Maksimum Elektrik Alan Değişimi

Maksimum elektrik alan değerleri 2, 3 ve 4 katmanlı yapılar için sırasıyla; 0,37 kV/mm 0,26 kV/mm ve 0,21 kV/mm olarak elde edilmiştir. İki katmanlı yapıdaki (Şekil 4.17 (a)) elektrik alanın, özellikle katmanlar arasındaki bölgede yoğunlaştığı ve yüksek tepe değerlerine ulaştığı görülmektedir. Katman sayısı üçe (Şekil 4.17 (b)) ve dörde (Şekil 4.17 (c)) çıkarıldığında, elektriksel potansiyelin her bir katmana daha homojen şekilde dağıldığı ve maksimum elektrik alan şiddetinin belirgin şekilde azaldığı gözlenmiştir.

Katman sayısının HÇR performansına etkisinin özetlendiği Şekil 4.18 incelendiğinde, katman sayısındaki artışın hem sıcaklık artışı hem de manyetik akı yoğunluğu üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu görülmektedir. Meydana gelen elektrik alan büyüklükleri katman sayısı ile azalsa da, yalıtım malzemesini zorlayacak seviyelere ulaşmamaktadır. Buradan hareketle, elde edilen sonuçlar, özellikle termal ve elektromanyetik performans açısından 2 katmanlı HÇR yapısını ön plana çıkarmaktadır.

#### 4.3.1.3 HÇR Hava Kanalı Mesafesinin Belirlenmesi

Hava çekirdekli reaktörün (HÇR) soğutma performansını etkileyen önemli parametrelerden biri de iletken sargılar arasındaki hava boşluklarıdır. Bu boşluklar, doğal konveksiyonla ısı transferine katkı sağlayarak maksimum sıcaklık değerlerini doğrudan etkiler. Bu kapsamda, hava boşluğu (air duct) mesafesi sırasıyla 5 mm, 10 mm ve 15 mm olarak belirlenmiş ve her yapı, 257,7 A nominal akım altında ısıl ve elektriksel olarak analiz edilmiştir. Şekil 4.19'da hava kanalı boyutunun sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

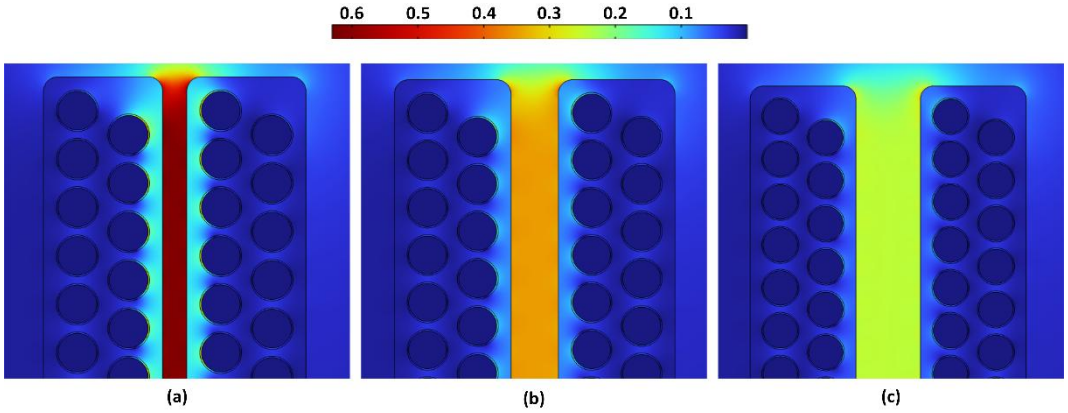



**Şekil 4.19** Hava Kanalı Mesafelerine Göre Sıcaklık Dağılımları (a) 0,5 cm (b) 1 cm (c) 1,5 cm

5 mm hava boşluğu, kompakt bir yapı sunsa da yetersiz hava sirkülasyonu nedeniyle ısının etkin şekilde uzaklaştırılamamasına yol açmış ve maksimum sıcaklık yaklaşık olarak 77 °C'ye kadar yükselmiştir. Öte yandan, 15 mm hava boşluğu, 73,5 °C ile daha düşük sıcaklığı sağlamasına rağmen, fiziksel hacmi artırarak gereksiz malzeme kullanımı ve yapısal büyüklük getirmektedir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, 10 mm hava boşluğu 74,6 °C ile hem yeterli termal performans hem de kompakt tasarım gereksinimlerini karşılayan dengeli bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır.

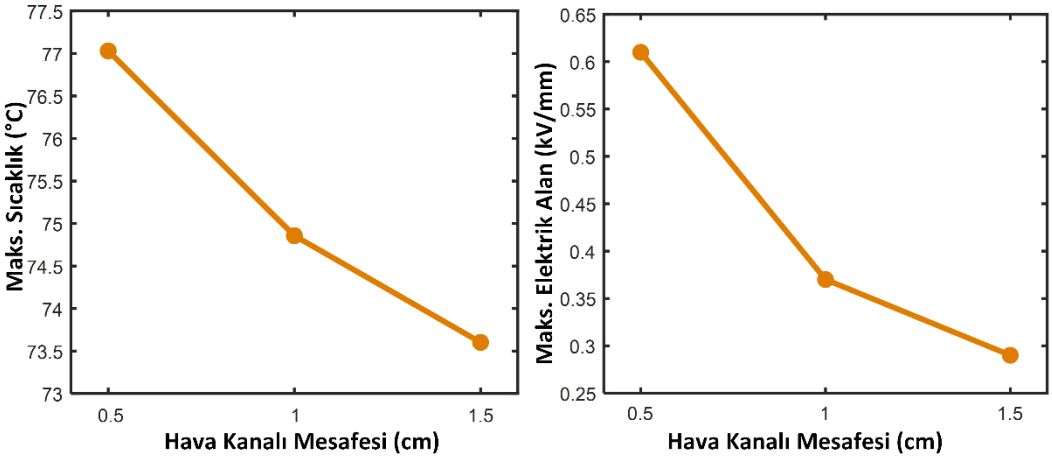
Manyetik alan analizleri neticesinde, maksimum manyetik akı yoğunluğu olan 0,086 T değeri korunmuş olup, kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.

Şekil 4.20'de hava kanalı boyutunun elektrik alan dağılımına etkisi gösterilmektedir. Sargı katmanları birbirine yaklaştığında elektrik alan yoğunluğu artış göstermektedir. 0,5 cm hava kanalında ekipman üzerinde görülen maksimum elektrik alan 0,61 kV/mm değerine erişirken, 1 cm ve 1,5 cm hava kanallarına sahip yapılar için bu değerler sırasıyla, 0,37 kV/mm ve 0,29 kV/mm olmuştur.




**Şekil 4.20** Hava Kanalı Boşluklarına Göre Elektrik Alan Dağılımları (a) 0,5 cm (b) 1 cm (c) 1,5 cm

Şekil 4.21'de hava kanalı mesafesinin HÇR performansına etkisi özetlenmiş olup, oluşan manyetik akı yoğunluğunda bir değişim meydana gelmediği için grafiklerde yer verilmemiştir.



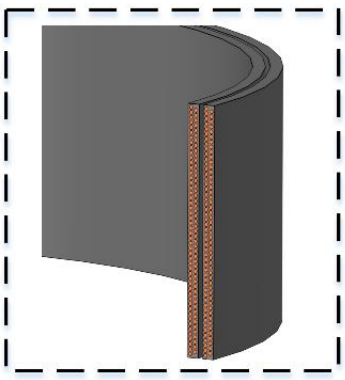

**Şekil 4.21** Farklı Hava Kanalı Mesafelerinin HÇR Performansına Etkisi (a) Maksimum Sıcaklık (b) Maksimum Elektrik Alan

Farklı iletken kesitleri, katman sayıları ve hava kanalı mesafeleri ile gerçekleştirilen analizler neticesinde, 2 katmanlı, 1 cm hava kanalına sahip ve iletkenleri 4 mm yarıçapında olan HÇR yapısının SPRAAS topolojisine entegre edilmesine karar verilmiştir. Arıza akımı sınırlama senaryolarında kullanılacak olan HÇR'ye ait tüm parametreler Tablo 4.5'te sunulmuştur.

**Tablo 4.5** Optimal HÇR Parametreleri

| Sarım Sayısı | Dış Yarıçap | İç Yarıçap | Yükseklik | Hava Boşluğu | İletken Yarıçapı |
|---|---|---|---|---|---|
| 198 | 100 cm | 94,08 cm | 50 cm | 10 mm | 4 mm |

Bu parametreler ile oluşturulan HÇR'ye ait SEY tabanlı simülasyon tarafından oluşturulan döner geometri Şekil 4.22'de sunulmuştur



**Şekil 4.22** HÇR Döner Geometrisi

Oluşturulan simülasyon modeli ile, HÇR'nin SPRAAS içerisinde normal çalışma koşullarında ve güç sistemi arızası senaryoları altında termal, elektrostatik ve elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir.

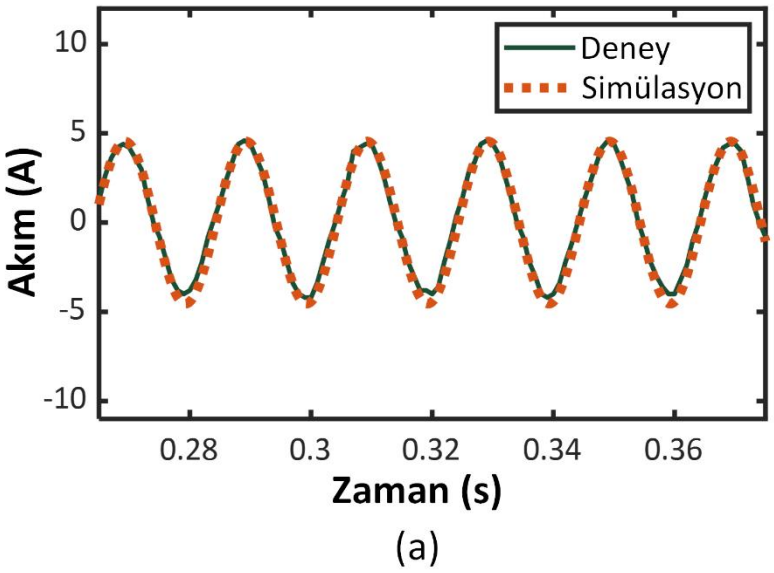
## 4.4 Alçak Gerilim Prototipi ile SEY Modeli Doğrulaması

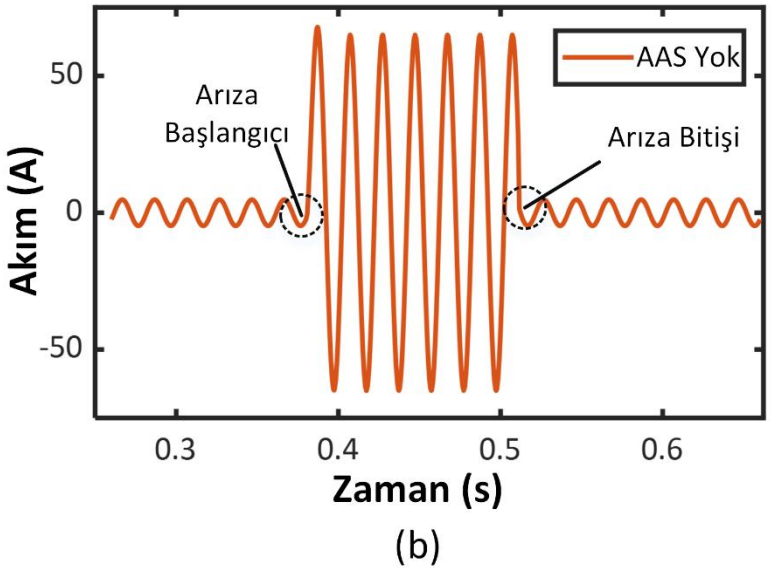
Bu bölümde, SPRAAS'nin yer aldığı normal işletim ve arıza senaryolarına ait akım sonuçları, hem simülasyon hem de deneysel yöntemlerle elde edilmiştir. Bu sayede, simülasyonlardaki SEY tabanlı model ile elektrik devresi bağlantısının doğrulaması yapılmıştır. SPRAAS'nin bulunmadığı arıza koşullarında prototipi besleyen güç sistemine ait sigortalar açma yaptığı için sonuçlar yalnızca simülasyonla elde edilebilmiştir. Bölüm 4.2'de anlatılan SPRAAS devre yapısı simülasyon ortamında oluşturulmuş ve devre yapısındaki endüktans, hava çekirdekli reaktör olarak modellenmiştir. Ardından, Şekil 4.3'te gösterilen iki baralı test sistemi, Tablo 4.3'te verilen parametreler temel alınarak hem deneysel ortamda hem de simülasyon ortamında oluşturulmuştur.

Simülasyon çalışması sırasında, Şekil 4.3 (a)'da gösterilen noktada meydana gelen faz-toprak arızası için, hava çekirdekli reaktörün SPRAAS topolojisinin bir bileşeni olarak çalışması incelenmiş ve arıza akımlarında meydana gelen değişiklik, aynı lokasyon ve süreye sahip arıza meydana getirilen, alçak gerilim prototipi ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen tüm simülasyonlarda Bölüm 4.3'te tasarımı yapılan HÇR yapısı kullanılmıştır.

### 4.4.1 Sonuçlar

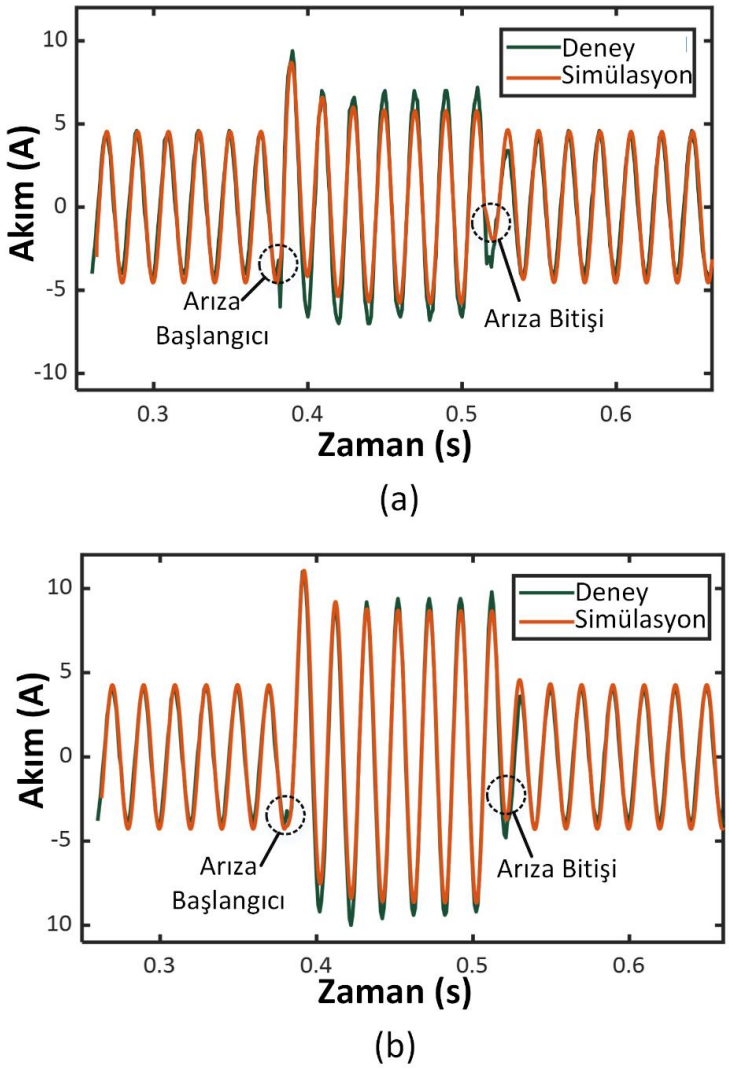
Alçak gerilim prototipinin normal çalışma ve faz-toprak arızası durumundaki akım değerleri Şekil 4.23'te sunulmuştur.




**Şekil 4.23** AAS Olmayan Durumda Alçak Gerilim Prototipi Akım Değerleri (a) Normal Durum (b) Arıza Durumu

Arıza tetiklendiğinde, arıza akımı subtransient periyottaki ilk tepe noktasında 67,86 A seviyesine ulaşmaktadır. Bu duruma karşılık olarak, sistemdeki arıza akım seviyesini sınırlamak amacıyla SPRAAS devreye alınmıştır. Şekil 4.24'te SPAAS'nin çalıştığı durumda hat ve $L_{sp}$ (HÇR) üzerinden geçen akımlara ait deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırması sunulmaktadır




**Şekil 4.24** Faz-Toprak Arızası Sırasında Akım Değişimleri (a) Hat akımı (b) $L_{sp}$ / HÇR Akımı

Simülasyon ve deneysel çalışmaya ait sonuçlar karşılaştırmalı şekilde Tablo 4.6'da özetlenmiştir. Simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldığında, hat akımının nominal değerine ait bağıl hata oranı %1,3 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, $L_{sp}$ elemanı (HÇR), simülasyonda hat akımının %91,30'unu, deneysel çalışmada ise %95,15'ini taşıdığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, sistemdeki seri rezonans koşulunun başarıyla sağlandığını ortaya koymaktadır.

SPRAAS'nin performansı incelendiğinde, ekipmanın arıza akımını sınırlama oranı alçak gerilimli prototipte %86,14; simülasyon çalışmasında ise %87,32 olarak belirlenmiştir. Bu noktada, $L_{sp}$ (HÇR) üzerinden geçen akımın simülasyonla elde edilen değeri ile deneydeki değer arasındaki bağıl hata %2,1 olarak belirlenmiştir.

Bu veriler dikkate alındığında, yapılan simülasyon çalışmasının tutarlı sonuçlar verdiği söylenebilmektedir. Bu durum, hava çekirdekli reaktör üzerinde gerçekleştirilecek ısıl ve elektriksel analizlerin doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir. Deneysel olarak elde edilen veriler ile simülasyon sonuçlarının uyumlu olması, modelin fiziksel gerçekliği temsil ettiğini ve farklı çalışma koşulları altında da güvenilir sonuçlar üretebileceğini göstermektedir. Ancak, her senaryo için fiziksel prototip üretmek zaman ve maliyet açısından sürdürülebilir değildir. Bu nedenle, deneysel verilerle doğruluğu ispatlanmış bir simülasyon modeli aracılığıyla çok sayıda farklı senaryo bilgisayar ortamında analiz edilebilmektedir. Bu sayede, tasarım süreci hızlanmakta olup optimum çalışma koşullarının belirlenmesine yönelik analizler ekonomi ve süre anlamında daha verimli hale gelmektedir.

**Tablo 4.6** Alçak Gerilim Uygulamasına Ait Akım Sonuçları

| Akım Değerleri (A) (Tepe) | Deney | Simülasyon |
|---|---|---|
| Nominal Akım - Hat | 4,60 | 4,54 |
| Nominal Akım - $L_{sp}$ | 4,20 | 4,32 |
| Arıza Akımı İlk Tepe Noktası - Hat | 9,40 | 8,60 |
| Arıza Akımı İlk Tepe Noktası - $L_{sp}$ | 11,00 | 11,24 |

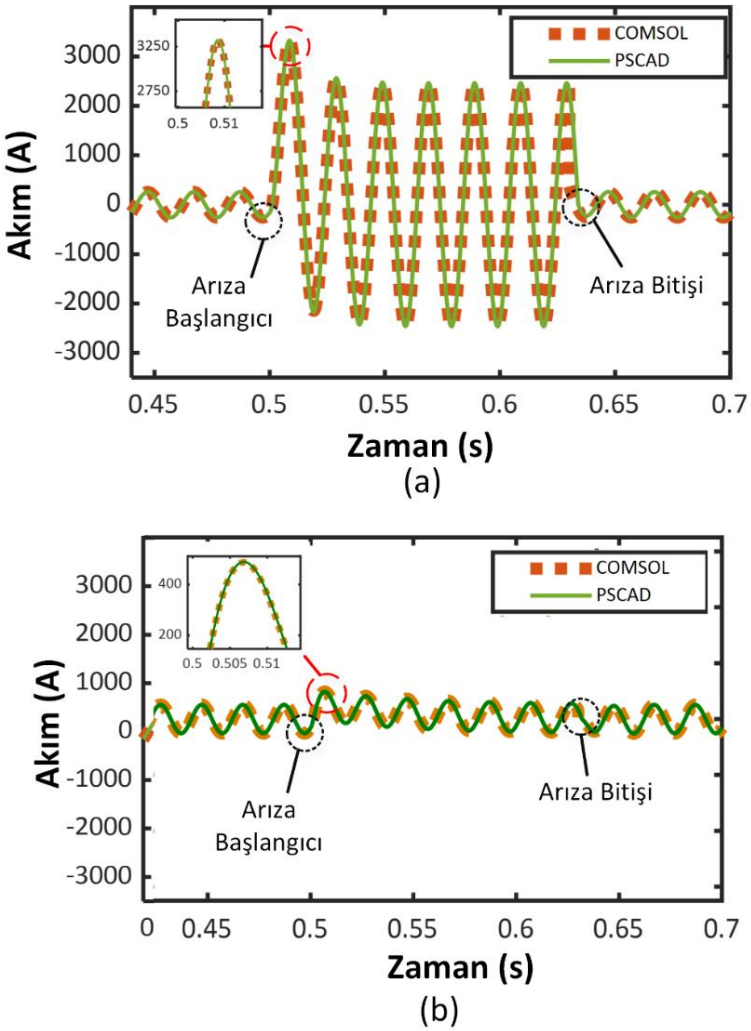
## 4.5 Yüksek Gerilim Simülasyon Uygulaması

Bu bölümde, modellenen hava çekirdekli reaktör, Tablo 4.3'te belirtilen yüksek gerilim test sistemine entegre edilmiş olup normal çalışma koşullarında ve faz-toprak arızası senaryosunda performansı değerlendirilmiştir. İlk olarak, SPRAAS bulunan ve bulunmayan test sistemi için elde edilen akım sonuçları karşılaştırılarak arıza akımı sınırlama kapasitesi ortaya konmuştur. Daha sonra, normal ve arıza durumları için elektrik ve manyetik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise, hava çekirdekli reaktörün uzun süreli çalışma koşulları ve arıza anındaki ısıl performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca, aynı test sistemi PSCAD ortamında da modellenmiş ve elde edilen akım sonuçları karşılaştırmalı olarak sunularak, SEY modeli ile elektrik devresi eşleştirmesini içeren simülasyonların doğruluğu ortaya konmuştur.

### 4.5.1 Arıza Akımı Sınırlama Performansı

Simülasyon sırasında t=0.5 s anında faz-toprak arızası başlatılmış ve bu arıza 130 ms süresince devam ettirilmiştir. Şekil 4.25 (a)'da, SPRAAS'nin mevcut olmadığı

durumda gerçekleştirilen arıza için test sistemine ait akım-zaman grafiği sunulmuştur.

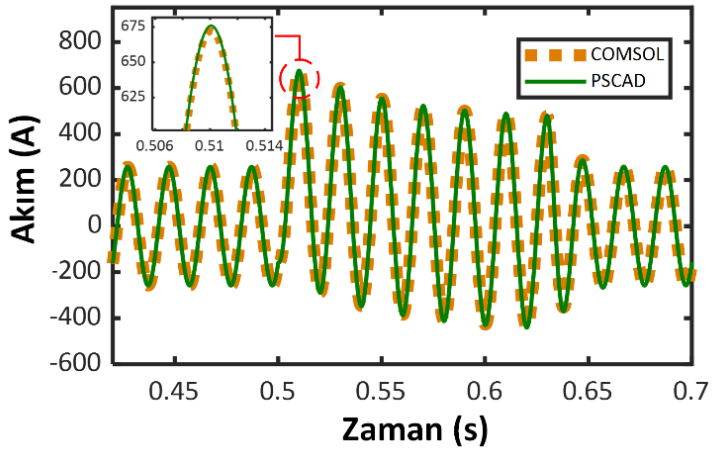



**Şekil 4.25** Yüksek Gerilim Test Sistemine Ait Hat Akımı (a) SPRAAS Yok (b) SPRAAS Var

Buna göre, arıza akımı subtransient evresinde SEY simülasyonu ortamında 3318 A, PSCAD ortamında ise 3326 A seviyesine ulaşmıştır. SPRAAS test sistemine entegre edildikten sonraki akım değişimi ise Şekil 4.25 (b)'de gösterilmiştir. Bu durumda, arıza akımının ilk tepe değeri SEY tabanlı simülasyonda 487 A, PSCAD simülasyonunda ise 489 A'ya düşürülmüştür. Bu değerler sırasıyla %85,32 ve %85,29 oranlarında sınırlamanın sağlandığı anlamına gelmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, simülasyon ortamında gerçekleştirilen SEY-elektrik devresi eşleştirmesinin tutarlı çalıştığını göstermektedir.

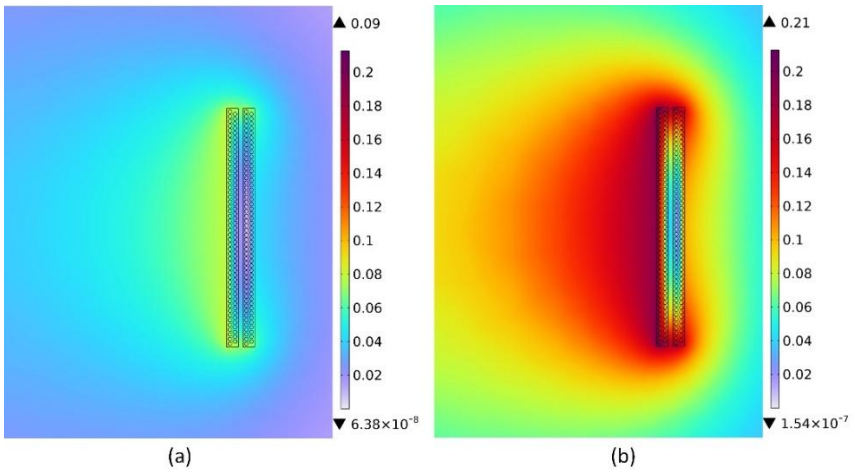
### 4.5.2 Manyetik Alan ve Elektrik Alan Analizleri

Test sisteminin normal işletme koşullarında, hava çekirdekli reaktörün SEY tabanlı simülasyon ortamında 257,70 A, PSCAD ortamında ise 258,20 A akım taşıdığı belirlenmiştir. Bu değerler, toplam hat akımının yaklaşık %99'una karşılık gelmekte olup, seri rezonansın etkin bir şekilde sağlandığını göstermektedir. Diğer yandan, faz-toprak arızası durumunda reaktör üzerinden geçen maksimum akım SEY tabanlı simülasyonda 672,14 A, PSCAD'de ise 675,96 A olarak elde edilmiştir. Şekil 4.26, hava çekirdekli reaktör üzerinden geçen akımın zamanla değişimini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



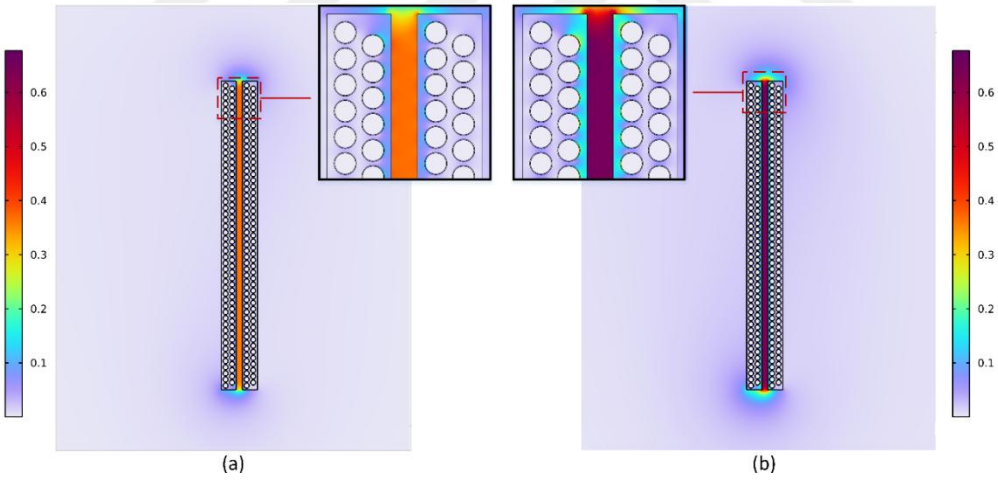

**Şekil 4.26** Yüksek Gerilim Uygulamasında HÇR'ye Ait Akım Değişimi

HÇR üzerindeki akım değişimi, manyetik akı yoğunluğunun dağılımında önemli bir etkiye sahiptir. Buna bağlı olarak, normal işletme koşullarında maksimum manyetik akı yoğunluğu 0,086 T'ye ulaşmaktadır. Diğer yandan, arızanın ilk tepe anında bu değer %146,5 oranında artarak 0,212 T'ye yükselmektedir. HÇR ekipmanına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 4.27'de sunulmuştur. Normal işletme sırasında, hava çekirdekli reaktöre etki eden manyetik kuvvetler iç ve dış sargılar için sırasıyla 55,43 N ve 60,82 N olarak hesaplanmıştır. Ancak, arıza akımının ilk tepe anında bu kuvvetler sırasıyla 351,85 N ve 385,91 N'ye yükseldiği görülmüştür.




**Şekil 4.27** HÇR'nin Manyetik Akı Yoğunluğu Dağılımı (a) normal çalışma sırasında (b) faz-toprak arızası sırasında

Hava çekirdekli reaktörün normal çalışma ve şebeke arızası durumları için elektrik alan dağılımı Şekil 4.28'te sunulmuştur. Normal işletme modunda HÇR'nin elektrik alan şiddeti maksimum 0,37 kV/mm'ye ulaşırken, faz-toprak arızası durumunda bu değer artarak maksimum 0,66 kV/mm'ye yükselmiştir.

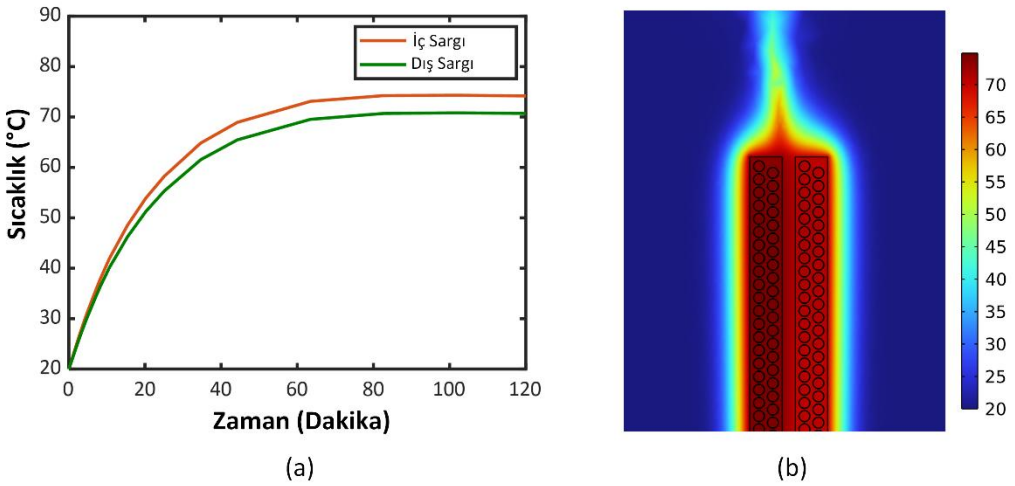



**Şekil 4.28** HÇR Elektrik Alan Dağılımı (a) Normal Çalışma (b) Şebeke Arızası

### 4.5.3 Isıl Analizler

Kullanılan SPRAAS'nin yapısı gereği, test sisteminin standart çalışma koşullarında sürekli olarak devrede olan hava çekirdekli reaktörün ısıl kararlılığı, kesintisiz işletim için kritik öneme sahiptir. Bu kararlılığın, güç sisteminde meydana gelebilecek arıza durumlarında dahi korunması gereklidir. Bu bağlamda, analizlerin ilk aşamasında HÇR'nin uzun süreli işletimi, sistemin normal çalışma koşulları altında incelenmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımı, faz-toprak arızası senaryosu için

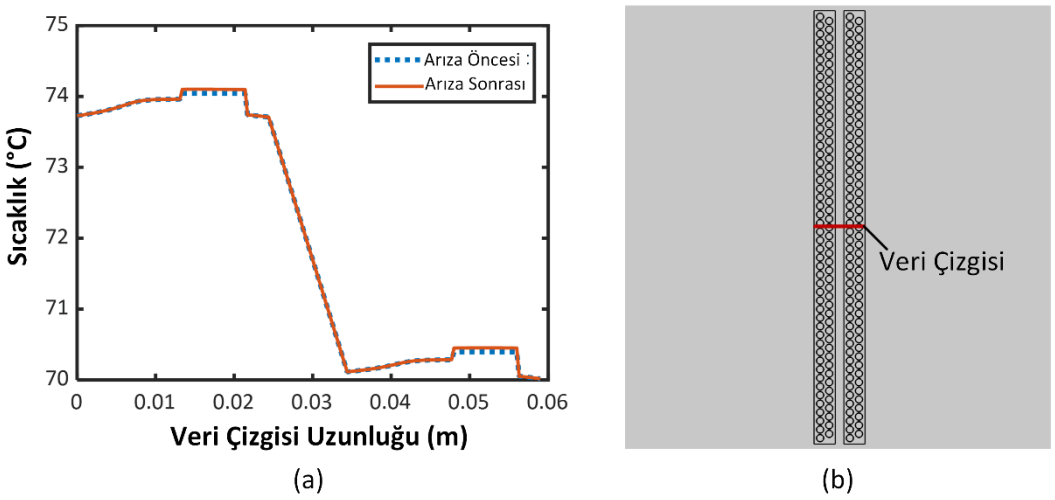
gerçekleştirilen analizlerde başlangıç koşulu olarak alınmıştır. Böylece, arıza olayı sonunda oluşan nihai sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.




**Şekil 4.29** Normal Çalışma Koşullarında HÇR'nin Termal Analizi (a) Zamana Bağlı Sıcaklık Değişimi (b) Kararlı Hal için Sıcaklık Dağılımı

Bölüm 4.1.2.2'de tanıtılan ısı transfer mekanizmaları HÇR'ye uygulanmıştır. İlk aşamada, HÇR'nin normal işletim koşullarındaki ısıl performansı değerlendirilmiştir. Şekil 4.29 (a)'da, HÇR üzerinden 257.7 A'lik nominal akım geçtiğinde sıcaklık değişimi gösterilmektedir. Bu akım seviyesinde, HÇR'nin iç sargısı 74,6 °C sıcaklığa ulaşırken, dış sargı 70,5 °C sıcaklığa erişmektedir. Şekil 4.29 (b)'de ise kararlı durum (steady-state) koşullarında elde edilen sıcaklık dağılımı paylaşılmaktadır.

Nominal akım altında ulaşılan sıcaklık değerleri, faz-toprak arıza senaryosu analizinde başlangıç koşulu olarak kullanılmıştır. 130 ms süren faz-toprak arızasının ardından, termal kararlılık korunmuş ve sıcaklıkta kayda değer bir artış gözlenmemiştir. Şekil 4.30 (a)'da sıcaklık değişimine ait grafik, Şekil 4.30 (b)'de gösterilen hayali bir veri hattından elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, faz-toprak arızası süresince HÇR'nin ısıl kararlılığını koruduğunu ortaya koymuştur.




**Şekil 4.30** Normal Çalışma ve Şebeke Arızası Durumu İçin HÇR Merkezinin Sıcaklık Değerleri (a) Karşılaştırma Grafiği (b) Veri Çizgisi

## 4.6 Değerlendirme

Bu bölümde, SPRAAS topolojisinde yer alan hava çekirdekli reaktörün, ısıl ve elektriksel performansı incelenmiştir. İlk olarak, yüksek gerilim test sistemin nominal çalışma koşullarında HÇR'nin göstereceği ısıl ve manyetik davranışların belirlenmesi amacıyla yürütülen ön çalışmada, iletken kesiti, katman sayısı ve hava kanalı genişliği gibi tasarımsal değişkenler, 257,7 A'lik nominal akım altında test edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, öncelikle, bu parametrelerin maksimum sıcaklık ve manyetik akı yoğunluğu üzerindeki etkileri değerlendirilmiş olup, bu doğrultuda termal güvenlik, elektromanyetik etkinlik ve malzeme verimliliği açısından optimum bir HÇR yapısı belirlenmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda, oluşturulan yapılar arasından, optimum HÇR tasarımı olarak 2 katmanlı, 4 mm yarıçapında iletken kesitine sahip ve katmanlar arasında 10 mm hava kanalı açıklığı bulunan yapı belirlenmiştir.

Elde edilen HÇR yapısı SPRAAS içerisine entegre edilerek, 2 baralı bir test sisteminde normal ve arıza durumlarındaki performansı incelenmiştir. Bu kapsamda elde edilen temel çıktılar aşağıda özetlenmiştir:

- Doğrulama aşamasında, geliştirilen sonlu eleman modeli tutarlı bir performans sergilemiştir. Nominal hat akımı için simülasyon ile deneysel sonuçlar arasındaki bağıl hata %1,3; hava çekirdekli reaktör üzerindeki maksimum arıza akımı için ise %2,1 olarak hesaplanmıştır.

- Yüksek gerilim simülasyonunda, SEY tabanlı simülasyonda elde edilen akım sonuçları PSCAD yazılımından elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. SPRAAS bulunmayan senaryoda, maksimum arıza akımı SEY tabanlı simülasyon ortamında 3318 A, PSCAD ortamında ise 3326 A olarak belirlenmiştir. SPRAAS devreye alındığında bu değerler sırasıyla 487 A ve 489 A'ya kadar düşmüştür. Arıza anında hava çekirdekli reaktörün üzerinden geçen arıza akımının maksimum değeri simülasyonlarda 672,14 A, PSCAD'de ise 675,96 A olarak elde edilmiştir
- Normal işletme koşullarında, hava çekirdekli reaktörün maksimum manyetik akı yoğunluğu 0,086 T olarak belirlenmiştir. Arızanın subtransient evresinde, bu değer %146,5 artarak 0,212 T'ye ulaşmaktadır. Ayrıca, iç ve dış sargılar üzerinde etkiyen kuvvetler sırasıyla 55,43 N ve 60,82 N'den, arıza anında 351,85 N ve 385,91 N değerlerine yükselmiştir. Arıza koşullarında sargılar üzerindeki mekanik kuvvetlerin artışının göz önünde bulundurulması, yapısal bütünlüğün korunması ve güvenilirliğin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bulgular, dayanıklı tasarım stratejileri için yüksek önem arz etmektedir.
- Elektrostatik analizler, sistemin nominal çalışma koşullarında oluşturduğu maksimum elektrik alan şiddetinin 0,37 kV/mm olduğunu, bu değerin arıza anında 0,66 kV/mm'ye yükseldiğini ortaya koymuştur. Oluşan elektrik alan şiddetleri, önceki bölümde de belirtildiği üzere, sargı yalıtımını zorlayacak seviyelere ulaşmamaktadır.
- Isıl analizler kapsamında, iç ve dış sargıların maksimum çalışma sıcaklıkları sırasıyla 74 °C ve 70,5 °C olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, faz-toprak arızası sonrası sargılarda ihmal edilebilir düzeyde sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Hava çekirdekli reaktörün farklı çalışma koşullarında termal kararlılığını koruyabilmesi, ekipmanın güvenilirliği açısından son derece önemlidir.

Elde edilen sonuçlar, hava çekirdekli reaktör (HÇR) içeren SPRAAS topolojisinin, arıza akımlarını sınırlandırma konusunda oldukça etkili olduğunu açıkça ortaya koymuştur. SEY temelli analizler, HÇR'nin nominal ve arıza koşullarında gösterdiği termal, manyetik ve mekanik davranışların sistem güvenliği açısından incelenmiştir. Çalışma süresince reaktör üzerinde oluşabilecek sıcaklıklar, elektrik

alan ve manyetik alan değerleri kapsamlı biçimde değerlendirilmiş ve bu değerlerin yönetilebilir düzeyde olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte, arıza akımının ilk tepe anında HÇR sargılarına etki eden elektromanyetik kuvvetlerin yaklaşık 6 kat arttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, arıza akımı sınırlayıcı yapılarında kullanılacak olan HÇR ekipmanlarının bu kuvvet değişimlerine dayanım gösterebilecek şekilde sargı destek yapılarına ve sargı muhafazalarına sahip olması önem arz etmektedir.

Diğer yandan, elde edilen sonuçlar hava çekirdekli reaktörlerin gelecekte modern güç sistemlerindeki rolü açısından da önemli çıkarımlar sunmaktadır. HÇR'ler uzun süredir, basit yapıları ve doyma problemleri yaşamamaları nedeniyle arıza akımı sınırlandırma uygulamalarında tercih edilmektedir. Ancak, geleneksel yöntemlerde gerilimi düşümü ve güç kaybı gibi problemleriyle sınırlı kullanım alanına sahip olmuşlardır. Bu çalışma ise HÇR'nin, modern bir yarı iletkenli arıza akımı sınırlayıcı (SPRAAS) yapısı içerisine entegre edilerek, çok-fizikli doğrulamalar eşliğinde kullanım potansiyelini göstermiştir.

# 5
# SONUÇ

Modern güç sistemlerinde artmakta olan kısa devre akımları, sistem güvenliği, sürekliliği ve ekonomisi açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu bağlamda, arıza akım sınırlayıcı topolojileri, söz konusu akımların sınırlandırılmasına yönelik etkili bir çözüm alternatifi olarak öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, AAS'lerin güç sistemi seviyesindeki optimal yerleşim ve boyutlandırmasına yönelik bir optimizasyon yaklaşımı sunulmuştur. Ayrıca, etkinliği kanıtlanmış bir bir katı-hal AAS (SPRAAS) topolojisi bünyesinde yer alan endüktif bileşen, hava çekirdekli reaktör olarak simülasyon ortamında modellenmiş ve SEY temelindeki çok fizikli simülasyonlara dayanan kapsamlı bir performans analizi gerçekleştirilmiştir.

Güç sistemi düzeyinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasının ilk aşamasında, arıza akımlarının devre kesici kapasitelerinin altına; AAS sayı, lokasyon ve empedansını optimize ederek minimum maliyetle indirilebilmesini sağlayan çatı bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen çatı algoritma kapsamında, AAS yerleşim noktaları yalnızca hat başlarıyla sınırlandırılmamış; aynı zamanda kaynak uçlarına yerleştirilmelerini de mümkün kılan kapsamlı bir formülasyon oluşturulmuştur. Böylece, optimizasyon sürecine lokasyon esnekliği kazandırılmış ve arama uzayının çeşitliliği artırılmıştır. Söz konusu algoritmaya entegre edilen hassasiyet analizi sayesinde, AAS yerleşimi için potansiyel lokasyonlara ait arama uzayı daraltılarak optimizasyonun hesaplama verimliliği artırılmıştır. IEEE 30 Baralı test sistemi üzerinde gerçekleştirilen ön çalışmada, önerilen yaklaşımın, aynı test sistemi üzerinde AAS optimizasyonu yapılan literatür çalışmalarına kıyasla arıza akımı seviyelerini hedeflenen düzeye daha düşük maliyetle ve etkin biçimde indirdiği ortaya konmuştur. Farklı maliyet formülasyonları dikkate alındığında, önerilen çatı algoritmanın toplam yatırım maliyeti, referans çalışmalara kıyasla %4,7 ile %25,35 arasında daha düşük gerçekleşmiştir. Önerilen çatı algoritma, daha geniş ve karmaşık yapıya sahip olan IEEE 118 Baralı test sisteminde de başarıyla

uygulanmış ve tüm baralardaki arıza akımlarının, ilgili devre kesici limitlerinin altına etkin biçimde indirilebildiği gösterilmiştir. Bu durum, geliştirilen yaklaşımın yalnızca belirli bir sistemle sınırlı kalmaksızın farklı güç sistemi topolojilerinde de yüksek düzeyde uygulanabilirlik ve etkinlik sunduğunu ortaya koymuştur.

Günümüzde güç sistemlerine entegre edilen DÜ birimleri, üretim esnekliğini artırmakla birlikte, sistemin kısa devre düzeylerini de önemli ölçüde yükselterek arıza akımları üzerinde doğrudan bir etki oluşturmaktadır. Bu durum, AAS ve DÜ birimlerinin eş zamanlı optimizasyonunun gerekliliğini daha da kritik hale getirmektedir. Bu kapsamda, güç sistemlerinde DÜ'lerin arıza akımlarına etkisini göz önünde bulundurmak amacıyla, DÜ yerleşim ve boyutlandırmasına yönelik ayrı bir çatı algoritma geliştirilmiştir. Uygulama sürecinde, DÜ optimizasyon algoritması hem ardışık hem de eşzamanlı çalışacak şekilde AAS optimizasyonu ile bir araya getirilmiştir. Bu yapılar ile farklı senaryolar kapsamında koordineli DÜ–AAS optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ardışık optimizasyon senaryosunda (Senaryo 1), DÜ ve AAS optimizasyon algoritmaları sırasıyla tek amaçlı olarak ve GA, PSO ile GKO entegrasyonu ile ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Eşzamanlı optimizasyon senaryolarında (Senaryo 2 ve Senaryo 3) ise, DÜ ve AAS optimizasyonunu birlikte kapsayan çatı algoritma, çok amaçlı olarak ÇAGA, ÇAPSO ve ÇAGKO entegrasyonlarıyla yürütülmüştür. Bu yaklaşımlar sayesinde, farklı meta-sezgisel arama algoritmalarının hem ardışık hem de eşzamanlı optimizasyondaki performansları kapsamlı biçimde karşılaştırılmıştır.

DÜ ve AAS optimizasyonunu sıralı şekilde ele alan Senaryo 1 sonuçları incelendiğinde. IEEE 30 Baralı test sisteminde tüm arama algoritmalarının ortak bir sonuç ile Bara 10 ve Bara 12'ye 50 MW'lık DÜ birimi yerleştirdiği görülmektedir. Bu sayede, sistemdeki aktif güç kaybı 17,559 MW değerinden 9,38 MW seviyesine düşürülmüştür. DK kapasitesinin aşıldığı ve arıza akımlarının 50 kA seviyelerine çıktığı yeni topolojide, AAS optimizasyonu sonucunda GKO algoritmasıyla en düşük maliyetli çözüm elde edilmiştir. Aşım gerçekleşen 7 adet baradaki arıza akımları 10 kA sınırının altına indirilmiş ve toplam yatırım maliyeti 2,2185 milyon $ olmuştur. Arama algoritmaların yakınsama performansı incelendiğinde, DÜ optimizasyonunda sonuca en hızlı yakınsayan algoritmanın GKO olduğu görülmüştür. Diğer yandan, AAS optimizasyonunda, GKO algoritması en iyi sonucu sağlasa da GA, ihmal edilebilir bir fark ile toplam AAS maliyeti açısından

en hızlı yakınsama performansını sergilemiştir. Optimizasyon sürecine dahil edilmeyip harici olarak hesaplanan ekonomik çıktılara göre, ardışık optimizasyon sonucu 25 yıl sonunda 90,114 M$ kar beklendiği ve yapılan ilk yatırımın geri ödeme süresinin 16,177 yıl olduğu tespit edilmiştir. Eş zamanlı olarak AAS maliyeti ile aktif güç kayıplarının dikkate alındığı Senaryo 2'de, 30 baralı test sisteminin farklı çalışma topolojileri ortaya konmuştur. ÇAPSO, 9,37 MW – 15,82 MW aralığında güç kayıplarına ve buna karşılık 2,73 M$ –1,45 M$ aralığında AAS maliyetlerine sahip 12 adet domine edilemeyen çözüm sunmuştur. ÇAGKO'nun sunduğu domine edilemeyen çözüm sayısı 10 olup, aktif güç kaybı 9,37 MW – 14,98 MW aralığında değişim göstermiş, AAS maliyet ise 2,73 M$ –1,52 M$ aralığında değerler almıştır. Son olarak, ÇAGA en az domine edilemeyen çözümü sağlayan algoritma olmuştur. Çözümler 9,94 MW – 11,18 MW aralığında aktif güç kayıplarına sahipken, buna karşılık gelen AAS maliyetleri 2,74 M$ –1,69 M$ aralığında değişmiştir. Tüm sistemin AAS maliyeti – aktif güç kaybı denge karakteristiğini yansıtan final DEÇ kümesinin sınır değerlerini ise, ÇAPSO sonuçları olan, 2,37 MW – 15,82 MW aralığındaki güç kayıpları ve buna karşılık 2,73 M$ –1,45 M$ AAS maliyetleri oluşturmaktadır. Final DEÇ kümesi kullanılarak yapılan harici ekonomik analizlerde, 25 yıllık ekonomik ömür sonunda en fazla net karı sağlayan çözüm 89,95 M$ ile minimum güç kaybı noktası (9,37 MW, 2,37 M$) olmuştur. Elde edilen tüm çözüm noktalarında, bara arıza akımları başarı ile güvenli seviyelere indirilmiştir. Ekonomik kar maksimizasyonunu amaç fonksiyonlarına dahil eden Senaryo 3 sonuçları incelendiğinde, çatı algoritma dahilinde çalışan ÇAPSO, ÇAGKO ve ÇAGA sırasıyla 16, 11 ve 17 adet domine edilemeyen çözüm sunmuşlardır. Tüm çözümler içerisinde, 25 yıllık en yüksek karı getirecek çözümü ÇAGKO algoritması sağlamıştır. Bu çözüm, aktif güç kaybını 17,557 MW'dan 11,173 MW değerine indirirken, 4,267 M$ AAS yatırım maliyeti sunmakta olup, 25 yıl sonunda 124,84 M$ net kar sağlamaktadır.

Aynı senaryolar IEEE 118 Baralı test sistemi üzerinde uygulanmıştır. Senaryo 1'in ilk aşaması olan DÜ optimizasyonu sonucunda, 132,863 MW olan aktif güç kaybı değeri, GA ile 98,3 MW'a, PSO ile 100,085 MW'a ve GKO ile 98,824 MW'a düşürülmüştür. En düşük aktif güç kaybını sağlayan GA'nin oluşturduğu topoloji incelendiğinde 4 adet baraya ait arıza akımlarının DK kapasitesi olan 25 kA'i aştığı ve yaklaşık 30-35 kA aralığında değerler aldığı görülmektedir. Gerçekleştirilen

AAS optimizasyonu ile arıza akımları başarı ile 25 kA altına indirilmiştir. Bu süreçte PSO, GKO ve GA arama algoritmaları, çatı algoritma dahilinde çalışarak, sırasıyla, 3,5733 M$, 3,5965 M$ ve 3,5562 M$ AAS maliyeti değerlerine yakınsamışlardır. Görüldüğü üzere, her iki adımda da, en iyi sonuca çatı algoritmaya GA entegre edildiğinde ulaşılmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, yakınsama hızı açısından da en iyi performansı GA'nın gösterdiği görülmektedir. Ardışık optimizasyon sonucunda elde edilen sistem topolojisi üzerinde harici ekonomik analizler yürütüldüğünde geri ödeme süresinin 35,114 yıl olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, 25 yıllık ekonomik ömür süresince güç sistemi 261,379 M$ zarar etmiştir. Elde edilen topoloji, dikkate alınan amaç fonksiyonlarını minimize etse de ekonomik anlamda uygulanabilir değildir. Senaryo 2'de güç kayıplarını ve AAS maliyetlerini dikkate alan eş zamanlı DÜ-AAS optimizasyonun gerçekleştirilmiştir. ÇAPSO, ÇAGA ve ÇAGKO, sırasıyla 11, 9 ve 8 adet domine edilemeyen çözümler sunmuştur. ÇAPSO çözümleri 103,83 MW - 127,81 MW aralığında aktif güç kayıplarına sahipken, buna karşılık, AAS maliyetleri 9,11 M$ - 3,39 M$ aralığında değerler almıştır. ÇAGA'nın çözümlerine ait güç kaybı değereri, 99,45 MW - 114,01 MW aralığında değişim gösterirken, buna karşılık gelen AAS kurulumları 5,72 M$ - 3,09 M$ aralığındaki maliyetler ile gerçekleşmiştir. Son olarak, ÇAGKO'nun çözüm noktaları 102,85 MW - 121,57 MW aralığındaki aktif güç kayıpları ve 6,68 M$ - 3,00 M$ AAS maliyetleri aralıklarında dağılım göstermiştir. Tüm sistemin aktif güç kaybı – AAS maliyeti dengesini yansıtacak final DEÇ kümesinin dağılımı ise 99,45 MW, 5,72 M$ çözüm noktası ile 121,57 MW, $3,00M çözüm noktası arasında olmuştur. Senaryo 1 ile benzer şekilde, Senaryo 2 sonucu elde edilen harici ekonomik çözümlerden hiçbiri karlılık sağlayamamaktadır. En az zarar eden çözüm, -119,25 M$ zarar ile minimum kayıp noktası olmuştur. Senaryo 3 dahilinde, AAS maliyeti ve aktif güç kaybı minimizasyonu amaç fonksiyonlarının yanı sıra, 25 yıllık net kar da dikkate alınmıştır. Sonuçlara göre, ÇAGA 33 adet, ÇAGKO 22 adet ve ÇAPSO 24 adet domine edilemeyen çözüm sunmuştur. Bu senaryoda, tüm arama algoritmaları ile 25 yıl sonunda güç sistemi kara geçmiş olup, en yüksek kar, 454,65 M$ ile ÇAGA tarafından sağlanmıştır.

Test edilen iki güç sistemi incelendiğinde, arama uzayı büyüklüğünün arama algoritmasının performansına ciddi şekilde etki ettiği görülmektedir. 30 baralı test

sisteminde GKO&ÇAGKO ön plana çıkarken, daha karmaşık ve daha büyük bir sistem olan 118 baralı test sisteminde GA&ÇAGA algoritmaları çözüm kalitesi ve yakınsama hızı bakımından daha iyi performans göstermiştir. Elde edilen minimum güç kaybı ve minimum AAS kaybı değerleri her zaman ekonomik anlamda en verimli sonuçlar olarak ortaya çıkmamaktadır. Örneğin, 30 baralı test sisteminde tüm senaryolar altında en düşük aktif güç kaybı 9,38 MW olarak elde edilirken, 25 yıl sonunda en fazla kar sağlayacak olan çözüm noktası 11,173 MW aktif güç kaybına sahiptir. Bu durum, iki nokta arasındaki farkın sağlanabilmesi için gereken DÜ yatırım maliyetlerinin çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, IEEE 118 baralı test sisteminde en düşük aktif güç kaybı 98,3 MW olarak elde edilmiştir. Ancak, bu değer baz alınarak yatırımlar yapıldığı takdirde, sistem mutlak zarar ile karşılaşmaktadır. 118 baralı test sisteminde, 30 baralı sistemden farklı olarak, ekonomik kıstasların dahil edilmediği hiçbir optimizasyon sürecinde kar elde edilememiştir. Nihayetinde 3 DÜ birimi ve 6 AAS biriminden oluşan topoloji ile M454,65$'lık bir kar elde edilmiştir. Optimizasyon sonuçları incelendiğinde, güç sistemlerinin yalnızca teknik performans (örneğin minimum güç kaybı veya minimum arıza akımı) açısından değil, aynı zamanda yatırım maliyeti, işletme giderleri ve uzun vadeli ekonomik getiriler gibi çok boyutlu kriterler ışığında planlanmasının gerekliliği açıkça ortaya çıkmaktadır. Tek bir hedef fonksiyona odaklanıldığında elde edilen optimum teknik değerler, çoğu zaman sistem bütününde ekonomik sürdürülebilirlik ve karlılık ile örtüşmeyebilmektedir. Bu çalışmada önerilen bütüncül optimizasyon yaklaşımı; aktif güç kaybı, AAS yatırım maliyeti ve toplam ekonomik kar gibi birbirini zaman zaman dengeleyen veya çelişen kriterleri aynı anda ele alarak, gerçekçi ve uygulanabilir çözüm setleri sunmaktadır. Böylece, hem sistem güvenliği ve teknik yeterlilik hem de ekonomik verimlilik bir arada gözetilmekte olup, esnek ve çok yönlü planlama olanağı sağlanmaktadır. Bu yönüyle yapılan çalışma, modern güç sistemlerinin karmaşık yapısına uygun olarak, yalnızca kısa vadeli teknik avantajlara değil, aynı zamanda uzun vadeli ekonomik faydalara da odaklanmasıyla literatüre ve uygulamaya değerli bir katkı sunmaktadır.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, AAS'ler üzerinde bileşen bazlı fiziksel performans analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda, etkinliği kanıtlanmış bir katı-hal

AAS topolojisi içerisinde yer alan HÇR davranışı, SEY tabanlı çok-fizikli simülasyon altyapısı ile detaylı olarak incelenmiştir. Geliştirilen modelde, termal, elektrik alan ve manyetik alan dağılımları eş zamanlı olarak değerlendirilmiş; reaktörün normal işletme ve arıza koşullarında maruz kaldığı sıcaklık profili, elektrik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu ve mekanik zorlanmalar kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Böylece, modern AAS topolojilerinde kullanılan HÇR bileşeninin hem işletme güvenliği hem de dayanıklılığı açısından karşılaşabileceği sınırlar ve bir takım tasarım gereklilikleri ortaya konmuştur.

Çalışmanın ilk aşamasında, simülasyon ortamında modellenen iki baralı yüksek gerilim test sisteminin normal çalışması sırasında, HÇR'nin taşıdığı 257,7 A esas alınarak, HÇR'nin temel tasarım parametreleri belirlenmiştir. Sargı iletken kesitinin seçiminde ise 2, 4 ve 6 mm yarıçaplarındaki bakır iletkenler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; yapılan termal ve elektriksel analizler sonucunda, 4 mm yarıçapa sahip iletkenin optimum performans sunduğu tespit edilmiştir. Özellikle, farklı iletken kesitlerinde elde edilen sıcaklık ve manyetik akı yoğunluğu değerleri incelendiğinde, 2 mm'lik iletken ile maksimum sıcaklık 280,4 °C'ye kadar yükselirken, 4 mm'lik iletkende bu değer 74,6 °C'de kalmakta, 6 mm'lik iletkende ise sıcaklık 54,76 °C'ye kadar düşmektedir. Manyetik akı yoğunluğu değerleri ise sırasıyla; 0.1486 T, 0.0860 T ve 0.0620 T değerlerini almıştır. Bu analizler ışığında, termal güvenlik, manyetik etki ile ekonomi arasında optimal bir denge sağlayan 4 mm yarıçapındaki bakır iletken tercih edilmesine karar verilmiştir. HÇR'nin katman sayısının belirlenmesi aşamasında, 2, 3 ve 4 katmanlı yapılar ile gerçekleştirilen simülasyonlarda, manyetik akı yoğunluğu ve maksimum sıcaklık değerleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda, iki katmanlı yapı ile simüle edilen alternatifler arasında en düşük sıcaklık (74,6 °C) ve en düşük manyetik akı yoğunluğu (0,086 T) değerleri elde edilmiş, böylece elektriksel ve termal performans açısından en uygun tasarımın iki katmanlı HÇR olduğu belirlenmiştir. Tasarımın son aşamasında, hava kanalı genişlikleri değerlendirilmiştir. Sırasıyla 5, 10 ve 15 mm hava kanallarına sahip HÇR yapıları değerlendirildiğinde, manyetik akı yoğunluğunda belirgin bir değişim gözlenmemiş olup maksimum sıcaklık değerleri, sırasıyla; 77 °C, 74,6 °C ve 73,5 °C olmuştur. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, 10 mm hava boşluğu hem yeterli termal

performans hem de kompakt tasarım gereksinimlerini karşılayan dengeli bir seçenek olarak belirlenmiştir.

Belirlenen HÇR tasarımı esas alınarak, laboratuvar ortamında mevcut alçak gerilim SPRAAS prototipi üzerinde doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama sürecinde, SEY modeli ve iki baralı test sisteminin akım ve gerilim dinamiklerinin laboratuvar ölçümleriyle uyumu değerlendirilmiş ve modelin doğruluk düzeyi ortaya konmuştur. Sonuçlara göre, normal çalışma koşullarında bağıl hata %1,3 değerindeyken; arıza anında, HÇR'ye etki eden arıza akımı tepe noktasına ait bağıl hata %2,1 olarak belirlenmiştir. Bu düşük hata oranları, geliştirilen simülasyon modelinin normal işletme ve arıza koşullarında yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.

Alçak gerilim prototipi ile yapılan doğrulamanın ardından, yüksek gerilim seviyesinde simülasyon bazlı analizlere geçilmiştir. Burada, SEY modelinin sağladığı akım değerlerinin doğruluğu PSCAD simülasyonları ile kontrol edilmiştir. Analizler sırasında, iki baralı sistemin normal çalışma ve arıza koşulları için, elektrik alan, manyetik alan, manyetik kuvvet ve ısıl analizleri yapılmıştır. Test sisteminde SPRAAS mevcut değilken arıza akımı, subtransient evresinde 3318 A değerine ulaşmıştır. Bu değer PSCAD ile 3326 A olarak elde edilmiştir. SPRAAS'nin dahil edildiği durumda bu değerler sırasıyla 487 A ve 489 A'ya kadar düşmüştür. Arıza anında ise hava çekirdekli reaktörün üzerinden geçen arıza akımı, SEY tabanlı simülasyonlarda 672,14 A PSCAD ortamında ise 675,96 A değerini almıştır.

SEY tabanlı simülasyonlarda, normal işletme anında HÇR'nin oluşturduğu maksimum manyetik akı yoğunluğu 0,086 T değerindeyken, şebeke arızası sırasında bu değer %146,5 artarak 0,212 T değerini almıştır. Buna karşılık, iç ve dış sargı muhafazalarına etkiyen manyetik kuvvetler sırasıyla 55,43 N ve 60,82 N'den, 351,85 N ve 385,91 N değerlerine yükselmiştir.

Elektrik alan analizleri neticesinde, HÇR'nin normal işletim sırasında oluşturduğu maksimum elektrik alan şiddetinin 0,37 kV/mm olduğu, bu değerin arıza anında 0,66 kV/mm'ye yükseldiğini görülmüştür.

Isıl analiz sonuçlarına göre, iç ve dış sargıların maksimum sıcaklıkları sırasıyla 74 °C ve 70,5 °C olarak belirlenmiş; faz-toprak arızası sonrası ise sargı

sıcaklıklarında ihmal edilebilir düzeyde bir artış meydana gelmiştir. Hava çekirdekli reaktörün bu çalışma koşullarında termal dengesini sürdürebilmesi, uzun vadeli güvenilirlik açısından kritik bir avantaj sunmaktadır.

Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, güç sistemleri için geleneksel bir ekipman olan hava çekirdekli reaktörlerin, modern katı-hal arıza akım sınırlayıcı topolojileri içerisindeki kullanım potansiyelleri ve karşılaşabileceği zorluklar ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, HÇR'nin modern AAS yapılarında kritik bir unsur olarak değerlendirilebileceğini ve bu tür hibrit yaklaşımların, güç sistemlerinde güvenilirliği ve sürekliliği artıracak yenilikçi çözümler sunduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması ile güç sistemlerinde kısa devre akımlarının yönetimi ve sistem güvenliğinin artırılmasına yönelik güç sistemi planlaması ve ekipman düzeyinde bütüncül bir yaklaşım ortaya konmuştur. Geliştirilen optimizasyon algoritmaları, farklı büyüklük ve karmaşıklıktaki sistemlere uygulanabilirliğiyle, hem teknik (aktif güç kaybı ve arıza akımı minimizasyonu) hem de ekonomik (yatırım maliyeti ve uzun vadeli karlılık) açıdan gerçekçi ve çok yönlü optimizasyon yaklaşımları sunmaktadır. Ayrıca, tez çalışması kapsamında, geleneksel hava çekirdekli reaktörlerin modern katı-hal AAS yapılarında güvenilir şekilde kullanılabileceği gösterilerek, klasik ekipmanların ileri koruma teknolojileriyle entegrasyonuna yönelik yeni bir bakış açısı getirilmiştir. Çok-fizikli simülasyonlar ve deneysel doğrulama ile desteklenen bu yaklaşım, arıza akımı yönetimi ve bileşen performansı açısından kapsamlı bir değerlendirme ortaya koymuştur.

# KAYNAKÇA


[1] TEİAŞ, “Dünya ve Türkiye’nin Elektrik Enerjisi Üretimi ve Kurulu Gücünün Yıllara Göre Değişimi” https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri, Son Erişim Tarihi: 15.06.2025

[2] U.S Energy Information Administration, “Dünya ve Türkiye’nin Elektrik Enerjisi Üretimi ve Kurulu Gücünün Yıllara Göre Değişimi”, https://www.eia.gov/electricity/data.php, Son Erişim Tarihi: 15.06.2025

[3] T.C Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, “Elektrik Şebeke Yönetmeliği”, https://www.epdk.gov.tr/detay/icerik/3- 6730/elektrik--sebeke-, Son Erişim Tarihi: 15.06.2025

[4] P. Yu, B. Venkatesh, A. Yazdani, B.N. Singh, Optimal Location and Sizing of Fault Current Limiters in Mesh Networks Using Iterative Mixed Integer Nonlinear Programming, IEEE Transactions on Power Systems 31 (2016) 4776–4783. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2507067.

[5] H. Hua, T. Liu, X. Liu, C. He, L. Wu, L. Nan, X. Su, Optimal Allocation and Sizing of Fault Current Limiters Considering Transmission Switching With an Explicit Short Circuit Current Formulation, IEEE Transactions on Power Systems 38 (2023) 1322–1335. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3174870.

[6] Y. Hu, H.-D. Chiang, Optimal Placement and Sizing for Fault Current Limiters: Multi-Objective Optimization Approach, in: 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), IEEE, 2018: pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586326.

[7] G. Jin, J. Tan, L. Liu, C. Wang, T. Yuan, Placement optimization of Multi-Type fault current limiters based on genetic algorithm, Global Energy Interconnection 4 (2021) 501–512. https://doi.org/10.1016/j.gloei.2021.11.006.

[8] H.-T. Yang, W.-J. Tang, P.R. Lubicki, Placement of Fault Current Limiters in a Power System Through a Two-Stage Optimization Approach, IEEE Transactions on Power Systems 33 (2017) 131–140. https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2693390.

[9] R. Razzaghi, K. Niayesh, Current limiting reactor allocation in distribution networks in presence of distributed generation, in: 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEE, 2011: pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/EEEIC.2011.5874615.

[10] P. Chantachiratham, K. Hongesombut, PSO based approach for optimum fault current limiter placement in power system, in: 2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, IEEE, 2012: pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/ECTICon.2012.6254286.

[11] H. Bahramian Habil, E. Azad-Farsani, H. Askarian Abyaneh, A novel method for optimum fault current limiter placement using particle swarm optimization algorithm, International Transactions on Electrical Energy Systems 25 (2015) 2124–2132. https://doi.org/10.1002/etep.1952.

[12] A. Mahmoudian, M. Niasati, M.A. Khanesar, Multi objective optimal allocation of fault current limiters in power system, International Journal of Electrical Power and Energy Systems 85 (2017) 1–11. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.06.013.

[13] A. Mahmoudian, Multi-Objective Optimal Placement of Fault Current Limiter in IEEE RTS 24-Bus System: A Case Study Review, Electrica (2022). https://doi.org/10.5152/electrica.2022.22028.

[14] J.H. Teng, C.N. Lu, Optimum fault current limiter placement with search space reduction technique, IET Generation, Transmission and Distribution 4 (2010) 485–494. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0340.

[15] J.-H. Teng, C.-N. Lu, Optimum Fault Current Limiter Placement, in: 2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, IEEE, 2007: pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/ISAP.2007.4441611.

[16] P.T. Ngoc, J.G. Singh, Short circuit current level reduction in power system by optimal placement of fault current limiter, International Transactions on Electrical Energy Systems 27 (2017). https://doi.org/10.1002/etep.2457.

[17] M. Hosseinpour, J. Sadeh, Optimal Multiple FCLs Allocation Considering DG Penetration in Meshed Network With Multi-Level Voltages, 2020.

[18] M.A. Jarrahi, F. Roozitalab, M.M. Arefi, M. Mohammadi, M.S. Javadi, J.P.S. Catalao, Allocation of FCLs in transmission networks with high penetration of DGs: A two-stage approach, in: SEST 2021 - 4th International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. https://doi.org/10.1109/SEST50973.2021.9543340.

[19] A. Abdali, K. Mazlumi, A. Bagheri, An elitist gravitational search algorithm based approach for optimal placement of fault current limiters in power systems, Sigma J. Eng. Nat. Sci., vol. 37, no. 3, pp. 691–704, Jan. 2019

[20] M. Esmaili, M. Ghamsari-Yazdel, N. Amjady, C.Y. Chung, Optimal placement of resistive/inductive SFCLs considering short-circuit levels using complex artificial bee colony algorithm, IET Generation, Transmission and Distribution 13 (2019) 5561–5568. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0232.

[21] X. Zhang, H.S. Ruiz, J. Geng, T.A. Coombs, Optimal location and minimum number of superconducting fault current limiters for the protection of power grids, International Journal of Electrical Power and Energy Systems 87 (2017) 136–143. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.11.014.

[22] L. Chen, X. Zhang, H. Chen, G. Li, J. Yang, X. Tian, Y. Xu, L. Ren, Y. Tang, Pareto optimal allocation of resistive-type fault current limiters in active distribution networks with inverter-interfaced and synchronous distributed generators, Energy Sci Eng 7 (2019) 2554–2571. https://doi.org/10.1002/ese3.443.

[23] Z. Shu, Y. Chen, C. Deng, F. Zheng, H. Zhong, Pareto Optimal Allocation of Flexible Fault Current Limiter Based on Multi-Objective Improved Bat Algorithm, IEEE Access 9 (2021) 12762–12778. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050795.

[24] L. Huchel, H.H. Zeineldin, E.F. El-Saadany, Protection Coordination Index Enhancement Considering Multiple DG Locations Using FCL, IEEE Transactions

on Power Delivery 32 (2017) 344–350. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2533565.

[25] B. Chen, L. Wei, Y. Zhu, Y. Zhong, J. Yuan, Y. Lei, Pareto optimal allocation of fault current limiter based on immune algorithm considering cost and mitigation effect, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy 5 (2017) 820–829. https://doi.org/10.1007/s40565-016-0249-9.

[26] H.C. Jo, S.K. Joo, K. Lee, Optimal placement of superconducting fault current limiters (SFCLs) for protection of an electric power system with distributed generations (DGs), IEEE Transactions on Applied Superconductivity 23 (2013). https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2232958.

[27] A. Elmitwally, M.S. Kandil, E. Gouda, A. Amer, Mitigation of DGs Impact on Variable-Topology Meshed Network Protection System by Optimal Fault Current Limiters Considering Overcurrent Relay Coordination, Electric Power Systems Research 186 (2020). https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106417.

[28] M.Y. Shih, A. Conde, C. Ángeles-Camacho, E. Fernández, Z. Leonowicz, F. Lezama, J. Chan, A two stage fault current limiter and directional overcurrent relay optimization for adaptive protection resetting using differential evolution multi-objective algorithm in presence of distributed generation, Electric Power Systems Research 190 (2021). https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106844.

[29] R. Sanjay, T. Jayabarathi, T. Raghunathan, V. Ramesh, N. Mithulananthan, Optimal allocation of distributed generation using hybrid grey Wolf optimizer, IEEE Access 5 (2017) 14807–14818. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2726586.

[30] M. Cikan, N.N. Cikan, B. Kekezoglu, Determination of optimal island regions with simultaneous DG allocation and reconfiguration in power distribution networks, IET Renewable Power Generation 19 (2025). https://doi.org/10.1049/rpg2.12942.

[31] M.J.H. Moghaddam, A. Kalam, J. Shi, S.A. Nowdeh, F.H. Gandoman, A. Ahmadi, A New Model for Reconfiguration and Distributed Generation Allocation in Distribution Network Considering Power Quality Indices and Network Losses, IEEE Syst J 14 (2020) 3530–3538. https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2963036.

[32] R. Prakash, B. Lokeshgupta, S. Sivasubramani, T. Kobaku, V. Agarwal, Optimal DG Planning Incorporating Energy Management for an Economical and Resilient Smart Distribution System, IEEE Trans Ind Appl 60 (2024) 1890–1901. https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3327991.

[33] X. Wu, C. Hou, G. Li, W. Chen, G. Deng, Hybrid Ideal Point and Pareto Optimization for Village Virtual Power Plant: A Multi-Objective Model for Cost and Emissions Optimization, IEEE Access 12 (2024) 114527–114537. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3420097.

[34] S. Biswas, S.K. Goswami, A. Chatterjee, Optimal distributed generation placement in shunt capacitor compensated distribution systems considering voltage sag and harmonics distortions, IET Generation, Transmission and Distribution 8 (2014) 783–797. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0423.

[35] A.S. Abbas, R.A. El-Sehiemy, A. Abou El-Ela, E.S. Ali, K. Mahmoud, M. Lehtonen, M.M.F. Darwish, Optimal harmonic mitigation in distribution systems with inverter based distributed generation, Applied Sciences (Switzerland) 11 (2021) 1–16. https://doi.org/10.3390/app11020774.

[36] M.E. Hamidi, R.M. Chabanloo, Optimal Allocation of Distributed Generation with Optimal Sizing of Fault Current Limiter to Reduce the Impact on Distribution Networks Using NSGA-II, IEEE Syst J 13 (2019) 1714–1724. https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2867910.

[37] A.A.A. El-Ela, R.A. El-Sehiemy, A.M. Shaheen, A.R. Ellien, Optimal Allocation of Distributed Generation Units Correlated with Fault Current Limiter Sites in Distribution Systems, IEEE Syst J 15 (2021) 2148–2155. https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3009028.

[38] M. Ghamsari-Yazdel, M. Esmaili, N. Amjady, C.Y. Chung, A Linearized AC Planning Model for Generations and SFCLs Incorporating Transient Stability and Short-Circuit Constraints, IEEE Transactions on Power Systems 37 (2022) 715–725. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3096953.

[39] I. Sohail, B. Hussain, M. Abubakar, I.A. Sajjad, M.F. Nadeem, M. Sarwar, SC Currents Minimization in Distributed Generation Embedded Distribution Networks with Optimal Application of FCLs, CSEE Journal of Power and Energy Systems 8 (2022) 1388–1397. https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.00820.

[40] H. Alghamdi, Optimum placement of distribution generation units in power system with fault current limiters using improved coyote optimization algorithm, Entropy 23 (2021). https://doi.org/10.3390/e23060655.

[41] A.A. Farahani, R. Rahmani, S.H.H. Sadeghi, Optimal allocation and sizing of DG and FCL units in distribution networks to ensure protection coordination and cost reduction, Electrical Engineering 106 (2024) 3243–3252. https://doi.org/10.1007/s00202-023-02124-7.

[42] H. Radmanesh, S.H. Fathi, Fast AC reactor-based fault current limiters application in distribution network, High Voltage 3 (2018) 232–243. https://doi.org/10.1049/hve.2017.0195.

[43] A. Heidary, M. Bigdeli, K. Rouzbehi, Controllable reactor based hybrid HVDC breaker, High Voltage 5 (2020) 543–548. https://doi.org/10.1049/hve.2019.0354.

[44] IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors, 2012. https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6581850 (accessed December 4, 2023).

[45] IEC 60076-6:2007 Power transformers - Part 6: Reactors, 2007.

[46] M. Davarpanah, M. Abedini, S. Mohammadi, Practical solutions for ground grid circulating currents caused by air-core reactor, IET Generation, Transmission & Distribution 14 (2020) 3856–3865. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1582.

[47] Y.-H. Chen, Y.-Z. Xie, K.-J. Li, Y. Zhou, C. Gao, D.-Z. Zhang, L.-J. Wang, Impedance Determination for High Voltage Air-Core Reactor Over Wide Frequency Range Based on Impulse Injection Technique, IEEE Transactions on Power Delivery 35 (2020) 1909–1917. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2956905.

[48] Y. Hou, L. Qi, X. Zhang, S. Han, S. Zhang, X. Cui, Analytic Calculation of External Magnetic Field of High Voltage Toroid-Type Air-Core Reactors, IEEE Transactions on Power Delivery 38 (2023) 3398–3405. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3274683.

[49] L. Yao, R. Wang, A magnetically controlled series compensation-fault current limiter, The International Journal of Electrical Engineering & Education (2021) 002072092110020. https://doi.org/10.1177/00207209211002092.

[50] A. Heidary, K. Rouzbehi, A. Mehrizi-Sani, V.K. Sood, A Self-Activated Fault Current Limiter for Distribution Network Protection, IEEE J Emerg Sel Top Power Electron 10 (2022) 4626–4633. https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3109217.

[51] A. Heidary, H. Radmanesh, K. Rouzbehi, A. Mehrizi-Sani, G.B. Gharehpetian, Inductive fault current limiters: A review, Electric Power Systems Research 187 (2020). https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106499.

[52] D. Sevsek, M. Hinkkanen, J. Kukkola, M. Lehtonen, Dynamic Model of a Virtual Air Gap Reactor, IEEE Transactions on Power Delivery 38 (2023) 2521–2530. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3245123.

[53] P. Wang, Y. Zhou, W. Wei, X. Hao, Z. Mao, W. Wang, D. Xu, A DC Solid-State Current Limiter With Adaptive Current-Limiting Ability, IEEE Trans Ind Appl 59 (2023) 970–980. https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3207980.

[54] M.F. de Souza, A.T. Queiroz, G.G. Sotelo, P.R.D. Monteiro, M.Z. Fortes, A. Polasek, Fault current limiters: a case study of protection and operational continuity for FPSOs, Electrical Engineering 103 (2021) 2035–2045. https://doi.org/10.1007/s00202-021-01213-9.

[55] M. Amini, A.D. Aliabad, E. Amiri, Design and Analysis of Fault Current Limiter Based on Air Core Variable Series Reactor, IEEE Access 9 (2021) 166129–166136. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3134870.

[56] M. Amini, A. Damaki Aliabad, E. Amiri, Analytical modeling of fault current limiter with coreless variable series reactor, Electrical Engineering (2023). https://doi.org/10.1007/s00202-023-02009-9.

[57] S.A. Fazljoo, A.D. Aliabad, E. Amiri, A novel air core electromagnetic fault current limiter with rotational motion, IET Electr Power Appl 17 (2023) 855–866. https://doi.org/10.1049/elp2.12309.

[58] S.A. Fazljoo, A.D. Aliabad, E. Amiri, Analytical Modeling of Rotary Electromagnetic Fault Current Limiter, IEEE Access 11 (2023) 32792–32803. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3263494.

[59] O.E. Gouda, Z.E. Afifi, M.I. Awaad, A Novel Air Core Current Limiter Reactor for Medium and Low Voltage Systems, Electric Power Systems Research 217 (2023). https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109114.

[60] M. Moyzykh, D. Gorbunova, P. Ustyuzhanin, D. Sotnikov, K. Baburin, A. Maklakov, E. Magommedov, A. Shumkov, A. Telnova, V. Shcherbakov, D. Kumarov, L. Sabirov, M. Medovik, A. Kadyrbaev, S. Alexandrov, I. Mikoyan, S. Samoilenkov, A. Vavilov, First Russian 220 kV Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) For Application in City Grid, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 31 (2021) 1–7. https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3066324.

[61] J. Yuan, C. Ye, H. Zhou, J. Liu, Y. Zheng, W. Dong, Z. Ni, L. Wei, A Compact Saturated Core Fault Current Limiter Magnetically Integrated with Decoupling Windings, IEEE Transactions on Power Delivery 38 (2023) 2711–2723. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3255212.

[62] J. Yuan, Y. Lei, L. Wei, C. Tian, B. Chen, Z. Du, A Novel Bridge-Type Hybrid Saturated-Core Fault Current Limiter Based on Permanent Magnets, IEEE Trans Magn 51 (2015) 1–4. https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2440427.

[63] J. Yuan, Y. Zhong, S. Liao, Y. Gao, K. Muramatsu, J. Jia, B. Chen, Development and Analysis of Bridge-Type Saturated-Core Fault Current Limiter, IEEE Trans Magn 53 (2017) 1–5. https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2717849.

[64] M.B. Motamedinejad, M. Radmehr, M. Radmehr, M. Firouzi, Modified solid-state fault current limiter based on AC/DC reactor, International Journal of Electronics 109 (2022) 1214–1232. https://doi.org/10.1080/00207217.2021.1966669.

[65] A. Bitencourt, D.H.N. Dias, B.W. França, F. Sass, G.G. Sotelo, Design and tests of solid-state fault current limiters prototypes, International Transactions on Electrical Energy Systems 31 (2021). https://doi.org/10.1002/2050-7038.12738.

[66] A. Bitencourt, C. Nogueira, G. dos Santos, D.H.N. Dias, B.W. França, F. Sass, G.G. Sotelo, Analysis and experimental tests of a solid-state fault current limiter, Electrical Engineering 105 (2023) 3219–3228. https://doi.org/10.1007/s00202-023-01880-w.

[67] H. Nie, X. Liu, Y. Wang, Y. Yao, Z. Gu, C. Zhang, Breaking Overvoltage of Dry-Type Air-Core Shunt Reactors and its Cumulative Effect on the Interturn Insulation,

IEEE Access 7 (2019) 55707–55720. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913763.

[68] L. Gao, S. Ji, L. Zhu, H. Yang, F. Zhang, J. Li, S. Hui, Vibration and Noise Characteristics of Air-Core Reactor Used in HVDC Converter Stations, IEEE Transactions on Power Delivery 37 (2022) 1068–1077. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3076871.

[69] F. Yuan, B. Tang, C. Ding, S. Qin, Z. Yuan, L. Huang, Optimization Design of Oil-Immersed Air Core Coupling Reactor for a 160 kV Mechanical Direct Current Circuit Breaker, Energies (Basel) 12 (2019) 1104. https://doi.org/10.3390/en12061104.

[70] J. Zhu, Study on Magnetic Field Distribution Calculation and Protection of Dry-type Air Core Bridge Arm Reactor for VSC-HVDC System, in: 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), IEEE, 2022: pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/ICHVE53725.2022.9961434.

[71] H. Rui, L. Juntao, G. Zhaoli, L. Yongsheng, L. Xin, S. Na, S. Han, Spatial magnetic field distribution of different inter-turn short-circuit fault location for dry air-core reactors, in: 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE, 2018: pp. 2210–2214. https://doi.org/10.1109/ICIEA.2018.8398077.

[72] D. Han, X. Fan, X. Zhang, Analysis of Inter-turn Short Circuit Magnetic Field of Dry-type Air-core Reactor Based on Maxwell, in: 2021 14th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), IEEE, 2021: pp. 329–332. https://doi.org/10.1109/ISCID52796.2021.00082.

[73] K. Zhou, Z. Li, W. Gong, S. Zhao, C. Wen, Y. Song, Influence of Magnetic Field Generated by Air Core Reactors in SVC-Based Substation and an Optimal Suppression Method Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation, IEEE Trans Electromagn Compat 62 (2020) 1961–1970. https://doi.org/10.1109/TEMC.2019.2942435.

[74] J. Yang, W. Zhang, L. Zou, Y. Wang, Y. Sun, Y. Feng, Research on Distribution and Shielding of Spatial Magnetic Field of a DC Air Core Smoothing Reactor, Energies (Basel) 12 (2019) 937. https://doi.org/10.3390/en12050937.

[75] Y. Sun, L. Zou, Q. Liu, L. Dai, L. Zhang, T. Zhao, Research on Five-Loop Simplified Scaling Model for Dry-Type Air-Core Reactors with Inter-Turn Short Circuit Fault, IEEE Access 9 (2021) 163707–163715. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3118042.

[76] J. Liu, F. Yuan, B. Zhou, S. Yang, K. Lv, B. Tang, Structure Parameters Optimization of the Rain Cover and Ventilation Duct of Dry Air Core Reactor under the Forced Air Cooling Condition, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering 17 (2022) 792–800. https://doi.org/10.1002/tee.23568.

[77] F. Yuan, S. Yang, S. Qin, B. Tang, K. Lv, S. Han, C. Ding, L. Huang, The Optimization Design of Sound Arrester for the Dry Type Air Core Smoothing Reactor Based on the <scp>Multi-Physical</scp> Field Coupling Method, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering 16 (2021) 704–714. https://doi.org/10.1002/tee.23350.

[78] J. Rodríguez D., G. Alonso Orcajo, J.M. Cano, J. G. Norniella, A. Vicente, Thermal Analysis of Dry-Type Air-Core Coils for the Optimization of Passive Filtering Systems, Energies (Basel) 13 (2020) 4540. https://doi.org/10.3390/en13174540.

[79] J. Wu, Z. Ou, F. Huo, Test analysis and simulation calculation of temperature field for dry-type air-core reactor, in: J Phys Conf Ser, IOP Publishing Ltd, 2020. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1601/2/022036.

[80] S. Committee of the IEEE Power, E. Society, IEEE Guide for Fault Current Limiter (FCL) Testing of FCLs Rated above 1000 V AC Sponsored by the Switchgear Committee IEEE Power and Energy Society, n.d.

[81] M. Reza, B.-B. Jamal, D.-A. Asghar, A. Foroud, H. Haes, A. Editors, SPRINGER BRIEFS IN APPLIED SCIENCES AND TECHNOLOGY, n.d. https://link.springer.com/bookseries/8884.

[82] CIGRE, Application and Feasibility of Fault Current Limiters in Power Systems, 2012.

[83] A. Safaei, M. Zolfaghari, M. Gilvanejad, G. B. Gharehpetian, A survey on fault current limiters: Development and technical aspects, International Journal of Electrical Power and Energy Systems 118 (2020). https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105729.

[84] H. Ito, ed., Switching Equipment, Springer International Publishing, Cham, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72538-3.

[85] Y. Li, B. Liu, Y. Zhu, J. Hou, R. Liu, L. Guo, High-Impedance Transformer Parameter Determination Method for Limiting Short-Circuit Current of Power System, in: 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE, 2019: pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921810.

[86] P. Marini, Impact Of Transformer-Limited Fault on TRV of Medium Voltage Circuit Breakers in Industrial Plants, in: 2024 PCIC Energy Europe (PCIC Energy), IEEE, 2024: pp. 1–5. https://doi.org/10.23919/PCICEnergy62009.2024.10638157.

[87] S. Yadav, G.K. Choudhary, R. Kumar Mandal, Review on Fault Current Limiters, n.d. www.ijert.org.

[88] J. Lavaud, B. Leforgeais, T. Hazel, Pyrotechnic current limiting devices — From design to operation, in: 2014 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe, IEEE, 2014: pp. 1–8. https://doi.org/10.1109/PCICEurope.2014.6900050.

[89] D. Wilhelm, Dr.J. Weber, J.-G. Gödeke, HV Fuses with Improved Cyclic Stability ICS®, IET Conference Proceedings 2021 (2021) 15–19. https://doi.org/10.1049/icp.2021.1798.

[90] M.R. Barzegar-Bafrooei, A.A. Foroud, J.D. Ashkezari, M. Niasati, On the advance of SFCL: A comprehensive review, IET Generation, Transmission and Distribution 13 (2019) 3745–3759. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6842.

[91] K.B. Yadav, A. Priyadarshi, S. Shankar, V. Rathore, Study of fault current limiter—a survey, in: Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, 2021: pp. 97–113. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4692-1_8.

[92] A. Abramovitz, K. Ma Smedley, Survey of solid-state fault current limiters, IEEE Trans Power Electron 27 (2012) 2770–2782. https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2174804.

[93] H.J. Boenig, C.H. Mielke, B.L. Burley, H. Chen, J.A. Waynert, J.O. Willis, The bridge-type fault current controller - a new FACTS controller, in: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, 2002: pp. 455–460. https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043276.

[94] M. Firouzi, G.B. Gharehpetian, B. Mozafari, Bridge-type superconducting fault current limiter effect on distance relay characteristics, International Journal of Electrical Power and Energy Systems 68 (2014) 115–122. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.061.

[95] D. Baimel, N. Chowdhury, J. Belikov, Y. Levron, New type of bridge fault current limiter with reduced power losses for transient stability improvement of DFIG wind farm, Electric Power Systems Research 197 (2021). https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107293.

[96] G. Rashid, M.H. Ali, Fault ride through capability improvement of DFIG based wind farm by fuzzy logic controlled parallel resonance fault current limiter, Electric Power Systems Research 146 (2017) 1–8. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.018.

[97] O. Arikan, B. Kucukaydin, A new approach to limit fault current with series–parallel resonance strategy, Electrical Engineering 102 (2020) 1287–1296. https://doi.org/10.1007/s00202-020-00952-5.

[98] M.J. Damghani, D. Faramarzi, H.A. Abyaneh, B. Vahidi, Application of a parallel-resonance-type FCL for maintaining the recloser-fuse coordination in a power distribution system with a dispersed generation, in: 2015 30th International Power System Conference (PSC), IEEE, 2015: pp. 190–194. https://doi.org/10.1109/IPSC.2015.7827747.

[99] G.G. Karady, Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit, IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution 139 (1992) 1. https://doi.org/10.1049/ip-c.1992.0001.

[100] S.B. Naderi, M. Jafari, M. Tarafdar Hagh, Parallel-resonance-type fault current limiter, IEEE Transactions on Industrial Electronics 60 (2013) 2538–2546. https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2196899.

[101] J. Yuan, P. Gan, Z. Zhang, H. Zhou, L. Wei, K. Muramatsu, Saturated-core fault current limiters for AC power systems: Towards reliable, economical and better performance application, High Voltage 5 (2020) 416–424. https://doi.org/10.1049/hve.2019.0049.

[102] P.A. Commins, J.W. Moscrop, Analytical nonlinear reluctance model of a single-phase saturated core fault current limiter, IEEE Transactions on Power Delivery 28 (2013) 450–457. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2214404.

[103] S.M. Gunawardana, P.A. Commins, J.W. Moscrop, S. Perera, Transient modeling of saturated core fault current limiters, IEEE Transactions on Power Delivery 31 (2016) 2008–2017. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2524647.

[104] H. Liu, Q. Li, L. Zou, L. Zhang, W.S. Siew, Comparative study on the static and dynamic characteristics of four types of PMFCLs for large capacity applications, International Journal of Electrical Power and Energy Systems 34 (2012) 47–56. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.09.004.

[105] S.C. Mukhopadhyay, M. Lwahara, S. Yamada, Analysis, design and experimental results for a passive current limiting device, (n.d.). https://doi.org/10.1049/ipepa.

[106] Y. Xin, W. Gong, X. Niu, Z. Cao, J. Zhang, B. Tian, H. Xi, Y. Wang, H. Hong, Y. Zhang, B. Hou, X. Yang, Development of saturated iron core HTS fault current limiters, in: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007: pp. 1760–1763. https://doi.org/10.1109/TASC.2007.898181.

[107] F. Moriconi, F. De La Rosa, F. Darmann, A. Nelson, L. Masur, Development and deployment of saturated-core fault current limiters in distribution and transmission substations, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 21 (2011) 1288–1293. https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2104932.

[108] J. Yuan, Y. Zhong, S. Liao, L. Wei, Y. Gao, K. Muramatsu, J. Jia, B. Chen, L. Bai, A Novel Three-Phase Compact Saturated-Core Fault Current Limiter, IEEE Trans Magn 53 (2017). https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2704662.

[109] C. Tian, Y. Zhong, L. Wei, Y. Lei, B. Chen, Y. Gao, K. Muramatsu, J. Yuan, A Coupled Method for Evaluating Eddy Current Loss of NdFeB Permanent Magnets in a Saturated Core Fault Current Limiter, IEEE Trans Magn 53 (2017). https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2664828.

[110] N. Shafaghatian, A. Heidary, H. Radmanesh, K. Rouzbehi, Microgrids interconnection to upstream AC grid using a dual-function fault current limiter and power flow controller: Principle and test results, IET Energy Systems Integration 1 (2019) 269–275. https://doi.org/10.1049/iet-esi.2019.0014.

[111] J. Radosavljević, Metaheuristic Optimization in Power Engineering. Volume 1: Algorithms and power dispatch using MATLAB®-based software, Institution of Engineering and Technology, 2024. https://doi.org/10.1049/PBPO274F.

[112] K. Rajwar, K. Deep, S. Das, An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges, Artif Intell Rev 56 (2023) 13187–13257. https://doi.org/10.1007/s10462-023-10470-y.

[113] A.H. Gandomi, Interior search algorithm (ISA): A novel approach for global optimization, ISA Trans 53 (2014) 1168–1183. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.03.018.

[114] V. Punnathanam, P. Kotecha, Yin-Yang-pair Optimization: A novel lightweight optimization algorithm, Eng Appl Artif Intell 54 (2016) 62–79. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.04.004.

[115] R. V. Rao, V.J. Savsani, D.P. Vakharia, Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems, CAD Computer Aided Design 43 (2011) 303–315. https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.015.

[116] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, in: 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, IEEE, 2007: pp. 4661–4667. https://doi.org/10.1109/CEC.2007.4425083.

[117] E. Fadakar, M. Ebrahimi, A new metaheuristic football game inspired algorithm, in: 2016 1st Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC), IEEE, 2016: pp. 6–11. https://doi.org/10.1109/CSIEC.2016.7482120.

[118] P. Rabanal, I. Rodríguez, F. Rubio, Using River Formation Dynamics to Design Heuristic Algorithms, in: Unconventional Computation, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007: pp. 163–177. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73554-0_16.

[119] P. Savsani, V. Savsani, Passing vehicle search (PVS): A novel metaheuristic algorithm, Appl Math Model 40 (2016) 3951–3978. https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.10.040.

[120] A. Hatamlou, Heart: A novel optimization algorithm for cluster analysis, Progress in Artificial Intelligence 2 (2014) 167–173. https://doi.org/10.1007/s13748-014-0046-5.

[121] Y. Gao-Wei, H. Zhanju, A Novel Atmosphere Clouds Model Optimization Algorithm, in: 2012 International Conference on Computing, Measurement, Control and Sensor Network, IEEE, 2012: pp. 217–220. https://doi.org/10.1109/CMCSN.2012.117.

[122] G. Dueck, New Optimization Heuristics, J Comput Phys 104 (1993) 86–92. https://doi.org/10.1006/jcph.1993.1010.

[123] H. Du, X. Wu, J. Zhuang, Small-World Optimization Algorithm for Function Optimization, in: LNCS, 2006: pp. 264–273. https://doi.org/10.1007/11881223_33.

[124] S. Moein, R. Logeswaran, KGMO: A swarm optimization algorithm based on the kinetic energy of gas molecules, Inf Sci (N Y) 275 (2014) 127–144. https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.026.

[125] B. Javidy, A. Hatamlou, S. Mirjalili, Ions motion algorithm for solving optimization problems, Applied Soft Computing Journal 32 (2015) 72–79. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.03.035.

[126] M. Abdechiri, M.R. Meybodi, H. Bahrami, Gases brownian motion optimization: An algorithm for optimization (GBMO), Applied Soft Computing Journal 13 (2013) 2932–2946. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.03.068.

[127] R. Irizarry, LARES: An Artificial Chemical Process Approach for Optimization, Evol Comput 12 (2004) 435–459. https://doi.org/10.1162/1063656043138897.

[128] A. Kaveh, A. Dadras, A novel meta-heuristic optimization algorithm: Thermal exchange optimization, Advances in Engineering Software 110 (2017) 69–84. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.03.014.

[129] P. Melin, L. Astudillo, O. Castillo, F. Valdez, M. Garcia, Optimal design of type-2 and type-1 fuzzy tracking controllers for autonomous mobile robots under perturbed torques using a new chemical optimization paradigm, Expert Syst Appl 40 (2013) 3185–3195. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.032.

[130] O.K. Erol, I. Eksin, A new optimization method: Big Bang-Big Crunch, Advances in Engineering Software 37 (2006) 106–111. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.04.005.

[131] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Hatamlou, Multi-Verse Optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization, Neural Comput Appl 27 (2016) 495–513. https://doi.org/10.1007/s00521-015-1870-7.

[132] R.A. Formato, Central Force Optimization: A New Nature Inspired Computational Framework for Multidimensional Search and Optimization, in: 2008: pp. 221–238. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78987-1_21.

[133] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, S. Saryazdi, GSA: A Gravitational Search Algorithm, Inf Sci (N Y) 179 (2009) 2232–2248. https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.03.004.

[134] K.S. Lee, Z.W. Geem, A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: Harmony search theory and practice, Comput Methods Appl Mech Eng 194 (2005) 3902–3933. https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.09.007.

[135] S. Kirkpatrick, ; C D Gelatt, ; M P Vecchi, Optimization by Simulated Annealing, 1983.

[136] S. Mirjalili, A. Lewis, The Whale Optimization Algorithm, Advances in Engineering Software 95 (2016) 51–67. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.

[137] X.-S. Yang, A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm, in: 2010: pp. 65–74. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6.

[138] S. Mirjalili, The ant lion optimizer, Advances in Engineering Software 83 (2015) 80–98. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.01.010.

[139] R. Rajabioun, Cuckoo optimization algorithm, Applied Soft Computing Journal 11 (2011) 5508–5518. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.05.008.

[140] S. Mirjalili, A.H. Gandomi, S.Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, S.M. Mirjalili, Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems, Advances in Engineering Software 114 (2017) 163–191. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.07.002.

[141] X.-S. Yang, Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, in: 2009: pp. 169–178. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6_14.

[142] D. Karaboga, B. Basturk, A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm, Journal of Global Optimization 39 (2007) 459–471. https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x.

[143] M. Dorigo, M. Birattari, T. Stutzle, Ant colony optimization, IEEE Comput Intell Mag 1 (2006) 28–39. https://doi.org/10.1109/MCI.2006.329691.

[144] C. Ferreira, Gene Expression Programming in Problem Solving, in: Soft Computing and Industry, Springer London, London, 2002: pp. 635–653. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0123-9_54.

[145] H.-G. Beyer, H.-P. Schwefel, Evolution strategies A comprehensive introduction, 2002.

[146] R. Storn, K. Price, Differential Evolution-A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, Kluwer Academic Publishers, 1997.

[147] J.R. Koza, Genetic programming as a means for programming computers by natural selection, 1994.

[148] J.H. Holland, Genetic Algorithms, 267 (1992) 66–73. https://doi.org/10.2307/24939139.

[149] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, in: Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, IEEE, 1995: pp. 1942–1948. https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968.

[150] S. Saremi, S. Mirjalili, A. Lewis, Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application, Advances in Engineering Software 105 (2017) 30–47. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.01.004.

[151] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Lewis, Grey Wolf Optimizer, Advances in Engineering Software 69 (2014) 46–61. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

[152] H. Abedinpourshotorban, S. Mariyam Shamsuddin, Z. Beheshti, D.N.A. Jawawi, Electromagnetic field optimization: A physics-inspired metaheuristic optimization

algorithm, Swarm Evol Comput 26 (2016) 8–22. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2015.07.002.

[153] H. Shareef, A.A. Ibrahim, A.H. Mutlag, Lightning search algorithm, Applied Soft Computing Journal 36 (2015) 315–333. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.07.028.

[154] V. Tomar, M. Bansal, P. Singh, Metaheuristic Algorithms for Optimization: A Brief Review, Engineering Proceedings 59 (2023). https://doi.org/10.3390/engproc2023059238.

[155] A. Chakraborty, A.K. Kar, Swarm intelligence: A review of algorithms, in: Modeling and Optimization in Science and Technologies, Springer Verlag, 2017: pp. 475–494. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50920-4_19.

[156] A.G. Gad, Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review, Archives of Computational Methods in Engineering 29 (2022) 2531–2561. https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4.

[157] O. Bozorg-Haddad, M. Solgi, H.A. Loáiciga, Meta-Heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization, Wiley, 2017. https://doi.org/10.1002/9781119387053.

[158] A. Lambora, K. Gupta, K. Chopra, Genetic Algorithm- A Literature Review, in: 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon), IEEE, 2019: pp. 380–384. https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862255.

[159] Matlab - Genetic Algorithm, https://ch.mathworks.com/discovery/genetic-algorithm.html.

[160] S. Katoch, S.S. Chauhan, V. Kumar, A review on genetic algorithm: past, present, and future, Multimed Tools Appl 80 (2021) 8091–8126. https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6.

[161] IEEE 30-Bus System, accessed Apr. 2025 [Online]. Available: https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-30-bus-system/.

[162] IEEE 118-Bus System, accessed Apr. 2025 [Online]. Available: https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-118-bus-system/

[163] D. P. Kothari and J. S. Dhillon, *Power System Optimization*, New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited, 2007.

[164] Sukanta Nayak, Fundamentals of Optimization Techniques with Algorithms, Elsevier, 2020. https://doi.org/10.1016/C2019-1-02539-9.

[165] C. Bao, L. Xu, E.D. Goodman, L. Cao, A novel non-dominated sorting algorithm for evolutionary multi-objective optimization, J Comput Sci 23 (2017) 31–43. https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.09.015.

[166] European Commission, Report on Energy Prices and Costs in Europe, COM(2024)136 final, Brussels, 2024. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2024:136:FIN.

[167] IEA (2024), World Energy Outlook 2024, IEA, Paris [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024.

[168] David V. Hutton, David Hutton - Fundamentals of Finite Element Analysis-McGraw-Hill Science_Engineering_Math (2003), (n.d.).

[169] Reddy, J. N., *Introduction to the Finite Element Method*, Dördüncü Baskı, McGraw-Hill Education, New York, 2019.

[170] Mehrzad. Tabatabaian, COMSOL for engineers, Mercury Learning and Information, 2014.

[171] L. Graber, J. Kvitkovic, T. Chiocchio, M. Steurer, S. Pamidi, A. Usoskin, Coupled Magnetodynamic and Electric Circuit Models for Superconducting Fault Current Limiter, n.d.

[172] Electrostatics Theory, COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2025. https://www.comsol.com/multiphysics/electrostatics-theory

[173] COMSOL Multiphysics®, www.comsol.com, User's Guide, COMSOL AB, Stockholm, Sweden

[174] N. Uddin, Heat Transfer, CRC Press, Boca Raton, 2023. https://doi.org/10.1201/9781003428404.

[175] X. Yan, Z. Dai, Y. Zhang, C. Yu, Fluid-Thermal Field Coupled Analysis of Air Core Power Reactor, in: 2012 Sixth International Conference on Electromagnetic

Field Problems and Applications, IEEE, 2012: pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/ICEF.2012.6310276.

[176] J. Wu, Z. Chang, H. Zhang, M. Zhang, Y. Peng, J. Liao, Q. Huang, Thermal Simulation and Analysis of Dry-Type Air-Core Reactors Based on Multi-Physics Coupling, Energies (Basel) 16 (2023). https://doi.org/10.3390/en16217456.

[177] B. Kucukaydin, O. Arikan, A Comparative Study on Applicability of Parallel Resonance Type Fault Current Limiters in Power Systems, Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette 29 (2022). https://doi.org/10.17559/TV-20201006231717.

[178] H.A. Wheeler, Simple Inductance Formulas for Radio Coils, Proceedings of the IRE 16 (1928) 1398–1400. https://doi.org/10.1109/JRPROC.1928.221309.

[179] D. Josué Rodríguez, G.A. Orcajo, J.M. Cano, J.G. Norniella, A. Vicente, Thermal analysis of dry-type air-core coils for the optimization of passive filtering systems, Energies (Basel) 13 (2020). https://doi.org/10.3390/en13174540.

[180] H. A. Hamid, “Transients in reactors for power systems compensation,” Ph.D. dissertation, School of Engineering, Cardiff University, 2012.

[181] Mylar Katalog 1, https://www.par.uk.com/files/2409%20Mylar%20A.pdf, Son Erişim:15.06.2025

[182] Mylar Katalog 2, https://stenbacka.fi/wp-content/uploads/sites/3/2016/07/mylar_a_fysikaaliset_ominaisuudet.pdf., Son Erişim: 15.06.2025

[183] Mylar Katalog 3, https://laminatedplastics.com/mylar.pdf, Son erişim: 15.06.2025

[184] Mylar Katalog 4, https://www.bevi.dk/@/File/Get/?id=934&download=0, Son Erişim: 15.06.2025

[185] K. V. Naidu, M. S., High Voltage Engineering 2nd Edition. McGraw-Hill, 1995

[186] "IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors," in IEEE Std C57.16-2011 (Revision of IEEE Std C57.16-1996) , vol., no., pp.1-127, 2 Feb. 2012, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6145281.

[187] IEC Standard, IEC 60076-11:2018, Power Transformers, Part 11: Dry-type transformers

# A
# MATLAB KODLARI

## A.1 Bölüm 3 – Ardışık DÜ ve AAS Optimizasyonunda Kullanılan Hassasiyet Analizi Matlab Kodu

```
clc;
clear all;
load('30busdata.mat');

hat_sayisi = 41;
gen_sayisi = 8;

Fault_kA_initial = Fault_kA_initial(aimedbus);
delta_fault = zeros(length(aimedbus), 20);
delta_fault_lines = zeros(length(aimedbus), (hat_sayisi + gen_sayisi));

for location = 1:hat_sayisi+gen_sayisi
    num_lines = 41;
    FCL = [];
    Ybusold = Ybus;
    gendelta = zeros(n,n);
    index = 1;

    for empedans = 0.1:0.1:2
        if location <= 41
            FCL = [mpc.branch(location, 1), mpc.branch(location, 2),
empedans];
        elseif location > 41

            generator_index = location - num_lines;
            impedance = empedans;

            gendelta(gendata(generator_index,1),
gendata(generator_index,1)) = ...
                1/(impedance + j*gendata(generator_index,4)) - ...
                (1/(j*gendata(generator_index,4)));
        end
    end

    non_zero_elements = gendelta ~= 0;
    gen_fcl = sum(non_zero_elements(:));
    sizeFCL = size(FCL);
    fclnumber = sizeFCL(1,1);
    line_selections = round([1:fclnumber+gen_fcl]);
    unique_lines = unique(line_selections);

    if length(unique_lines) < length(line_selections)
        cost = 5000;
    else
```

```
        Z_FCL = zeros(fclnumber, 1);
        Y_FCL = zeros(fclnumber, 1);
        Y_ij_F = zeros(fclnumber, 1);
        Y_ij_FF = zeros(fclnumber, fclnumber);
        Ml = zeros(n, fclnumber);

        for o = 1:fclnumber
            Z_FCL_pu(o,1) = FCL(o,3);
            Y_FCL(o,1) = 1 / Z_FCL_pu(o,1);
            Y_ij(o,1) = -Ybus(FCL(o,1), FCL(o,2));
            Y_ij_F(o,1) = -((Y_ij(o,1))^2) / (Y_ij(o,1) + Y_FCL(o,1));
            Ml(FCL(o,1), o) = 1;
            Ml(FCL(o,2), o) = -1;

            Y_ij_FF(o,o) = Y_ij_F(o,1);
        end

        Delta_Y_F = Ml * Y_ij_FF * Ml';

        if isempty(FCL)
            Delta_Y_F = zeros(n,n);
        end

        Ybus_updated = Ybus + Delta_Y_F + gendelta;

        Znfull = zeros(n,n);
        Znbasefull = zeros(n,n);

        Fault = zeros(length(aimedbus), 1);
        for i = 1:length(aimedbus)
            f = aimedbus(i);
            En = zeros(n,1);
            En(f) = 1;
            Zn = Ybus_updated\En;
            Znbase = Ybus\En;
            Znbasefull(:,f) = Znbase;
            Znfull(:,f) = Zn;
            Fault(i) = abs(1 * cmax / Zn(f));
        end

        Fault_kA_updated = Fault * Sbase / (sqrt(3) * Vbase);
        Result = [aimedbus, Fault_kA_updated];
        delta_fault(:,index) = (Fault_kA_initial - Fault_kA_updated);
        index = index + 1;
    end

    delta_fault_lines(:,location) = (sum(delta_fault') / 21)';
end

nominee = zeros(2, length(aimedbus));
for i = 1:length(aimedbus)
    lineandelta = [[1:length(mpc.branch)+gen_sayisi]',
delta_fault_lines(i,:)'];
    sortedlineanddelta = sortrows(lineandelta, 2, 'descend');
    nominee(:,i) = sortedlineanddelta(1:2,1);
end

nomineefinal = unique(nominee(:))
```

## A.2 Bölüm 3 – Ardışık Optimizasyon Yaklaşımında AAS Yerleşimi ve AAS Maliyetinin Hesaplanması İçin Matlab Fonksiyonu

```
function[cost]=aasmaliyeti(x)
numFCL=7;
x(1:numFCL)=round(x(1:numFCL));
x(end)=round(x(end));
load('30busdata.mat')

hat_kumesi= [14
    16
    18
    19
    26
    27
    29
    ]';
gen_candidate=[10
    12
    ];
[~, idx] = ismember(gendata(:, 1), gen_candidate);
candidate_gendata = gendata(idx ~= 0, :);

num_lines=length(hat_kumesi);
FCL=[];
Ybusold=Ybus;
gendelta=zeros(n,n);
for i = 1:round(x(end))
    location = round(x(i));
    impedance = x(i+numFCL);

    if location <= length(hat_kumesi)
            yenifcl=[mpc.branch(hat_kumesi(location),1)
mpc.branch(hat_kumesi(location),2) impedance];
       AAS = [FCL;yenifcl];
    elseif location > num_lines && location <= num_lines + gennumber
        generator_index = location - num_lines;

gendelta(candidate_gendata(generator_index,1),candidate_gendata(generato
r_index,1))=1/(impedance+j*candidate_gendata(generator_index,4))-
(1/(j*candidate_gendata(generator_index,4)));
    else

    end

end

non_zero_elements = gendelta ~= 0;
gen_AAS = sum(non_zero_elements(:));
sizeFCL=size(FCL);
fclnumber=sizeFCL(1,1);

line_selections = round([x(1:fclnumber+gen_fcl)]);
unique_lines = unique(line_selections);

if length(unique_lines) < length(line_selections)
```

```
    cost=5000;
else

Z_FCL=zeros(fclnumber,1);
Y_FCL=zeros(fclnumber,1);
Y_ij_F=zeros(fclnumber,1);
Y_ij_FF=zeros(fclnumber,fclnumber);
Ml=zeros(n,fclnumber);
for o=1:fclnumber;

Z_FCL_pu(o,1)=FCL(o,3);
Y_FCL(o,1) = (1 / Z_FCL_pu(o,1));
Y_ij(o,1) = -Ybus(FCL(o,1),FCL(o,2));
Y_ij_F(o,1) = -((Y_ij(o,1))^2) / (Y_ij(o,1) + Y_FCL(o,1));


Ml(FCL(o,1),o) = 1;
Ml(FCL(o,2),o) = -1;

Y_ij_FF(o,o)=Y_ij_F(o,1);
end
Delta_Y_F = Ml * Y_ij_FF * Ml';

[satir,sutun]=size(FCL);
if satir==0
    Delta_Y_F = zeros(n,n);
else
end
Ybus_updated = Ybus + Delta_Y_F+gendelta;


Fault=zeros(length(aimedbus),1);

[L, U, P] = lu(Ybus_updated);

opts1.LT = true;
opts2.UT = true;

for ii = 1:length(aimedbus)
    f = aimedbus(ii);
    En = zeros(n,1);
    En(f) = 1;

    Y_perm = P * En;
    Z_intermediate = linsolve(L, Y_perm, opts1);
    Zn = linsolve(U, Z_intermediate, opts2);

    Fault(ii) = abs(1 * cmax / Zn(f));
end

Fault_kA_updated=Fault*Sbase/(sqrt(3)*Vbase);

Result=[aimedbus Fault_kA_updated];
a=Fault_kA_updated > 10000;

if numel(a(a>0)) >0
    ceza_faktor = 10 * numel(a(a>0));
```

```
cost=0.4*round(x(end))+0.15*sum(x(numFCL+1:numFCL+round(x(end))))+ceza_f
aktor;

else
     cost=0.4*round(x(end))+0.15*sum(x(numFCL+1:numFCL+round(x(end))));

end
end
end
```

## A.3 Bölüm 3 – Ardışık Optimizasyon Yaklaşımında DÜ Yerleşimi ve Aktif Güç kaybı Hesabı İçin Matlab Fonksiyonu

```
function[Ploss]=DG_Final(x)
numGEN=5;
nVARgen=2*numGEN+1;
nVar=nVARgen;
[nRows, nCols] = size(x);
mpc=loadcase('case118');
bara_kumesi = mpc.bus(mpc.bus(:, 10) == 138, 1);
real_sources = mpc.gen(mpc.gen(:, 2) ~= 0, :);
gen_bars=real_sources(:,1);
bara_kumesi = setdiff(bara_kumesi, gen_bars);
x(1:numGEN)=round(x(1:numGEN));
gen_locations = round(x(1:numGEN));
x(nVARgen)=round(x(nVARgen));

max_location_gen=length(bara_kumesi);
while length(unique(gen_locations)) < length(gen_locations)
    for ii = 1:length(gen_locations)
        duplicates_gen = find(gen_locations == gen_locations(ii));
        if length(duplicates_gen) > 1
            for f = 2:length(duplicates_gen)
                new_location_gen = gen_locations(duplicates_gen(f)) + 1;
                if new_location_gen > max_location_gen
                    new_location_gen = 1;
                end
                while any(gen_locations == new_location_gen)
                    new_location_gen = new_location_gen + 1;
                    if new_location_gen > max_location_gen
                        new_location_gen = 1;
                    end
                end

               gen_locations(duplicates_gen(f)) = new_location_gen;
            end
        end
    end
    unique_gen_locations = unique(gen_locations);
end
x(1:numGEN)=gen_locations;

for ii=1:numGEN
    x(ii)=bara_kumesi(x(ii));
end
mpc2=mpc;
```

```
[alrgen,fln]=size(mpc.gen);

mpc2.gen = zeros(alrgen+x(nVARgen),21);
mpc2.gen(1:alrgen,:)=mpc.gen(1:alrgen,:);
extragenparam=[5 0 0 10 -10 1.00 100 1 150 0 0      0 0    0 0 0 0 0 0 0
0 ];
for ii = 1:x(nVARgen);
    mpc2.gen(alrgen+ii,3:end)= extragenparam(3:end);
    mpc2.gen(alrgen+ii,1:2)=[x(ii) x(ii+numGEN)];
mpc2.bus(x(ii), 2) = 2;
end;

    opt = mpoption('VERBOSE',0, 'OUT_ALL',0);
[results, success] = runpf(mpc2,opt);
if ~success
    disp('Yük akışı başarısız. Parametreleri kontrol edin.');
    Ploss = 1000;
end

if length(unique(gen_locations)) < length(gen_locations)
        Ploss = 1000;
    else
loss = get_losses(results);
totaloss=sum(loss);
Ploss=(real(totaloss))';
end
end
```

## A.4 Bölüm 3 – Eş zamanlı (Çok Amaçlı) DÜ ve AAS Yerleşiminde Kullanılan Hassasiyet Fonksiyonu

```
function[nomineefinal, aimedbus] =
sensitivity(gendata,numGEN,numFCL,mpc)

nVARgen=2*numGEN+1;
nVARfcl=2*numFCL+1;
mpc2=mpc;
Vn_gen=138000;
Vn_bus=138000;
Sbase=100*1e6;
Vbase=138000;
cmax=1.0;
cbRate=25000;
busvoltages=[mpc2.bus(:,1) mpc2.bus(:,10)];
Ybus=makeYbus(mpc2);
busvoltages=[mpc2.bus(:,1) mpc2.bus(:,10)];

a=[max(mpc2.branch(:,1))];
b=[max(mpc2.branch(:,2))];
n=max([a,b]);
[branch_number,flnfiln]=size(mpc2.branch);
sizeGEN=size(gendata);
gennumber=sizeGEN(1,1);
```

```
for gj=1:gennumber;

Ybus(gendata(gj,1),gendata(gj,1))=Ybus(gendata(gj,1),gendata(gj,1))+(1/(
j*gendata(gj,4)));
end;

Ybus_updated = Ybus;

Znbasefull=zeros(n,n);
En=zeros(n,1);
Fault=zeros(n,1);

[L, U, P] = lu(Ybus_updated);

En = eye(n);

Zn = U \ (L \ (P * En));

Fault = abs(1 * cmax ./ diag(Zn));

 Fault_kA_initial=Fault*Sbase/(sqrt(3)*Vbase);
 Fault_sorted=[(1:n)' Fault_kA_initial];

Buses_138kV=busvoltages(busvoltages(:, 2) == 138, 1);
Fault_138kV = Fault_sorted(ismember(Fault_sorted(:, 1), Buses_138kV),
:);
over_limit_data = Fault_138kV(Fault_138kV(:, 2) > cbRate, :);
aimedbus=over_limit_data(:,1);

hat_sayisi = branch_number;
[gen_sayisi,flnfilnfiln]=size(gendata);
Fault_kA_initial = Fault_kA_initial(aimedbus);
delta_fault = zeros(length(aimedbus), 20);
delta_fault_lines = zeros(length(aimedbus), (hat_sayisi + gen_sayisi));
for location = 1:hat_sayisi+gen_sayisi
    num_lines = branch_number;
    AAS = [];
    Ybusold = Ybus;
    gendelta = zeros(n,n);
    index = 1;

    for empedans = 0.1:0.1:2
        if location <= branch_number
            AAS = [mpc.branch(location, 1), mpc.branch(location, 2),
empedans];
        elseif location > branch_number
            generator_index = location - num_lines;
            impedance = empedans;

            gendelta(gendata(generator_index,1),
gendata(generator_index,1)) = ...
                1/(impedance + j*gendata(generator_index,4)) - ...
                (1/(j*gendata(generator_index,4)));
        end
    end

    non_zero_elements = gendelta ~= 0;
    gen_AAS = sum(non_zero_elements(:));
    sizeAAS = size(FCL);
```

```
    fclnumber = sizeFCL(1,1);

        Z_AAS = zeros(fclnumber, 1);
        Y_AAS = zeros(fclnumber, 1);
        Y_ij_F = zeros(fclnumber, 1);
        Y_ij_FF = zeros(fclnumber, fclnumber);
        Ml = zeros(n, fclnumber);

        for o = 1:fclnumber
            Z_FCL_pu(o,1) = FCL(o,3);
            Y_FCL(o,1) = 1 / Z_FCL_pu(o,1);

            Y_ij(o,1) = -Ybus(FCL(o,1), FCL(o,2));
            Y_ij_F(o,1) = -((Y_ij(o,1))^2) / (Y_ij(o,1) + Y_FCL(o,1));

            Ml(FCL(o,1), o) = 1;
            Ml(FCL(o,2), o) = -1;

            Y_ij_FF(o,o) = Y_ij_F(o,1);
        end

        Delta_Y_F = Ml * Y_ij_FF * Ml';

        if isempty(FCL)
            Delta_Y_F = zeros(n,n);
        end


        Ybus_updated = Ybus + Delta_Y_F + gendelta;

        Fault = zeros(length(aimedbus), 1);

       [L, U, P] = lu(Ybus_updated);

opts1.LT = true;
opts2.UT = true;

for i = 1:length(aimedbus)
    f = aimedbus(i);
    En = zeros(n,1);
    En(f) = 1;

    Y_perm = P * En;
    Z_intermediate = linsolve(L, Y_perm, opts1);
    Zn = linsolve(U, Z_intermediate, opts2);

    Fault(i) = abs(1 * cmax / Zn(f));
end
        Fault_kA_updated = Fault * Sbase / (sqrt(3) * Vbase);
        Result = [aimedbus, Fault_kA_updated];
        delta_fault(:,index) = (Fault_kA_initial - Fault_kA_updated);
        index = index + 1;

    delta_fault_lines(:,location) = (sum(delta_fault') / 21)';
end

nominee = zeros(2, length(aimedbus));
for i = 1:length(aimedbus)
```

```
   lineandelta = [[1:length(mpc.branch)+gen_sayisi]',
delta_fault_lines(i,:)'];
    sortedlineanddelta = sortrows(lineandelta, 2, 'descend');
    nominee(:,i) = sortedlineanddelta(1:2,1);
end

nomineefinal = unique(nominee(:));

end
```

## A.5 Bölüm 3 – Eş zamanlı (Çok Amaçlı) DÜ ve AAS Yerleşiminde Kullanılan AAS Maliyeti ve Aktif Güç Kaybı Hesap Fonksiyonu

```
function[obj]=DG_FCL_3obj(x)

numGEN=5;
numFCL=7;

nVARgen=2*numGEN+1;
nVARfcl=2*numFCL+1;
nVar=[nVARgen nVARfcl];


xbase=x;
[nRows, nCols] = size(x);
mpc=loadcase('case118');
bara_kumesi = mpc.bus(mpc.bus(:, 10) == 138, 1);
real_sources = mpc.gen(mpc.gen(:, 2) ~= 0, :);
gen_bars=real_sources(:,1);
bara_kumesi = setdiff(bara_kumesi, gen_bars);


for c=1:nRows
x=x(c,:);

x(1:numGEN)=round(x(1:numGEN));
gen_locations = round(x(1:numGEN));
x(nVARgen)=round(x(nVARgen));
x((nVARgen+1):(nVARgen+numFCL))= round(x((nVARgen+1):(nVARgen+numFCL)));
 x(nVARgen+nVARfcl)=round(x(nVARgen+nVARfcl));

max_location_gen=length(bara_kumesi);
while length(unique(gen_locations)) < length(gen_locations)

    for ii = 1:length(gen_locations)
        duplicates_gen = find(gen_locations == gen_locations(ii));
        if length(duplicates_gen) > 1
            for f = 2:length(duplicates_gen)
                new_location_gen = gen_locations(duplicates_gen(f)) + 1;
                if new_location_gen > max_location_gen
                    new_location_gen = 1;
                end


                while any(gen_locations == new_location_gen)
                    new_location_gen = new_location_gen + 1;
```

```
                    if new_location_gen > max_location_gen
                        new_location_gen = 1;
                    end
                end
                gen_locations(duplicates_gen(f)) = new_location_gen;
            end
        end
    end
    unique_gen_locations = unique(gen_locations);
end
x(1:numGEN)=gen_locations;

for ii=1:numGEN
    x(ii)=bara_kumesi(x(ii));
end
mpc2=mpc;

[alrgen,fln]=size(mpc.gen);

mpc2.gen = zeros(alrgen+x(nVARgen),21);
mpc2.gen(1:alrgen,:)=mpc.gen(1:alrgen,:);
extragenparam=[5 0 0 10 -10 1.00 100 1 150 0 0 0 0  0 0 0 0 0 0 0 0 ];
for ii = 1:x(nVARgen);
    mpc2.gen(alrgen+ii,3:end)= extragenparam(3:end);
    mpc2.gen(alrgen+ii,1:2)=[x(ii) x(ii+numGEN)];
mpc2.bus(x(ii), 2) = 2;
end;

Vn_gen=138000;
Vn_bus=138000;
Sbase=100*1e6;
Vbase=138000;
cmax=1.0;
cbRate=25000;

busvoltages=[mpc2.bus(:,1) mpc2.bus(:,10)];
Ybus=makeYbus(mpc2);
busvoltages=[mpc2.bus(:,1) mpc2.bus(:,10)];
a=[max(mpc2.branch(:,1))];
b=[max(mpc2.branch(:,2))];
n=max([a,b]);
[branch_number,flnfiln]=size(mpc2.branch);

gendatabase=zeros(19,5);
gendatabase(:,1)=real_sources(:,1);
for z=1:length(real_sources(:,1))

gendatabase(z,4)= 0.02 / (sqrt(real_sources(z,2) / max
(real_sources(:,2))));

end
gendata_added = zeros(x(nVARgen),5);

for ii=1:x(nVARgen);
    gendata_added(ii)=x(ii);
    gendata_added(ii, 4) = 0.02 / sqrt(x(ii+numGEN) / max
(real_sources(:,2)));
end;
```

```
gendata=[gendatabase;gendata_added];


for gj=1:gennumber;
Ybus(gendata(gj,1),gendata(gj,1))=Ybus(gendata(gj,1),gendata(gj,1))+(1/(
j*gendata(gj,4)));
end;

    opt = mpoption('VERBOSE',0, 'OUT_ALL',0);
[results, success] = runpf(mpc2,opt);
if ~success
    disp('Yük akışı başarısız. Parametreleri kontrol edin.');
    Ploss = 1000;

end

if length(unique(gen_locations)) < length(gen_locations)
        Ploss = 1000;
    else
loss = get_losses(results);
totaloss=sum(loss);
Ploss_org=(real(totaloss))';
End


[nomineefinal, aimedbus] = DinamikHassasiyet(gendata,numGEN,numFCL,mpc);
if length(aimedbus)==0
    fcl_cost=0;
    asim=0;
else

num_lines=length(nomineefinal(nomineefinal<=branch_number));
hat_kumesi=nomineefinal(nomineefinal<=branch_number);
gen_kumesi=nomineefinal(nomineefinal>branch_number);
fcl_original = round(x(nVARgen+1:nVARgen+numFCL));

fcl_original = round(x(nVARgen+1:nVARgen+numFCL));
effective_locations = 1:length(nomineefinal);
mapped_index = round(rescale(fcl_original, 1,
length(effective_locations)));
mapped_fcl_locations = effective_locations(mapped_index);
x(nVARgen+1:nVARgen+numFCL) = mapped_fcl_locations;



busvoltages=[mpc.bus(:,1) mpc.bus(:,10)];
Buses_138kV=busvoltages(busvoltages(:, 2) == 138, 1);
aimedbus=Buses_138kV;
candidate_gendata = gendata;
FCL=[];
Ybusold=Ybus;
gendelta=zeros(n,n);


max_location = length(nomineefinal);
line_selections = round([x(nVARgen+1:nVARgen+numFCL)]);
unique_lines = unique(line_selections);

iteration_count = 0;
```

```
max_iterations = 10;

while length(unique_lines) < length(line_selections) && iteration_count
< max_iterations
    for ii = 1:length(line_selections)
        duplicates = find(line_selections == line_selections(ii));

        if length(duplicates) > 1
            for f = 2:length(duplicates)
                new_location = line_selections(duplicates(f)) + 1;

                if new_location > max_location
                    new_location = 1;
                end

                shift_count = 0;
                while any(line_selections == new_location)
                    new_location = new_location + 1;

                    if new_location > max_location
                        new_location = 1;
                    end

                    shift_count = shift_count + 1;
                    if shift_count > max_location
                        break;
                    end
                end

                line_selections(duplicates(f)) = new_location;
            end
        end
    end

    unique_lines = unique(line_selections);
    iteration_count = iteration_count + 1;
end

if iteration_count >= max_iterations
    disp('UYARI: Maksimum iterasyon sınırına ulaşıldı, bazı konumlar
tekrar ediyor olabilir!');
end

x(nVARgen+1:nVARgen+numFCL) = line_selections;

for ii = 1:round(x(nVARgen+nVARfcl))
    location = round(x(nVARgen+ii));

    impedance = x(nVARgen+ii+numFCL)

if location > max_location
    location=max_location;
end
    if location <= length(hat_kumesi)
            yenifcl=[mpc.branch(hat_kumesi(location),1)
mpc.branch(hat_kumesi(location),2) impedance];
       AAS = [FCL;yenifcl];
    elseif location > num_lines && location <= max_location
```

```
        gen_spot=nomineefinal(location);
         generator_index = gen_spot - branch_number;

gendelta(candidate_gendata(generator_index,1),candidate_gendata(generato
r_index,1))=1/(impedance+1i*candidate_gendata(generator_index,4))-
(1/(1i*candidate_gendata(generator_index,4)));
    else

    end

end

non_zero_elements = gendelta ~= 0;
gen_AAS = sum(non_zero_elements(:));
sizeFCL=size(FCL);
fclnumber=sizeFCL(1,1);
Z_FCL=zeros(fclnumber,1);
Y_FCL=zeros(fclnumber,1);
Y_ij_F=zeros(fclnumber,1);
Y_ij_FF=zeros(fclnumber,fclnumber);
Ml=zeros(n,fclnumber);
for o=1:fclnumber;
Z_FCL_pu(o,1)=FCL(o,3);
Y_FCL(o,1) = (1 / Z_FCL_pu(o,1));
Y_ij(o,1) = -Ybus(FCL(o,1),FCL(o,2));
Y_ij_F(o,1) = -((Y_ij(o,1))^2) / (Y_ij(o,1) + Y_FCL(o,1));
Ml(FCL(o,1),o) = 1;
Ml(FCL(o,2),o) = -1;
Y_ij_FF(o,o)=Y_ij_F(o,1);
End
Delta_Y_F = Ml * Y_ij_FF * Ml';
[satir,sutun]=size(FCL);
if satir==0
    Delta_Y_F = zeros(n,n);
else
end
Ybus_updated = Ybus + Delta_Y_F+gendelta;
Fault=zeros(length(aimedbus),1);
[L, U, P] = lu(Ybus_updated);
opts1.LT = true;
opts2.UT = true;
for ii = 1:length(aimedbus)
    f = aimedbus(ii);
    En = zeros(n,1);
    En(f) = 1;
    Y_perm = P * En;
    Z_intermediate = linsolve(L, Y_perm, opts1);
    Zn = linsolve(U, Z_intermediate, opts2);
    Fault(ii) = abs(1 * cmax / Zn(f));
end
Fault_kA_updated=Fault*Sbase/(sqrt(3)*Vbase);

Result=[aimedbus Fault_kA_updated];
asim=Fault_kA_updated > cbRate;
fcl_cost=0.7*round(x(nVARgen+nVARfcl))+0.5*sum(x(nVARgen+1+numFCL:nVARge
n+numFCL+round(x(end))));
end
if numel(asim(asim>0)) >0
    ceza_faktor = 100 * numel(asim(asim>0));
```

```
    Ploss=Ploss_org+ceza_faktor;
    fcl_cost=fcl_cost+ceza_faktor;
else
    Ploss=Ploss_org;
end
energy_price = 326;
OM = 15;
Pdg = sum(mpc2.gen(alrgen+1:end,2));
Capitalcost=1630000*Pdg/1e6;
hours_per_year = 8760;
Tasarruf=(((132.863-(Ploss)) * energy_price * hours_per_year))/1e6;
Gider=((OM * Pdg * hours_per_year)+(0.02*fcl_cost))/1e6;

karlilik=(Tasarruf-Gider);
if karlilik < 0
    karlilik = 1;
end
Total_profit = -(Capitalcost + fcl_cost) + (25 * karlilik);
obj(c,1) = Ploss;
obj(c,2)=fcl_cost;
x=xbase;
end
end
```

# TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

**Konferans Bildirisi**

**1**. F. Akin, O. Arikan and B. Kucukaydin, "FEM Based Air-Core Reactor Modelling for Series Inductor of SPRFCL," 2023 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), Istanbul, Turkiye, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEET60227.2023.10525922.

**Uluslararası Makale**

**1**. F. Akin, O. Arikan, and B. Kucukaydin, "Multi-physics modelling and performance analysis of an air-core reactor in the framework of solid-state fault current limiters," *Electric Power Systems Research*, vol. 231, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2024.110313.

**Proje**

**1**. "Dağıtık Üretim Birimleri İçeren Güç Sistemleri İçin Arıza Akımı Sınırlayıcı Optimizasyonu", 125E050 nolu TÜBİTAK 1002 Projesi, Yürütücü – Fırat AKIN, Danışman – Doç. Dr. Oktay ARIKAN, 2025-2026.