



## Güç Sistemlerinde Aşırı Akım Röle Ayarlarının Metasezgisel Optimizasyon Teknikleri ile İyileştirilmesi

### Improvement of Overcurrent Relay Settings in Power Systems Using Metaheuristic Optimization Techniques

İbrahim Arslanoğlu<sup>1\*</sup>, İsmail Hakkı Altaş<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Trabzon, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Ostim Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Ankara, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author\*: ibrahimarslanoglu@ktu.edu.tr

#### Öz

Güç sistemlerinde artan yük talebi, dağıtık üretim kaynaklarının entegrasyonu ve ağ yapılarındaki karmaşıklık, koruma sistemlerinin daha hızlı, hassas ve esnek olmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, aşırı akım rölelerinin doğru şekilde koordine edilmesi, sistemin güvenli ve kararlı çalışabilmesi açısından kritik bir gerekliliktir. Ancak geleneksel yöntemler, özellikle geniş ölçekli şebekelerde optimal ayarların belirlenmesinde yetersiz kalmakta; bu durum, çözüm uzayını daha etkin tarayabilen metasezgisel optimizasyon algoritmalarını öne çıkarmaktadır. Bu çalışmada, IEEE 33 baralı bir radyal dağıtım sistemi üzerinde Genetik Algoritma (GA), Kara Delik Algoritması (BHA), Koku Ajanı Optimizasyonu (SAO), Lig Şampiyonu Algoritması (LCA) ve Geçiş Arama Optimizasyonu (TSO) algoritmaları kullanılarak aşırı akım röle koordinasyonu optimize edilmiştir. Her algoritma eşit başlangıç koşullarında değerlendirilmiş; röle zaman çarpanı ve eşik akım parametreleri optimize edilerek toplam işletme süresinin en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, en düşük toplam işletme süresi olan 4.53 s TSO algoritması ile elde edilmiş ve bu algoritma en yüksek optimizasyon başarısını göstermiştir. Diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında TSO; LCA'ya göre %41.95, SAO'ya göre %73.96, BHA'ya göre %84.99 ve GA'ya göre %86.32 oranında daha iyi performans sergilemiştir. Özellikle TSO ve SAO'nun bu probleme ilk kez uygulanmış olması ve başarılı sonuçlar elde etmesi çalışmanın özgün yönlerindedir. LCA ise, çözüm kalitesi ile işlem süresi arasındaki dengeli yapısıyla pratik uygulamalarda güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Aşırı akım röle koordinasyonu, Genetik Algoritma (GA), Kara Delik Algoritması (BHA), Koku Ajanı Optimizasyonu (SAO), Lig Şampiyonu Algoritması (LCA), Geçiş Arama Optimizasyonu (TSO)

#### Abstract

The increasing load demand, the integration of distributed generation sources, and the growing complexity of network structures have necessitated protection systems in power grids to become faster, more accurate, and more flexible. In this context, the proper coordination of overcurrent relays is a critical requirement for ensuring the safe and stable operation of the system. However, conventional methods are often inadequate in determining optimal settings, especially in large-scale networks. This limitation highlights the importance of metaheuristic optimization algorithms that can explore the solution space more effectively. In this study, overcurrent relay coordination was optimized on an IEEE 33-bus radial distribution system using five metaheuristic algorithms: Genetic Algorithm (GA), Black Hole Algorithm (BHA), Smell Agent Optimization (SAO), League Championship Algorithm (LCA), and Transit Search Optimization (TSO). Each algorithm was evaluated under equal initial conditions, with the objective of minimizing the total operating time by optimizing the time dial setting (TDS) and pickup current (PS) parameters. According to the results, the lowest total operating time of 4.53 s was achieved using the TSO algorithm, which demonstrated the highest optimization performance. When compared with the other algorithms, TSO outperformed LCA by 41.95%, SAO by 73.96%, BHA by 84.99%, and GA by 86.32%. A notable contribution of this study is the first-time application of TSO and SAO to this problem, both of which yielded successful results. Furthermore, LCA is considered a strong alternative in practical applications due to its balanced performance between solution quality and computational efficiency.

**Keywords:** Overcurrent Relay Coordination, Genetic Algorithm (GA), Black Hole Algorithm (BHA), Smell Agent Optimization (SAO), League Championship Algorithm (LCA), Transit Search Optimization (TSO)

#### EXTENDED ABSTRACT

##### Introduction

Protection plays a vital role in ensuring the operational continuity and reliability of power systems [1]. The growing electricity demand, integration of distributed generation units, and the widespread adoption of microgrids have rendered modern grids more complex, thus necessitating more adaptive and precise protection mechanisms [2]. Overcurrent relay coordination is a critical function that ensures selective and fast protection against faults in power systems. Improperly

coordinated relays may lead to false trips or failure to operate, jeopardizing both equipment and overall system integrity [3].

Overcurrent relays serve as the primary protection devices in distribution systems and act as backup protection in transmission networks. Coordination involves optimally setting the pickup current and time dial settings (TDS) to ensure appropriate relay operation. Traditional coordination techniques, largely based on manual trial-and-error, become computationally intensive as network complexity increases. Furthermore, they often fall into local minima and are limited by

fixed initial conditions. These shortcomings have motivated the use of metaheuristic optimization techniques, which, through multiple starting points and broader search capabilities, have shown promise in addressing the overcurrent relay coordination problem effectively [4].

The literature presents a wide range of metaheuristic approaches for overcurrent relay coordination, emphasizing both accurate modeling and optimal relay settings. For instance, in [3], a new objective function was proposed using Genetic Algorithm (GA), Slime Mould Algorithm (SMA), and Water Cycle Algorithm (WCA) to improve the coordination of primary and backup relays. In [5], Artificial Neural Networks (ANN) were integrated with a Modified LINKNET Algorithm for dynamic relay pairing in the IEEE 33-bus test system. Studies in [1] and [6] show that Particle Swarm Optimization (PSO) and Adaptive Modified Firefly Algorithm (AMFA) significantly enhance relay selectivity and response speed.

Several optimization methods have demonstrated successful applications in industrial and large-scale power networks. For instance, Modified PSO (MPSO) [7] and AMFA [8] consider inrush and motor-starting currents, improving coordination by reducing operating time by up to 41.63%. Nature-inspired methods such as the Artificial Hummingbird Algorithm (AHA) [9] and Cuckoo Search Algorithm (CSA) [10] have also shown their capacity to improve protection reliability and responsiveness. Learning-based algorithms like Teaching Learning-Based Optimization (TLBO) [11] have further demonstrated fast convergence compared to GA. Grasshopper Optimization Algorithm (GOA) has also been successfully applied in radial systems to improve coordination [13].

Despite these advances, the complexity of modern power systems and the integration of renewable energy resources have heightened the demand for more robust and flexible optimization strategies. Metaheuristic techniques such as PSO, GA, AHA, GOA, and CSA have proven effective in increasing speed and precision. Moreover, hybrid and AI-driven solutions are emerging as adaptable and scalable options for dynamic grids. In this context, this study simulates three-phase faults in an IEEE 33-bus radial distribution system and compares five metaheuristic algorithms: GA, Black Hole Algorithm (BHA), Smell Agent Optimization (SAO), League Championship Algorithm (LCA), and Transit Search Optimization (TSO), focusing on optimizing relay coordination performance.

## Materials and Methods

The coordination analysis in this study follows the standards IEEE C37.112, IEEE C37.230, and IEC 60255-151, which specify time-current characteristics for overcurrent protection relays. The inverse-time and definite-time curves used in this study are modeled accordingly. Coordination relies on accurately detecting fault currents and ensuring timely tripping actions to isolate the fault without unnecessary interruptions.

Relays are configured such that the one nearest to the fault trips first. Backup relays are triggered only if the primary relay fails. This sequential operation is governed by settings of TDS and pickup current (PS). Optimal coordination ensures:

- Selectivity: Only the faulted feeder is disconnected.
- Speed: Fast isolation prevents damage.
- Reliability: Consistent relay performance.
- Simplicity and Economy: Minimum hardware with maximum protection.

- Backup Protection: Secondary relays operate if primaries fail.

The five algorithms applied are described as follows:

*Genetic Algorithm (GA)*: An evolutionary optimization method based on natural selection, involving encoding, initial population, selection, crossover, and mutation steps [19–21].

*Black Hole Algorithm (BHA)*: Inspired by gravitational behavior, this method treats the best solution as a black hole attracting other candidate solutions [22].

*Smell Agent Optimization (SAO)*: A bio-inspired algorithm simulating sniffing, trailing, and random search behaviors [23]. It adaptively transitions among modes to balance exploration and exploitation.

*League Championship Algorithm (LCA)*: Modeled after sports leagues, solutions compete in iterative matches, with better performers advancing and weaker ones replaced [24, 25].

*Transit Search Optimization (TSO)*: Based on the detection of exoplanets through brightness dips in stars, this novel algorithm simulates planetary transit to identify optimal solutions [15, 26, 27, 28].

All algorithms aim to minimize total relay operating time using the same objective function and constraints: Coordination time interval (CTI), Operating time bounds, TDS and pickup current limits. Simulations were conducted under identical initial conditions, population sizes, and iterations using MATLAB on a high-performance computing setup.

## Results and Discussion

Simulation results reveal that TSO achieved the lowest total operating time at 4.53 s, delivering the highest optimization performance. LCA followed with 6.43 s, SAO with 7.88 s, BHA with 8.38 s, and GA with 8.44 s. These results demonstrate that TSO provides superior performance not only in small-scale systems (as shown in [15]) but also in complex, large-scale networks. TSO outperformed GA by 86.32%, BHA by 84.99%, SAO by 73.96%, and LCA by 41.95%. The fact that TSO and SAO are used for the first time in this context—and have yielded strong results—marks a significant contribution to the literature. LCA also stands out by striking a balance between solution quality and computational cost. Convergence behavior and solution stability were also evaluated. While GA and BHA offered simpler implementation, they produced lower-quality solutions and slower convergence. SAO proved more effective than these traditional methods. Visual comparisons via simulation graphs validated the relative efficiency of each algorithm. Overall, the results underscore the potential of TSO and SAO in relay coordination problems, supporting their applicability in real-world grid protection systems.

## Conclusion

This study provides a comparative analysis of five metaheuristic algorithms (GA, BHA, SAO, LCA, and TSO) for optimizing overcurrent relay coordination in a 33-bus radial distribution network. TSO demonstrated the best performance with the shortest relay operating time and highest optimization efficiency. SAO outperformed conventional algorithms like GA and BHA, while LCA offered a practical balance between speed and quality.

The study's key contributions include:

- First-time application of TSO and SAO to overcurrent relay coordination in a 33-bus distribution system
- Validation of TSO's previously reported success in a 3-bus system [15] on a more realistic test feeder

- Objective comparison of all algorithms under identical fault scenarios and constraint settings
- Use of the IEEE 33-bus system and graphical presentation of results to clearly highlight performance differences

Future research may explore hybrid models combining the strengths of these algorithms and incorporating artificial intelligence for adaptive, real-time relay coordination. Such approaches could support the development of robust, flexible, and intelligent protection strategies in evolving smart grid environments.

## 1. Giriş

Güç sistemlerinde koruma, enerjinin operasyonel sürekliliğini ve sistem güvenilirliğini sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir [1]. Artan enerji talebi, dağıtık üretim kaynaklarının şebekeye eklenmesi ve mikro şebekelerin yaygınlaşması, güç sistemlerinin giderek daha karmaşık hale gelmesine yol açmış ve koruma sistemlerinin daha hassas yapıya sahip olmasını zorunlu kılmıştır [2]. Aşırı akım röle koordinasyonu, güç sistemlerindeki arızalara karşı hızlı ve seçici bir koruma sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, doğru şekilde koordine edilmemiş röleler, hatalı açmalara (false trip) veya koruma hatalarına neden olabilir, bu durum da hem ekipman hem de sistem güvenliği açısından büyük riskler oluşturur [3].

Aşırı akım röleleri, dağıtım sistemlerinde birincil koruma, iletim sistemlerinde ise destek koruma olarak kullanılmaktadır. Aşırı akım rölelerinin koordinasyon süreci, eşik akım ayarı ve zaman çarpanı ayarı gibi kritik parametrelerin optimal olarak belirlenmesiyle yapılmaktadır. Geleneksel röle koordinasyon teknikleri, deneme yanılma tabanlı manuel ayarlamalara dayanmakta ve artan şebeke karmaşıklığıyla birlikte hesaplama açısından zaman alıcı hale gelmektedir. Ayrıca, klasik yöntemlerin yerel minimumda takılma ve tek bir başlangıç noktasına bağlı kalma gibi sınırlılıkları, araştırmacıları yerel minimumdan kaçınabilen ve çözüm arayışını geniş bir alana yayabilen metasezgisel algoritmaların kullanımına yönlendirmiştir. Bu algoritmalar, çoklu başlangıç noktalarıyla çözüm arayabildikleri için yerel minimuma saplanma problemini ortadan kaldırmakta ve bu nedenle aşırı akım röle koordinasyonu da dahil olmak üzere pek çok optimizasyon probleminde yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

Literatürde, aşırı akım röle koordinasyonu probleminin çözümüne yönelik çeşitli metasezgisel optimizasyon teknikleri geliştirilmiş ve bu alanda önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Özellikle, optimal röle ayarlarının belirlenmesi ve röle koordinasyon problemlerinin daha doğru şekilde modellenmesi üzerine yoğunlaşan araştırmalar dikkat çekmektedir. Örneğin, [3] çalışmasında, Genetik Algoritma (Genetic Algorithm - GA), Slime Modül Algoritması (Slime Mould Algorithm - SMA) ve Su Döngüsü Algoritması (Water Cycle Algorithm - WCA) kullanarak aşırı akım röle koordinasyonu için yeni bir amaç fonksiyonu geliştirmiş, birincil ve yedek röle koordinasyon problemini optimize ederek röle açma sürelerini iyileştirmiştir. Benzer şekilde, [5] çalışmasında, Modifiye Edilmiş LINKNET Algoritması (Modified LINKNET Algorithm) ile yapay sinir ağı (Artificial Neural Network - ANN) tabanlı optimizasyon uygulanarak röle eşleşmeleri dinamik olarak belirlenmiş ve IEEE 33-bus test sisteminde test edilmiştir. Optimizasyon algoritmalarının aşırı akım röle koordinasyonu üzerindeki etkileri de detaylı olarak incelenmiştir. [1] çalışmasında, Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO) ve Genetik Algoritma (Genetic Algorithm - GA) kullanılarak kontrol parametrelerinin röle seçiciliği ve işletme hızı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, PSO'nun röle çalışma süresini %15 oranında azalttığını ve GA'ya kıyasla daha hızlı ve verimli bir koruma sağladığını göstermiştir. Ayrıca, [6] çalışmasında, Uyarlanabilir Modifiyeli Ateşböceği Algoritması (Adaptive Modified Firefly Algorithm - AMFA) kullanılarak modern endüstriyel dağıtım sistemlerinde

aşırı akım röle koordinasyonunu optimize etmiş ve AMFA'nın IEC zaman-akım karakteristik eğrilerine kıyasla daha güvenilir bir koruma sağladığını ve röle koordinasyonunu iyileştirdiğini göstermiştir. Endüstriyel sistemler ve büyük ölçekli şebekeler için optimizasyon çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. [7] çalışmasında, Modifiye Edilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu (Modified Particle Swarm Optimization - MPSO) algoritmasını kullanarak, TDS ve CTI ayarlarını optimize etmiş ve geleneksel PSO'ya kıyasla daha hızlı yakınsama sağladığını göstermiştir. Benzer şekilde, [8] çalışması, radyal şebekelerde Uyarlanabilir Modifiye Ateşböceği Algoritması (Adaptive Modified Firefly Algorithm - AMFA) kullanarak transformatör ani akımları ve motor başlatma akımlarını dikkate almış ve röle işletme süresini %41,63 oranında azalttığını ve böylece koruma sisteminin daha hızlı ve güvenilir çalışma sağladığını ortaya koymuştur. Biyolojik esinli optimizasyon algoritmaları da röle koordinasyonu problemlerinin çözümünde etkin bir şekilde uygulanmıştır. [9] çalışmasında, Yapay Sinekkuşu Algoritması (Artificial Hummingbird Algorithm - AHA) ile IEEE 8-bara ve 9-bara test sistemlerinde röle çalışma süresini minimize ederek koordinasyon doğruluğunu artırmıştır. Bunun yanı sıra, [10] çalışması, Guguk Kuşu Arama Algoritması (Cuckoo Search Algorithm - CSA) kullanarak aşırı akım röle zaman ayarlarını optimize etmeye odaklanmıştır. Yapılan analizler, CSA'nın transformatör ani akımları ve motor başlatma akımlarını dikkate alarak koruma sisteminin stabilitesini artırdığını göstermektedir. Bu sonuçlar, biyolojik esinli algoritmaların röle koordinasyonu süreçlerinde daha hassas ve güvenilir çözümler sunabileceğini ortaya koymaktadır. Öğrenme tabanlı optimizasyon yaklaşımları da aşırı akım röle koordinasyonu problemlerinin çözümünde etkili bir alternatif olarak literatürde ele alınmıştır. [11] çalışmasında, Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Teaching Learning Based Optimization - TLBO) algoritmasını kullanarak IEEE 3-baralı dağıtım sisteminde röle koordinasyonu optimize edilmiştir. Çalışma sonuçları, TLBO'nun, Genetik Algoritma (GA) ile karşılaştırıldığında daha hızlı yakınsama sağladığını ve koordinasyon sürecini daha verimli hale getirdiğini göstermektedir. Radyal sistemler için yapılan çalışmalarda, [12], Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO) algoritmasını kullanarak röle zaman ayarlarını optimize etmiş ve IEEE 5-bara test sisteminde PSO'nun daha etkili bir koordinasyon sağladığını göstermiştir. [13] çalışmasında, Çekirge Optimizasyonu Algoritması (Grasshopper Optimization Algorithm - GOA) kullanarak IEEE 5-bara test sisteminde röle koordinasyonu iyileştirilmiştir. Analizler, GOA'nın röle işletme süresini azaltarak koordinasyon zaman aralığını koruduğunu ve sistemin daha güvenilir bir şekilde çalışmasına katkı sağladığını göstermektedir.

Literatürde, aşırı akım röle koordinasyonunun iyileştirilmesine yönelik farklı optimizasyon algoritmaları ile önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak, günümüz güç sistemlerinin karmaşık yapıları ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, daha güçlü ve esnek optimizasyon yaklaşımlarına olan ihtiyacı artırmaktadır. Metasezgisel algoritmalar, özellikle PSO, GA, AHA, GOA ve CSA gibi teknikler, röle koordinasyonunun hızını ve doğruluğunu artırarak koruma sistemlerinin daha güvenilir ve etkin çalışmasını sağlamaktadır. Buna ek olarak, hibrit optimizasyon teknikleri ve yapay zeka tabanlı yöntemler,

dinamik şebeke koşullarına uyum sağlayabilen daha esnek ve verimli çözümler sunmaktadır. Gelecekte, farklı metasezgisel algoritmaların uygulanması, şebeke güvenilirliğini artırarak röle koruma stratejilerinin daha verimli hale gelmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu nedenle, bu çalışmada 33 baralı radyal bir dağıtım şebekesi üzerinde üç fazlı kısa devre arızaları senaryolaştırılmış; önce yük akışı ve kısa devre analizleri gerçekleştirilmiş, ardından arıza sonrası oluşan gerilim ve akım değişimleri esas alınarak aşırı akım röle koordinasyonu Genetik Algoritma (GA), Kara Delik Algoritması (BHA), Koku Ajanı Optimizasyonu (SAO), Lig Şampiyonu Algoritması (LCA) ve Geçiş Arama Optimizasyonu (TSO) kullanılarak optimize edilmiştir. Bu çalışma, yazarların aynı 33 baralı test sistemi üzerinde GA, BHA ve LCA algoritmalarını inceledikleri önceki bildirimlerinin [14] kapsamlı biçimde genişletilmiş bir devamı niteliğinde olup, söz konusu algoritmalara ek olarak TSO ve SAO'nun da ortak bir çerçevede karşılaştırmalı analizine imkân sağlamaktadır. Bu makalenin literatüre katkıları ise aşağıda maddeler hâlinde özetlenmiştir:

- TSO ve SAO algoritmaları ilk kez 33 baralı bir güç sisteminde aşırı akım röle koordinasyonunda kullanılmıştır.
- TSO algoritmasının 3 baralı sistemdeki başarısı [15], 33 baralı sistemde de doğrulanmıştır.
- TSO, en düşük toplam işletme süresi ile en yüksek optimizasyon performansı göstermiştir.
- SAO, GA ve BHA gibi geleneksel algoritmalara kıyasla daha üstün sonuçlar üretmiştir.
- LCA, çözüm kalitesi ile hesaplama süresi arasında dengeli bir performans ortaya koymuştur.
- Tüm algoritmalar, aynı koşullarda değerlendirilerek nesnel bir karşılaştırma yapılmıştır.
- Gerçekçi bir yapı olan 33 baralı test sistemi ile uygulama geçerliliği artırılmıştır.
- Yük akışı, kısa devre ve röle koordinasyonu süreçleri bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır.
- Sonuçlar grafiklerle desteklenmiş, algoritmalar arası farklar görsel olarak vurgulanmıştır.
- Yeni nesil algoritmaların klasik koruma problemlerine uygulanabilirliği gösterilmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Aşırı Akım Röle Koordinasyonu

Bu çalışmada gerçekleştirilen röle koordinasyonu analizleri; IEEE Std C37.112 (Zaman-Akım Röle Karakteristikleri), IEEE Std C37.230 (Dağıtım Sistemlerinde Koruma Röleleri Uygulamaları) ve IEC 60255-151 (Koruma Röleleri ve Donanımları için Uluslararası Standart) esas alınarak yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan ters zamanlı karakteristik eğriler (standart ters, çok ters, aşırı ters ve sabit zamanlı) bu standartlara uygun şekilde modellenmiş ve değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, dağıtım sistemlerine özgü röle koordinasyonu gerçekleştirilmiş ve zaman-akım karakteristiklerine dayalı optimizasyon yapılmıştır.

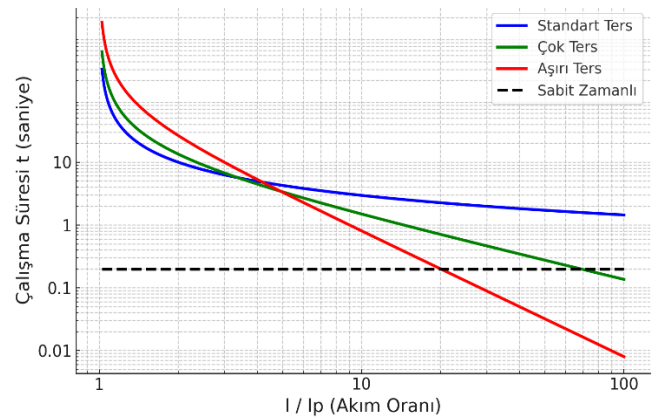
Koruma rölelerinin etkin çalışabilmesi için, özellikle arıza anında sistemde oluşan yüksek akımların doğru algılanması ve uygun süre içerisinde müdahale edilmesi büyük önem taşır. Güç sisteminde bir arıza meydana geldiğinde, bu arızadan kaynaklanan akım genellikle nominal işletme akımından daha yüksek olur. Aşırı akım röleleri, söz konusu yüksek akımı algılayarak kesiciye açma sinyali gönderir ve böylece sistem ekipmanlarının zarar görmesini önler. Rölenin çalışma süresi ile üzerinden geçen akım arasındaki ilişki, "akım-zaman karakteristiği" olarak tanımlanır. Bu karakteristiklere göre röleler, ters zamanlı (inverse-time) veya sabit zamanlı (definite-time) modda ayarlanabilir. Uygulamada, fazlar arası arızalarda

genellikle ters zamanlı mod, faz-toprak arızalarında ise sabit zamanlı mod tercih edilmektedir. Ters zamanlı modda, akım eşiği aşıldıkça rölenin açma süresi kısalmır; bu durum, güç sisteminde meydana gelen ciddi arızaların daha hızlı bir şekilde algılanarak sistemden izole edilmesini sağlar. Şekil 1'de, IEC 60255 standardına göre belirlenen ters zamanlı ve sabit zamanlı akım-zaman karakteristik eğrileri yer almakta olup; bu karakteristiklere ait katsayılar ise Tablo 1'de verilmiştir [16, 17].

**Tablo 1.** ANSI/IEEE rölesi için eğri türlerine ait katsayılar.

**Table 1.** Constants for ANSI/IEEE relay curve shapes.

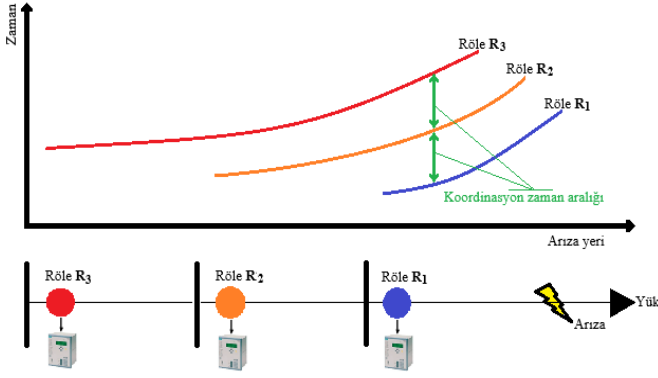
Eğri Tipi	Standart	A	B	P
Standart Ters	ANSI/IEEE	0.05	0.114	0.02
Çok Ters	ANSI/IEEE	19.61	0.491	2.00
Aşırı Ters	ANSI/IEEE	28.20	0.122	2.00



**Şekil 1.** IEC 60255 Zaman-Akım karakteristik eğrileri.

**Figure 1.** IEC 60255 Time-Current characteristics.

Şekil 2'de, radyal yapıdaki bir dağıtım sisteminde aşırı akım rölelerinin koordinasyon prensibi gösterilmektedir. Bu tür sistemlerde, fider boyunca konumlanan röleler, arıza durumunda aynı arıza akımını algılar ve bu durum, koruma sisteminin seçiciliğini doğrudan etkiler. Seçici korumanın sağlanabilmesi için, arızaya en yakın konumda bulunan rölenin (Röle R<sub>1</sub>) öncelikli olarak kesiciye açma sinyali göndermesi; kaynağa daha yakın konumda bulunan rölelerin ise belirli bir gecikmeyle devreye girmesi gerekmektedir. Rölelerin bu şekilde ardışık ve gecikmeli çalışmasını sağlayan ayarlama süreci röle koordinasyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu doğrultuda, röleler ters zamanlı akım-zaman karakteristiklerine göre yapılandırılmakta; Röle R<sub>1</sub> en kısa sürede, Röle R<sub>2</sub> ve Röle R<sub>3</sub> ise artan gecikmelerle çalışacak biçimde ayarlanmaktadır. Röle R<sub>1</sub>'in devreye girmemesi durumunda, sistem güvenliğinin sürdürülebilmesi için sırasıyla Röle R<sub>2</sub> ve ardından Röle R<sub>3</sub> arızayı tespit ederek açma işlemini gerçekleştirir. Bu yapı, koruma sistemlerinde hem seçiciliği hem de operasyonel güvenilirliği artırmak amacıyla uygulanmaktadır.



**Şekil 2.** Radyal dağıtım şebekesinde röle koordinasyonu.

**Figure 2.** Relay coordination in a radial distribution system.

Röle koordinasyonu, özellikle çoklu rölelerin yer aldığı dağıtım sistemlerinde, her bir rölenin minimum sürede ve seçici bir şekilde çalışmasını sağlayacak şekilde ayarlanmasını gerektirir. Optimal röle koordinasyonu, aşağıdaki teknik gereksinimleri karşılamalıdır [17,18]:

- **Seçicilik (Selectivity):** Güç sistemlerinde seçicilik, bir arıza durumunda yalnızca arızalı fiderin devreden çıkarılmasını sağlarken, diğer fiderlerin enerji beslemesinin devam etmesini sağlayan bir koruma prensibidir. Bu amaçla, koruma rölelerinin açma süreleri, arızaya en yakın devre kesiciden en uzağa doğru artan bir sırayla ayarlanmalıdır. Böylece, arızanın bulunduğu fider hızlıca şebekeden izole edilir ve sağlam fiderlerin kesintisiz çalışması sağlanarak enerji sürekliliği korunur.
- **Hız (Speed):** Arızanın tespiti ve izolasyonu, sistemdeki diğer elemanların arıza akımı altında kalmasını önleyecek şekilde mümkün olduğunca hızlı olmalıdır.
- **Güvenilirlik (Reliability):** Koruma sisteminin hatasız ve beklenen şekilde çalışması, yanlış açmaların önüne geçilmesi gerekmektedir.
- **Basitlik:** Koruma hedeflerine ulaşmak için minimum koruyucu donanım ve ilgili devre elemanı kullanımı demektir.
- **Ekonomi (Economy):** Güç sistemlerinde koruma maliyetlerinin en aza indirilerek, en yüksek güvenilirlik ve etkinlikte koruma sağlanması prensibidir. Gereksiz ekipman kullanımını önleyerek, minimum yatırım ile maksimum koruma elde edilmesi hedeflenir.
- **Yedek Koruma (Backup Protection):** Güç sisteminde bir arıza meydana geldiğinde, öncelikli olarak arızaya en yakın koruma rölesinin devre kesiciyi açtırması beklenir. Ancak, eğer bu röle herhangi bir nedenle açma yapamazsa, aynı koruma fonksiyonuna sahip başka bir röle devreye girerek ilgili devre kesiciyi açtırmalıdır. Böylece, arızalı fider izole edilir ve sistemin güvenliği ile sürekliliği sağlanmış olur.

## 2.2. Kullanılan Algoritmalar

Bu bölümde, GA ve LCA'nın teorik temelleri, çalışma prensipleri ele alınmıştır.

### A. Genetik Algoritma

Genetik Algoritma (Genetic Algorithm - GA), evrimsel hesaplama yöntemleri arasında yer alan, optimizasyon problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan bir meta-sezgisel algoritmadır. Doğal evrim sürecinden ilham alarak geliştirilmiş olup, doğal seçim ve genetik çaprazlama prensiplerine dayanmaktadır. İlk olarak Holland tarafından 1960'larda önerilmiş ve Goldberg tarafından 1989'da detaylı olarak incelenmiştir [19]. GA, "en güçlü olanın hayatta kalması"

prensibine dayanarak, çözüm uzayında en uygun bireyleri seçerek optimal çözüme ulaşmayı hedefler. GA'nın temel çalışma prensibi, başlangıç popülasyonu ile rastgele çözümler üretmek, uygunluk fonksiyonuna (fitness function) göre bireyleri değerlendirmek ve uygun bireylerin yeni nesiller oluşturmasını sağlamaktır. Seçim (selection), çaprazlama (crossover) ve mutasyon (mutation) operatörleri kullanılarak yeni bireyler üretilir ve popülasyon her nesilde evrimleşerek daha iyi çözümler sunar [20]. Genetik algoritmanın optimizasyon süreci beş ana bileşenden oluşmaktadır [21]:

- **Kodlama (Encoding):** Çözüm değişkenlerinin genetik formatta temsil edilmesini sağlar. Genler, kromozomların yapı taşları olup, genellikle problem değişkenlerini temsil eder.
- **Başlangıç Popülasyonu (Initial Population):** İlk bireyler rastgele veya belirli kriterlere göre üretilir. Popülasyon büyüklüğü, çözüm hassasiyetini ve hesaplama süresini doğrudan etkiler.
- **Seçim (Selection):** Yüksek uygunluk değerine sahip bireyler, çaprazlama işlemi için ebeveyn olarak seçilir. Seçim, daha iyi çözümler üretme sürecinin temelidir.
- **Çaprazlama (Crossover):** İki ebeveyn bireyin genetik bilgileri birleştirilerek yeni bireyler oluşturulur. Bu işlem, arama uzayında yeni çözümler üreterek çeşitliliği artırır.
- **Mutasyon (Mutation):** Yeni bireylerin bazı genleri rastgele değiştirilerek çözümlerin çeşitliliği sağlanır ve lokal minimumlara sıkışma önlenir.

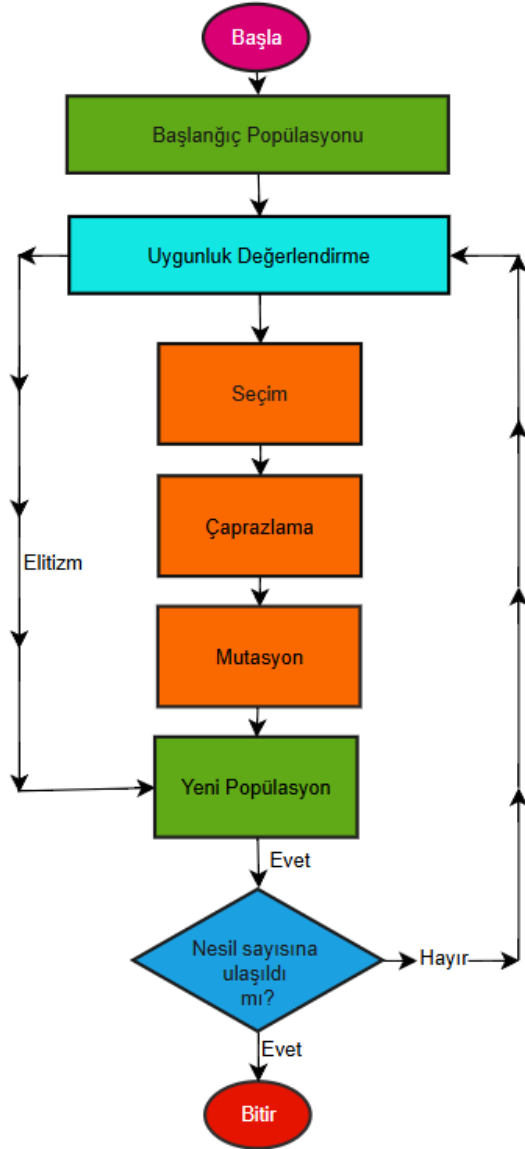
GA'nın performansı, maksimum nesil sayısı, uygunluk fonksiyonu değeri ve iyileşme sürecindeki durma kriterleri gibi faktörlere bağlıdır. Algoritma, belirlenen nesil sayısına ulaştığında, amaç fonksiyonunda ilerleme durduğunda veya önceden tanımlanan uygunluk seviyesine ulaştığında sonlandırılır. Şekil 3'te GA'nın akış şeması verilmiştir. Bu yapı, karmaşık optimizasyon problemlerinde etkili çözümler sunarak aşırı akım röle koordinasyonu gibi mühendislik uygulamalarında çözüm uzayında hızlı keşif yapabilmesi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

### B. Kara Delik Algoritması (BHA)

BHA, kara deliklerin kütleçekimsel davranışını temel alan doğadan esinlenilmiş bir optimizasyon tekniğidir. BHA'da her aday çözüm bir yıldız olarak ele alınırken, en iyi çözüm kara delik olarak temsil edilir. Diğer çözümler, yörüngesel hareketi taklit edecek şekilde kara deliğe doğru çekilir. BHA'nın temel aşamaları aşağıda özetlenmiştir [22].

- **Başlangıç Popülasyonu:** Aday çözümlerin rastgele oluşturulması;
- **Kara Delik Seçimi:** Mevcut en iyi çözümün kara delik olarak belirlenmesi;
- **Yörüngesel Hareket:** Diğer çözümlerin kara deliğe doğru çekilmesi;
- **Soğurma ve Yeniden Üretim:** Kara delik tarafından "soğrulan" yıldızların, çeşitliliği korumak amacıyla yeni rastgele çözümlerle değiştirilmesi;
- **İterasyon:** Güncellenmiş uygunluk değerleriyle sürecin tekrarlanması.

Basit yapısı ve güçlü küresel arama yeteneği sayesinde BHA, geniş çözüm uzaylarını etkin biçimde tarayarak yerel optimumlara takılmadan çalışabilmektedir. Şekil 4'de BHA'nın akış şeması verilmiştir. Bu algoritma, röle koordinasyonu problemleri de dahil olmak üzere çeşitli mühendislik optimizasyon uygulamalarında umut verici sonuçlar ortaya koymuştur.



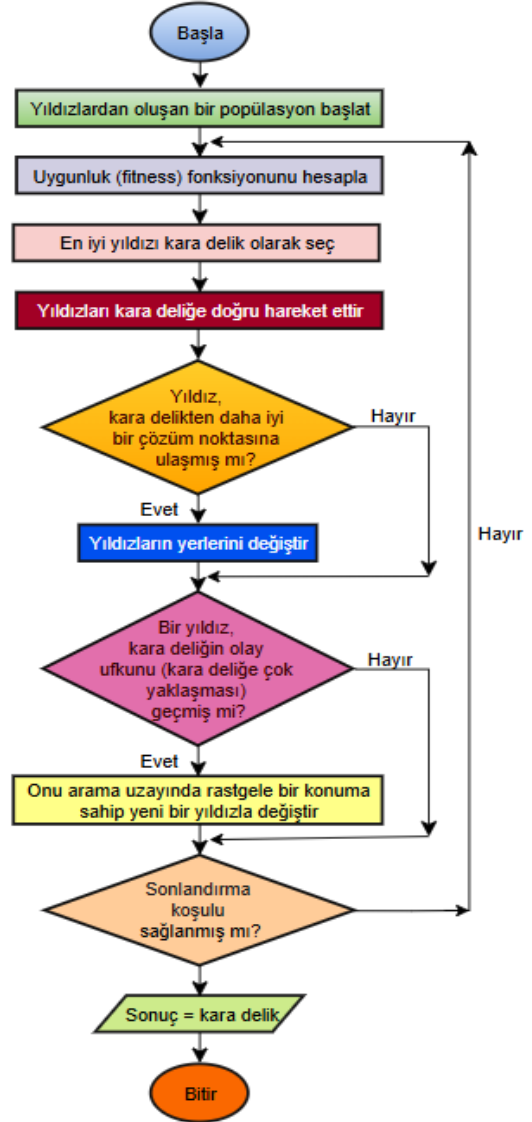
Şekil 3. GA akış şeması.

Figure 3. GA flowchart

## C. Koku Ajanı Optimizasyonu (SAO)

Koku Ajanı Optimizasyonu (SAO), yeni nesil bir metasezgisel algoritma olup, bir kokuyu yayan kaynak ile bu kokuyu algılayan ajan arasındaki etkileşim ilişkisine dayanmaktadır. Algoritma, üç farklı hareket modu üzerinden çalışır: koklama (sniffing), İz sürme (takip) (trailing) ve rastgelelik (random). Bu modlar, doğadaki canlıların kokuya dayalı arama davranışlarını modellemektedir. Şekil 5'te, SAO algoritmasının genel akış şeması sunulmuştur [23].

- Koklama Modu (Sniffing Mode): Koku moleküllerinin kaynak noktadan ajana doğru difüzyonunu temsil eder. Ajan, bu kokuyu algılayarak kaynağın yönünü tespit etmeye çalışır.
- İz sürme (takip) Modu (Trailing Mode): Ajanın, algıladığı koku izini takip ederek doğrudan koku kaynağına yönelmesini simüle eder. Bu, algoritmanın daha kararlı bir şekilde küresel çözüme ilerlemesini sağlar.
- Rastgelelik Modu (Random Mode): Ajanın yerel minimumlarda sıkışmasını önlemek amacıyla, çözümler



Şekil 4. BHA akış şeması.

Figure 4. BHA flowchart.

üzerinde rastgele aramalar yapılmasını sağlayan stratejidir.

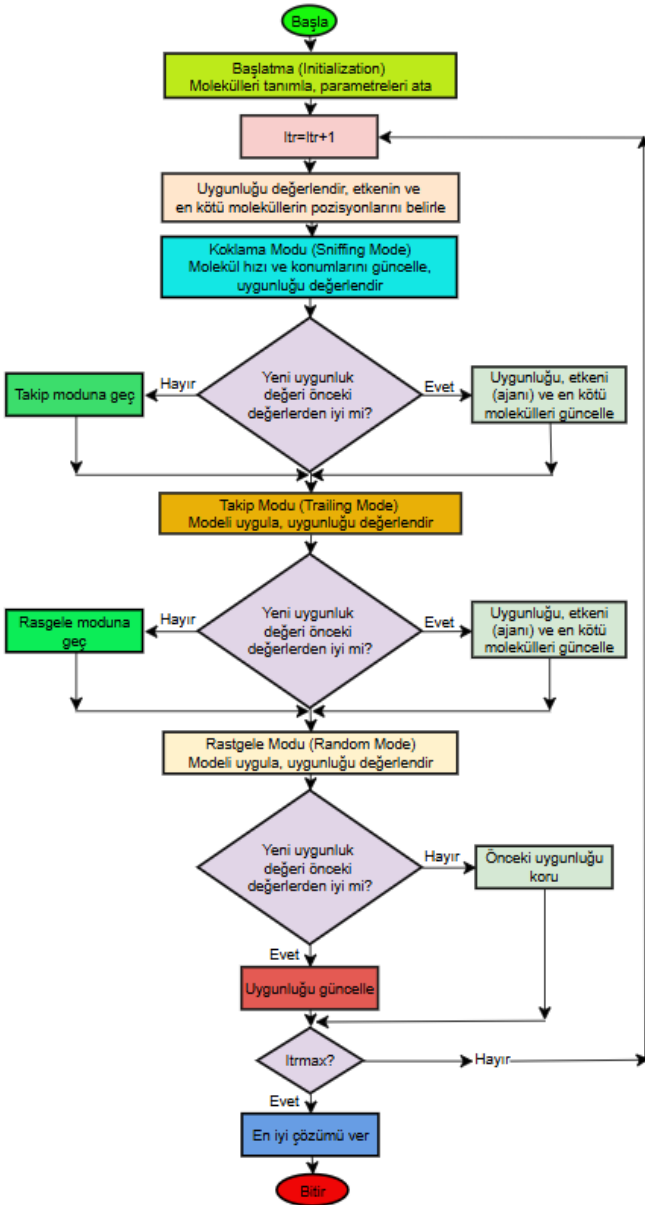
Bu modlar arasında geçiş, arama süreci boyunca adaptif bir şekilde gerçekleştirilir. SAO algoritması, hem keşif (exploration) hem de sömürü (exploitation) süreçlerini dengeli biçimde yürütür. Böylece çözüm uzayında kapsamlı bir arama yapabilir ve yerel minimumlara takılmadan küresel en iyi çözümü bulma olasılığı artırılır.

## D. Lig Şampiyonu Algoritması

LCA, spor liglerinde gerçekleşen rekabet süreçlerinden esinlenerek geliştirilmiş bir optimizasyon yöntemidir. Bu algoritma, takım bazlı yarışmaların yapısını taklit ederek çözümlerin iteratif olarak geliştirilmesini sağlar. LCA'nın temel mekanizması, çözümleri takımlar olarak temsil etmek, belirli bir sezona ve fikstüre göre maçlar düzenlemek ve uygunluk (fitness) değerlerine göre en iyi çözümleri belirlemektir. Kazanan çözümler üst sıralara yükselirken, düşük performanslı olanlar elenir veya yeniden düzenlenir. Algoritmanın rekabetçi doğası, yerel maksimumlara sıkışmayı önleyerek daha iyi çözümler elde edilmesini sağlar [24]. LCA'nın optimizasyon süreçleri şu

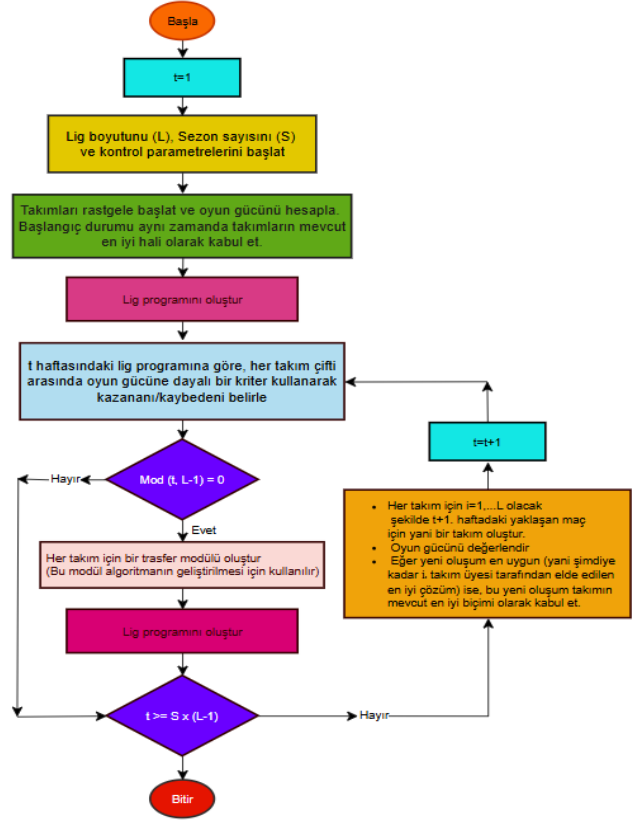
adımlardan oluşmaktadır. Şekil 6'da LCA genel akış şeması verilmiştir [25]:

- Takımların Oluşturulması: Aday çözümler, birer takım olarak temsil edilir.
- Lig Maçları ve Skorlandırma: Çözümler arasında rekabet süreçleri simüle edilir ve her bireyin uygunluk değeri hesaplanır.
- Eleme ve Geliştirme: Daha yüksek performans gösteren çözümler bir sonraki tura geçerken, düşük performanslı olanlar elenir veya yeniden düzenlenir.
- Transfer Mekanizması: En iyi çözümlerden türetilen yeni bireyler popülasyona eklenerek, genel uygunluk artırılır.
- Tekrarlama ve Yakınsama: Lig süreçleri belirlenen iterasyon sayısından sonra tekrar edilir ve en iyi çözüm belirlenir.



Şekil 5. SAO akış şeması.

Figure 5. SAO flowchart.



Şekil 6. LCA akış şeması.

Figure 6. LCA flowchart.

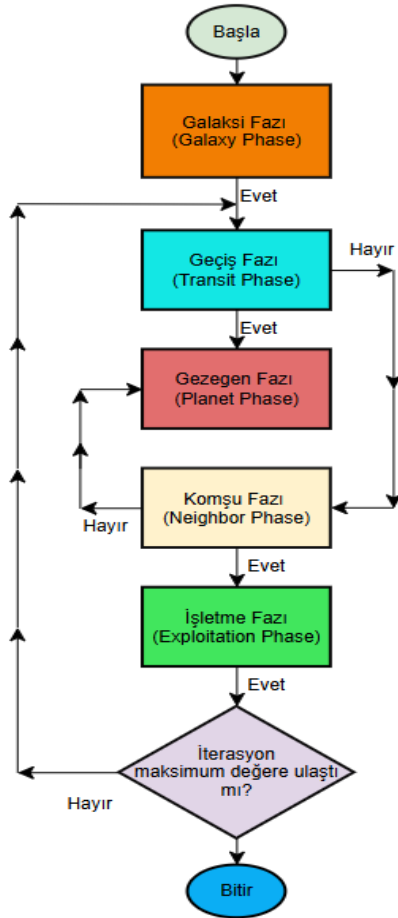
### E. Geçiş Arama Optimizasyonu (TSO)

(TSO), yeni nesil bir metasezgisel optimizasyon algoritması olup, ötegezegen tespitinde yaygın olarak kullanılan transit yönteminden esinlenerek geliştirilmiştir. Bu algoritma, bir yıldız parlaklığında meydana gelen geçici düşüşleri gözlemleyerek, yıldız önünden geçen bir gezegenin varlığını tespit etme prensibini, çözüm uzayındaki en iyi çözümleri bulmak amacıyla metaforik olarak kullanır.

TSO algoritması, her bir aday çözümü bir "gezegen" ve çözüm uzayını da bir "parlaklık eğrisi" olarak modeller. Çözümün uygunluğu, bu parlaklık eğrisinde yarattığı geçici düşüş (transit etkisi) ile temsil edilir. Bu yaklaşım sayesinde, algoritma çözüm uzayında en belirgin ve etkili değişimi oluşturan çözümleri seçerek küresel optimuma ulaşmayı hedefler. Şekil 7'de TSO algoritmasının genel akış şeması verilmiştir [15, 26, 27, 28].

- Transit Olayı Simülasyonu (Transit Simulation): Aday çözümler, yıldız önünden geçen bir gezegenin sebep olduğu parlaklık düşüşlerini taklit eden yapılar olarak değerlendirilir. Her bir çözüm, uygunluk fonksiyonu üzerinden değerlendirilir ve en büyük etkiye sahip olanlar ön plana çıkarılır.
- Uygunluk Değerlendirmesi (Fitness Evaluation): Aday çözümlerin her biri, oluşturduğu simüle edilmiş "parlaklık düşüşü"ne göre değerlendirilir. Bu değer, çözümün problem uzayındaki etkinliğini yansıtır. Daha büyük düşüşe sebep olan çözümler, daha yüksek uygunluk değerine sahip olarak kabul edilir.
- Çözüm Güncelleme ve Popülasyon Evrimi (Solution Update and Evolution): En uygun çözümler seçilerek yeni nesil adaylar oluşturulur. Bu işlem sırasında varyasyon, yeniden kombinasyon ve adaptif arama stratejileri uygulanır.

Böylece hem çözüm kalitesi artar hem de arama uzayında çeşitlilik korunur.



Şekil 7. TSO akış şeması.

Figure 7. TSO flowchart.

### 2.3. Optimizasyon Modeli ve Kısıtları

Bu bölümde Genetik Algoritma (GA) ve Lig Şampiyonu Algoritma (LCA)'nın aşırı akım röle koordinasyonu optimizasyonu için nasıl uygulandığını, kullanılan matematiksel modellemeyi ve kısıtlar verilmiştir [16].

#### A. Optimizasyon Probleminin Tanımı

Aşırı akım röle koordinasyonu, TDS ve PS ( $I_{Pickup}$ ) değerlerinin optimize edilmesiyle, sistemin selektivite ve hız kriterlerini sağlayacak şekilde çalışmasını hedefleyen bir optimizasyon problemidir. Burada amaç, röle açma sürelerinin minimum seviyede tutulması ve koordinasyon hatalarının önlenmesidir. Bu çalışmada amaç fonksiyonu (Objective Function, OF) denklem (1) aracılığıyla şu şekilde tanımlanmıştır:

$$OF = \sum_{i,k} T_{i,k} \cdot W_{i,k} \quad (1)$$

$n$ : Sistemdeki toplam röle sayısını,

$W_i$ : Ağırlık katsayısını,

$T_{i,k}$ :  $i$  noktasında meydana gelen faz arızası durumunda  $i$  rölesinin çalışma süresi denklem (2)'de görüldüğü gibi ifade edilir.

$$T_{i,k} = TDS_{i,k} \cdot x \frac{A}{\left(\frac{I_F}{I_{Pickup}}\right)^P - 1} + B \quad (2)$$

$I_F$ : Arıza akımının

büyükliğini,

$TDS_i$ :  $i$  rölesinin zaman çarpan ayarını,

$PS(I_{Pickup})$ : Aşırı akım rölesinin eşik akım ayarını ifade eder.

#### B. Kısıtlar

Optimizasyon sürecinde koordinasyonun korunması ve güvenilir bir koruma sağlanması için bazı kısıtlar tanımlanmıştır:

##### • Koordinasyon Kısıtlaması (Coordination Constraint)

İki ardışık röle arasındaki koordinasyon süresi (CTI - Coordination Time Interval) denklem (3)'te verildiği gibi olmalıdır:

$$T_{(i,k)b} - T_{(j,k)p} \geq CTI \quad (3)$$

$T_{(i,k)b}$ : Yedek (backup) rölenin rölenin çalışma süresi,

$T_{(i,k)p}$ : Birincil (primary) rölenin çalışma süresini gösterir.

Bu kısıt, yedek rölenin ana röleden önce açılmasını engeller ve rölelerin doğru sırayla çalışmasını sağlar.

##### • Açma Süresi Kısıtı (Operating Time Constraint)

Röle açma süresi, standart aşırı akım karakteristiklerine bağlı olarak denklem (4)'de verildiği aralıklarda olmalıdır:

$$T_{i(\min)} \leq T_i \leq T_{i(\max)} \quad (4)$$

Bu kısıt, rölelerin çok geç veya çok erken açılmasını önlemek için uygulanır.

##### • Zaman Çarpan Ayarı Kısıtı (TDS Constraint)

TDS, rölenin açma süresini belirleyen kritik bir parametredir ve denklem (5)'te verilen sınırlar içinde olmalıdır:

$$TDS_{(i)\min} \leq TDS_{(i)} \leq TDS_{(i)\max} \quad (5)$$

##### • Eşik Akım Ayarı Kısıtı (PS Constraint)

Pick-up akımı, rölenin hangi seviyede tetikleneceğini belirler ve denklem (6)'da verildiği şekilde olmalıdır:

$$I_{Pickup(i)\min} \leq I_{Pickup(i)} \leq I_{Pickup(i)\max} \quad (6)$$

Bu kısıt, rölenin hassasiyetini ve koruma kapsamını belirlemek için uygulanır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, 33 baralı bir radyal dağıtım sistemi üzerinde aşırı akım röle koordinasyonu probleminin çözümüne yönelik çeşitli metasezgisel algoritmaların performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Simülasyonlar MATLAB ortamında gerçekleştirilmiş olup, IEEE 33-baralı test sistemi referans alınmıştır.

Analiz sürecinde öncelikle sistemin yük akışı ve kısa devre analizleri yapılmış, arıza sonrası oluşan gerilim ve akım değişimlerine bağlı olarak röle koordinasyonu için gerekli giriş

parametreleri belirlenmiştir. Her bir algoritma için eşit başlangıç koşulları, popülasyon büyüklüğü ve iterasyon sayısı kullanılarak adil bir karşılaştırma zemini oluşturulmuştur. Tüm simülasyonlar, Intel(R) Core(TM) i7-6700 işlemci (3.40 GHz), 24 GB RAM ve 64 bit mimaride çalışan Windows 11 Pro (sürüm 24H2) işletim sistemine sahip bir bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş; böylece yüksek performanslı ve istikrarlı bir analiz altyapısı sağlanmıştır.

Çalışmada incelenen algoritmalar; Genetik Algoritma (GA), Kara Delik Algoritması (BHA), Koku Ajanı Optimizasyonu (SAO), Lig Şampiyonu Algoritması (LCA) ve Geçiş Arama Optimizasyonu (TSO) şeklindedir. Şekil 8'de sistemin tek hat şeması, Tablo 2'de algoritmalara ait parametreler ve röle ayar aralıkları yer almaktadır.

Şekil 9'da, her bir algoritmanın optimize ettiği rölelerin toplam işletme süreleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sonuçlara göre, TSO algoritması 4.53 s ile en düşük toplam işletme süresini sağlayarak en yüksek optimizasyon başarısını göstermiştir. Bunu sırasıyla LCA (6.43s), SAO (7.88 s), (BHA (8.38 s) ve GA (8.44 s) algoritmaları takip etmiştir. Elde edilen bu veriler, TSO'nun yalnızca küçük ölçekli sistemlerde değil, daha büyük ve karmaşık yapılarda da etkinliğini sürdürdüğünü ortaya koymaktadır. Öte yandan SAO'nun, geleneksel yöntemlere kıyasla daha başarılı sonuçlar üretmesi dikkat çekicidir.

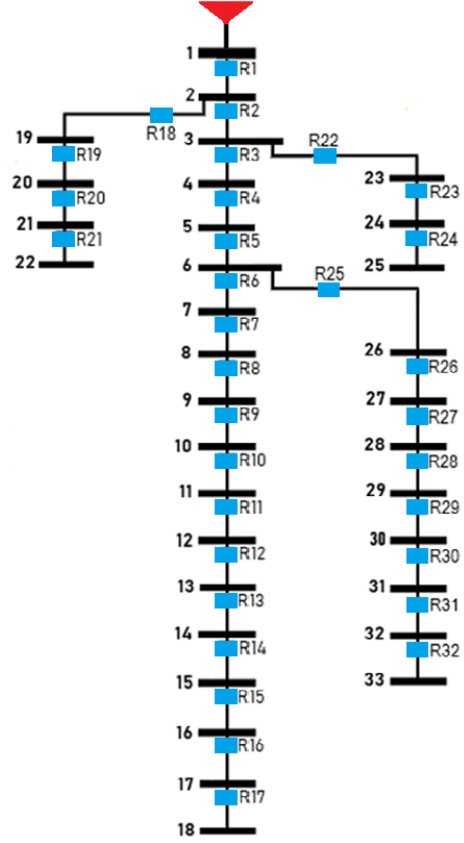
Algoritmalar; yalnızca çözüm kalitesi değil, aynı zamanda yakınsama davranışı, hesaplama süresi ve sonuç kararlılığı gibi kriterler yönünden de değerlendirilmiştir. LCA, çözüm kalitesi ile işlem maliyeti arasında denge sağlarken; GA ve BHA'nın daha az parametre gereksinimiyle nispeten daha stabil ancak çözüm kalitesi düşük sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir.

Genel olarak elde edilen bulgular, TSO ve SAO algoritmalarının aşırı akım röle koordinasyonu gibi kritik öneme sahip koruma problemleri için etkili, uygulanabilir ve literatüre değer katan alternatifler sunduğunu göstermektedir. Çalışma, farklı metasezgisel algoritmaların aynı test sistemi üzerinde eşit koşullar altında değerlendirilmesi açısından karşılaştırmalı bir analiz sunmakta ve bu yönüyle literatürdeki mevcut araştırmalara anlamlı bir katkı sağlamaktadır.

**Tablo 2.** Simülasyon parametreleri.

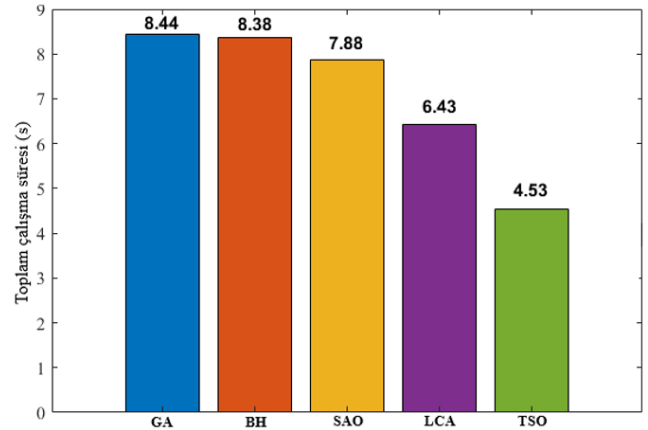
**Table 2.** Simulation parameters.

Parametreler	Değerler
Toplam bara sayısı	33
Toplam röle sayısı	32
Gerilim seviyesi	12.66 kV
CTI	0.05
TDS aralığı	0.05-1.1
$I_{Pickup}$ aralığı	10-300
Eğri türü	A=0.05;B=0.114;P=0.02
Maksimum iterasyon sayısı	200
Popülasyon/Takım sayısı	6



**Şekil 8.** IEEE 33 Baralı şebekenin tek hat şeması.

**Figure 8.** Single line diagram of the IEEE 33-bus system.



**Şekil 9.** Algoritmalara göre rölelerin toplam çalışma süresi.

**Figure 9.** Total operating time of relays according to the algorithms.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 33 baralı bir radyal dağıtım sistemi üzerinde aşırı akım röle koordinasyonu probleminin çözümüne yönelik olarak beş farklı metasezgisel optimizasyon algoritmasının (GA, BHA, SAO, LCA ve TSO) performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Simülasyonlar MATLAB ortamında yürütülmüş, analizlerde IEEE 33-bara test sistemi referans alınmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, en düşük toplam röle işletme süresi 4.53 s ile TSO algoritması tarafından elde edilmiştir. Bu değer, çalışma kapsamında ulaşılan en yüksek optimizasyon başarımını temsil etmektedir. Diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında, TSO;

GA'ya göre %86.32, BH'ye göre %84.99, SAO'ya göre %73.96 ve LCA'ya göre %41.95 oranında daha kısa işletme süresi sağlayarak dikkate değer bir kazanç elde etmiştir. Bu bulgu, TSO'nun röle koordinasyonu probleminin çözümünde daha hızlı ve etkili bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymaktadır.

SAO algoritmasının geleneksel yöntemlere kıyasla daha başarılı sonuçlar üretmesi, alternatif optimizasyon tekniklerinin bu alanda değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. LCA ise çözüm kalitesi ile hesaplama süresi arasında dengeli bir yapı sergileyerek pratik uygulamalar için uygun bir seçenek olarak öne çıkmıştır.

Çalışma, algoritmaların aynı sistem üzerinde eşit başlangıç koşulları ve parametrelerle değerlendirilmesi sayesinde nesnel bir karşılaştırma imkânı sunmakta ve röle koordinasyon problemlerine yönelik farklı metasezgisel yöntemlerin görece etkinliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kullanılan 33-baralı test sistemi ile elde edilen bulguların uygulama geçerliliği artırılmıştır.

Gelecek çalışmalarda, bu algoritmaların hibrit modellerle birleştirilmesi, farklı sistem topolojileri üzerinde denenmesi ve gerçek zamanlı uygulamalarda test edilmesi önerilmektedir. Bunun yanı sıra, yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı adaptif koruma yaklaşımlarının geliştirilmesi, modern güç sistemlerinde dinamik, esnek ve güvenilir koruma stratejilerinin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

#### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Yazar katkılarının beyanı

Yazar 1: Çalışmanın fikrini geliştirmiş, yöntem ve benzetim altyapısını tasarlamış, analizleri gerçekleştirmiş ve makale metnini yazmıştır.

Yazar 2: Çalışma fikrini olgunlaştırmış, yöntem ve sonuçları bilimsel açıdan değerlendirmiş, metni gözden geçirerek düzenlemiş ve son hâline katkı sağlamıştır.

#### Kaynaklar

- [1] Langazane SN, Saha AK. Effects of particle swarm optimization and genetic algorithm control parameters on overcurrent relay selectivity and speed. *IEEE Access* 2022;10:4550-67. doi:10.1109/ACCESS.2022.3140679.
- [2] Shih MY, et al. A decoupled adaptive overcurrent coordination considering N-1 contingency and distributed generation using an effective evonorm algorithm. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2024;60(4):5480-9. doi:10.1109/TIA.2024.3384344.
- [3] Godwal SD, Chatterjee S, Nimje AA. A method to formulate accurate problem statement for overcurrent relay coordination. In: 2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy Future and Electric Transport (SEFET). 2024. doi:10.1109/SEFET61574.2024.10718163.
- [4] Olabisi PO, Ayegbokiki BJ. A review of the coordination of over-current relay protection in sub-transmission stations using computational optimization techniques. In: International Conference on Science, Engineering, and Business for Sustainable Development Goals (SEB4SDG). 2024. doi:10.1109/SEB4SDG60871.2024.10630102.
- [5] Alejandro JD, Pacis MC. Adaptive coordination of time overcurrent relays (OCR) in a radial distribution network with distributed generation using a modified LINKNET pairing algorithm. In: 2024 10th International Conference on Automation, Robotics, and Applications (ICARA). 2024, p. 407-10. doi:10.1109/ICARA60736.2024.10552953.
- [6] Seng O, Pujiantara M, Priyadi A, Mahindara VR. Enhancement of overcurrent relay coordination in modern industrial distribution system using adaptive modified firefly algorithm. In: 2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). 2023, p. 534-9. doi:10.1109/ISITIA59021.2023.10221107.
- [7] Khan S, Pujiantara M, Priyadi A. Optimal setting of overcurrent relay coordination on real power system PT. Pupuk Sriwidjaja using modified particle swarm optimization algorithm. In: 2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). 2023, p. 540-5. doi:10.1109/ISITIA59021.2023.10221060.
- [8] Ramadhan CA, Pujiantara M, Priyadi A. Optimization of overcurrent relay in radial networks using adaptive modified firefly algorithm considering inrush current transformers and motor starting. In: 2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). 2023, p. 822-7. doi:10.1109/ISITIA59021.2023.10221143.
- [9] Jamal NZ, Azmi AHABF. Optimization of overcurrent relays coordination using artificial hummingbird algorithm (AHA). In: 2023 IEEE 11th Conference on System Process Control (ICSPC). 2023, p. 66-71. doi:10.1109/ICSPC59664.2023.10420096.
- [10] Pratiwi RA, Pujiantara M, Priyadi A. Optimization of time dial setting overcurrent relay using cuckoo search algorithm considering inrush current and motor starting. In: 11th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE). 2024, p. 128-33. doi:10.1109/ICITACEE62763.2024.10762774.
- [11] Gairola E, Rawat MS. Optimum coordination and settings of overcurrent relays using teaching learning based optimization in a distribution system. In: 2023 IEEE 8th International Conference on Convergence Technology (I2CT). 2023. doi:10.1109/I2CT57861.2023.10126242.
- [12] Kuriakose A, Balamurugan S. Optimum overcurrent relay coordination in radial system using particle swarm optimization. In: 2023 IEEE 7th Conference on Information and Communication Technology (CICT). 2023. doi:10.1109/CICT59886.2023.10455379.
- [13] Putra RSFJ, Pujiantara M, Lystianingrum V. Overcurrent relay coordination setting on distribution power system using grasshopper optimization algorithm. In: 2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). 2023, p. 804-9. doi:10.1109/ISITIA59021.2023.10221124.
- [14] Arslanoğlu İ, Altaş İH. Optimization and performance comparison of overcurrent relay settings in power systems using genetic algorithm, league championship algorithm, and black hole algorithm. In: 2025 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). 2025, p. 1-6. doi:10.1109/ASYU67174.2025.11208362.
- [15] Arslanoğlu İ, Nuroğlu FM, Altaş İH. Comparative performance analysis of transit search optimization and particle swarm optimization for overcurrent relay coordination in radial system. *Gazi Journal of Engineering Sciences* 2025;11(1):104-20. doi:10.30855/gmbd.070525N07.
- [16] Atsever MB, Hocaoglu MH. Mitigation of sympathy trips in highly cabled non-effectively earthed radial distribution systems via MINLP. *Electric Power Systems Research* 2023;220:109377. doi:10.1016/j.epsr.2023.109377.
- [17] Atsever M, Hocaoglu M. Optimal Overcurrent Relay Coordination in Distribution Networks Using Path Finder Algorithm. *TESKONGRE 2023; 2024*. Available from: [https://aperta.ulakbim.gov.tr/record/263793/files/Atsever\\_TESKON\\_GRE\\_2023.pdf](https://aperta.ulakbim.gov.tr/record/263793/files/Atsever_TESKON_GRE_2023.pdf).
- [18] Atsever MB, Hocaoglu MH. Aşırı Akım Röle Koordinasyonu için Bozkurt Algoritmasının Kapsamlı Performans Analizi. *Türk Mühendislik Araştırma Ve Eğitimi Dergisi* 2022;1(2):52-61.
- [19] El-Shorbagy MA, El-Refaey AM. A hybrid genetic-firefly algorithm for engineering design problems. *Journal of Computational Design and Engineering* 2022;9(2):706-30. doi:10.1093/JCDE/QWAC013.
- [20] Foqha T, et al. Optimal coordination of directional overcurrent relays using hybrid firefly-genetic algorithm. *Energies* 2023;16(14):5328. doi:10.3390/EN16145328.
- [21] Rizal AS, et al. Study of overcurrent relays coordination optimization based on genetic algorithms. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Technology and Policy in Electrical Power and Energy (ICT-PEP). 2020, p. 100-3. doi:10.1109/ICT-PEP50916.2020.9249853.
- [22] Deeb H, Sarangi A, Mishra D, Sarangi SK. Improved black hole optimization algorithm for data clustering. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* 2022;34(8):5020-9. doi:10.1016/j.jksuci.2020.12.013.
- [23] Salawudeen AT, Mu'azu MB, Yusuf A, Adedokun AE. A novel smell agent optimization (SAO): An extensive CEC study and engineering application. *Knowledge-Based Systems* 2021;232:107486. doi:10.1016/j.knosys.2021.107486.
- [24] Özgüner Ö, Seyyarer E, et al. Comparative analysis of optimization algorithms in overcurrent relay optimization. *Teknik Dergi* 2023;12(4):25-32. doi:10.46810/tdfd.1311104.
- [25] Seyyarer E, et al. Fidan Gelişim ve Lig Şampiyonluk Algoritmaları Kullanarak Aşırı-Akım Rölelerin Optimum Koordinasyonu. *Anatolian Journal of Computer Science* 2023;3(2):1-14.

- [26] Mirrashid M, Naderpour H. Transit search: An optimization algorithm based on exoplanet exploration. *Results in Control and Optimization* 2022;7:100127. doi:10.1016/j.rico.2022.100127.
- [27] Amin MS, Attia MA, Khamees AK, Mekhamer SF, Kotb H, AboRas KM, et al. Development of AVR controller performance using exponential distribution and transit search optimization techniques. *Frontiers in Energy Research* 2024;12:1356978. doi:10.3389/fenrg.2024.1356978.
- [28] Arslanoğlu İ, Altaş İH, Kılıç H. Performance evaluation of advanced metaheuristic algorithms for directional overcurrent relay coordination in distribution networks. *Sci Rep* 2025. doi:10.1038/s41598-025-32416-w.