

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Aşırı Akım Röle Koordinasyonu için Bozkurt Algoritmasının Kapsamlı Performans Analizi

Comprehensive Performance Analysis of Greywolf Optimizer for Overcurrent Relay Coordination

Mert Bekir Atsever^{1,*} Mehmet Hakan Hocaoğlu²

¹ Elektronik Mühendisliği, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

² Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Geliş / Received: 25.07.2022

Kabul / Accepted: 07.09.2022

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author) Mert Bekir Atsever , mbatsever@gtu.edu.tr

ÖZ: Güç sistemlerinde aşırı akım koruma pratiği, mesafe koruma pratiğinden daha ekonomik ve yaygındır. Ayrıca dağıtım şebekelerinin büyük bir çoğunluğunda aşırı akım koruma kullanılmaktadır. Bu durum, dağıtım şebekelerinde kullanılan aşırı akım rölelerin koordinasyonun en uygun şekilde tasarlanmasını gerekli kılmaktadır. Aksi halde sistemde gerçekleşen bir arıza sırasında röleler istenildiği gibi çalışmaz. Aşırı akım röleleri arasında koordinasyon etkili ve seçici olabilmesi için röle ayar parametrelerinin şebekeye uygun ayarlanması gerekmektedir. Dağıtım şebekelerinin genişlemesi ile birlikte röle ayarlarının hesaplanması veya güncellenmesi zorlaşmıştır. Bu nedenle aşırı akım röle koordinasyonu yüksek sayıda kısıt içeren optimizasyon problemi şeklinde kurgulanmaktadır. Optimizasyon problemini çözümü noktasında ise peç çok meta-sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Bu çalışmada IEEE 8 Baralı test şebekesi için Bozkurt Optimizasyon Algoritması (BOA) başarılı bir şekilde uygulanmış ve kapsamlı performans analizi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optimizasyon, röle koordinasyonu, bozkurt algoritması

ABSTRACT: In power systems, the practice of overcurrent protection is more economical and common than the distance protection practice. In addition, overcurrent protection is used in the majority of distribution networks. This makes it necessary to design the coordination of overcurrent relays used in distribution networks in the most appropriate way. Otherwise, the relays cannot work as desired during the fault. In order for the coordination between the overcurrent relays to be effective and selective, the relay setting parameters must be adjusted depending on the network. With the expansion of distribution networks, it has become difficult to calculate or update the relay settings. For this reason, overcurrent relay coordination is designed as an optimization problem with a high number of constraints. At the point of solving the optimization problem, many meta-heuristic algorithms have been developed. In this study, the Greywolf Optimization Algorithm (GWO) for the IEEE 8 Bus test network has been successfully applied and comprehensive performance analysis has been carried out.

Keywords: Optimization, relay coordination, greywolf optimization algorithm

1. GİRİŞ

Güç sistemlerinin işletilmesi sırasında geçici ve kalıcı olmak üzere farklı türde arızalar gerçekleşebilir [1]. Hem kalıcı arızalar hem de geçici arızalar sırasında yüksek genlikli akımlar şebeke ekipmanlarına zarar verebilir. Bu nedenle şebekenin aşırı akımlara karşı korunması ve arz

güvenliğinin sağlanması gerekmektedir. Şebekelerin etkin bir şekilde korunması ve enerji arz güvenliğinin en üst seviyede tutulması için sistem işletmecisinin bazı kriterleri sağlaması elzemdir. Bunlar; seçicilik, güvenlik, güvenilirlik ve hız şeklinde sıralanabilir [2]. Kriterlerin sağlanması aşırı akım koruma rölelerinin ayarlanması ve uygun koruma koordinasyonu ile mümkündür.

Güç sistemlerinin basit olduğu topolojilerin genelde radyal olduğu dönemlerde röle ayarlarını ve koruma koordinasyonunun ayarlamak ve güncellemek basit bir süreç olmakla birlikte şebekenin genişlemesi ve radyallığının bozulması uygun koruma koordinasyonunun belirlenmesini zorlaştırmıştır [3]. Bu nedenle aşırı akım röle koordinasyonu yüksek sayıda kısıt içeren optimizasyon problemi şeklinde kurgulanması gerekliliği doğmuştur. Bununla birlikte röle koordinasyon problemi ilk olarak Urdeneta'nın 1988 yılında yaptığı çalışma ile birlikte bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır [4]. Temelde röle koordinasyon optimizasyonu için iki ayar parametresinin optimize edilmesine dayanmaktadır. Birincisi zaman ayarı (İng: TDS: Time Dial Setting) ikincisi ise eşik akım ayarıdır (İng: PSM: Plug Setting Multiplier). Urdeneta ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada üç baralı iletim hattında faz arızaları için röle koordinasyon optimizasyonu gerçekleştirilmiştir [4]. Röle eşik akım değeri sabit tutularak optimizasyon problemi Lineer Programlama (LP) formatına dönüştürülmüştür. LP basit ve hesaplama süresi hızlı çözüm yöntemidir. Optimum röle koordinasyonu probleminde, kısıt fonksiyonlarının azaltılarak LP'nin daha hızlı sonuç vermesini sağlayan çalışmalarda açık literatürde bulunmaktadır [5]. Bununla birlikte belirlenen eşik akım değerinin dışındaki değerlerde daha optimum sonuçların elde edildiği bilinmektedir [6]. Akım değerlerinin tek tek artırılarak optimizasyonu Abyaneh ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada gerçekleştirilmiştir [7]. Böylece problem yine LP formatında tutulup kolay ve hızlı çözüm sağlanmıştır. Değişken eşik akımları hesaba katıldığı zaman problem Lineer Olmayan Programlama (LOP) halini almaktadır. Fakat optimizasyon probleminin çıktısı olarak verdiği eşik akım değerleri sahada kullanılan röleye uygun olmayabilir veya lokal en düşük bölgeye düşüp uygun olmayan sonuç verebilir. Bu durum röleye uygun olan set değerleri arasında seçim yapmayı zorunlu kılmıştır. Belli eşik akım değerleri için yapılan optimizasyon problemi Karışık-Tamsayı Non-Lineer Programlama (KTNLP) formatına dönüştürülmüştür [8]. Geleneksel yöntemlerinin (LP, LOP, KTNLP) yerel minimumda kalması ve tek noktada çözüm başlatması meta-sezgisel algoritmaların kullanılmasını gerekli kılmıştır. Meta-sezgisel

algoritmalar pek çok farklı noktada çözüme başlayabilir. Böylece yerel minimumda kalma sorunu ortadan kalkar [9]. Araştırmacılar tarafında pek çok meta-sezgisel algoritmalar geliştirilmiş ve farklı optimizasyon problemlerinde denenmiştir [10]. Geliştirilen algoritmalar genel olarak hayvanların davranışları, evrenin davranışları, doğa olayları vb. öğelerden yararlanılarak matematiksel forma dönüştürülmüştür. Aşırı akım röle koordinasyonu problemi ele alındığında geliştirilen meta- sezgisel algoritmalar Sürekli Genetik Algoritma (SGA) [11], Kaotik Ateşböceği Algoritması (KAA) [12], Ateşböceği Algoritması (AA) [13], Ağaç Kök Algoritması (AKO) [14], Su Döngüsü Algoritması [15], Kaşif Algoritması [16] şeklinde sıralanabilir.

Bu çalışmada BOA IEEE 8 baralı test şebekesine başarılı bir şekilde uygulanmış ve optimum röle ayarları elde edilmiştir. Optimizasyon problemi hem LP yöntemi hem de LOP yöntemi ile kurgulanmıştır. Her iki yöntemin avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır. Makale şu şekilde kurgulanmıştır. İkinci kısımda üç faz arızası için geleneksel aşırı akım röle koordinasyon problemi kısıt denklemleri dikkate alınarak bir optimizasyon problemi şeklinde kurgulanmıştır. Üçüncü kısımda BOA'nın matematiksel denklemleri ve sözde-kodu verilmiştir. Dördüncü kısımda BOA iki farklı yöntem için (LP ve LOP) IEEE 8 baralı örnek test şebekesine yüz farklı şekilde uygulanmış ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar son kısımda tartışılmıştır.

2. AŞIRI AKIM RÖLE KOORDİNASYONU İÇİN OPTİMİZASYON PROBLEMİNİN KURGULANMASI

İletim şebekeleri ile kıyaslandığında; dağıtım şebekeleri oldukça fazla sayıda arıza ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, seçicilik kistası ile birlikte arızaların sistemden olabildiğince hızlı bir şekilde izole edilmesi gerekmektedir. Hızlı izolasyon ve seçici koruma, optimum aşırı akım röle koordinasyon optimizasyonu gerektirir. Bu nedenle, aşırı akım röle koordinasyonu problemine uygun amaç fonksiyonunu kurgulanmalıdır. Literatürde aşırı akım rölesi koordinasyon optimizasyonu çalışmalarında farklı amaç fonksiyonları kullanılmaktadır [17]. Bu makalede amaç fonksiyonunu üç farklı kategoriye ayrılmıştır. Birinci amaç fonksiyonu (OF_1), tüm aşırı akım

rölelerinin toplam çalışma süresini minimize etmeyi amaçlar. Bu nedenle, tüm aşırı akım rölelerinin çalışma sürelerinin toplamı en aza indirilmelidir. Sistemde hem yönlü hem de yönsüz röleler varsa, arıza birincil, ikincil ve diğer röleler tarafından görülmektedir.

$$OF_1 = \min \sum_{i=1}^n W_i \cdot T_{i,k} \quad (1)$$

Burada;

n : sistemde yer alan toplam aşırı akım röle sayısını, W_i : ağırlık katsayısını temsil etmektedir. Bu değer tüm çalışmalarda 1'e set edilmektedir. Dağıtım şebekelerinde farklı fiderlerde arıza olma olasılığının eşit olması ve fider mesafelerinin genellikle birbirlerine yakın olması 1'e set edilme nedeni olarak sıralanabilir. $T_{i,k}$: k noktasında gerçekleşen arıza için i . rölenin çalışma zamanı temsil etmektedir. Bu değer Denklem (2) ile hesaplanmaktadır [18].

$$T_{i,k} = \frac{a \cdot TDS_i}{\left(\frac{I_F}{I_P}\right)^\beta - 1} + c \quad (2)$$

a , β ve c röle karakteristiğine bağlı olarak değişen sabit katsayıları temsil etmektedir. Gerek optimizasyon çalışmalarında gerekse sahada farklı röle karakteristikleri kullanılmaktadır. Standart Ters Zaman karakteristiği ($\beta = 0.14$, $a = 0.02$, $c = 0$) hem dünya genelinde hem de Türk dağıtım şebekelerinde en yaygın kullanılan faz koruma eğrisidir [19].

Denklem (2)'de;

I_F : röle üzerinden okunan arıza akımının genlik değeridir.

I_P : rölenin ayarlanan eşik akım değeridir. Genelde yük akımının nominal değerinin 1.25-1.5 katına set edilmesi pratiği yaygındır. Toprak arızalarında ise genellikle yük akımının 0.2-0.3 katına set edilir [18] Denklem (2)'de açıkça görüldüğü üzere lineer olmama durumu I_P değerinin değişken olmasından kaynaklanmaktadır. Değişken I_P değeri için problem LOP yöntemine dönüşmektedir. LP ile kıyaslandığında LOP hesaplaması ve kurgulaması daha karmaşıktır [20]. Sabit I_P değeri için toplam çalışma süresi Denklem (3) ile gösterilen ifadeye dönüşmektedir. Böylece birinci amaç fonksiyonu Denklem (4)'deki forma dönüştürülebilir.

$$T_{i,k} = r_{i,k} \cdot TDS_i \quad (3)$$

$$OF_1 = \min \sum_{i=1}^n r_{i,k} \cdot TDS_i \quad (4)$$

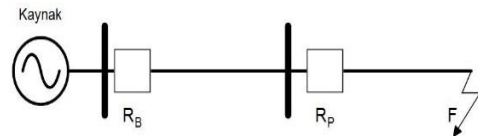
Dağıtım şebekesinde kullanılan rölelerin tümünün yönlü aşırı akım rölesi olması durumunda faz arızaları için hatalı açmanın gerçekleşmesi arızanın yönünü ve yerini tayin etmesi sayesinde engellenmektedir. Böylece ikinci amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu Denklem (5) ile gösterilmiştir.

$$OF_2 = \min \sum_{i=1}^n W_i \cdot T_{pr,i,k} \quad (5)$$

Denklem (1)'den farklı olarak Denklem (5)'de amaç sadece primer rölelerin toplam çalışma zamanını minimize etmektedir. Primer rölelerin zamanlarının azaltılması primer ve sekonder röleler arasındaki koordinasyon zaman aralığının artmasına neden olmaktadır. Bu durum ikinci amaç fonksiyonun en büyük dezavantajıdır. Bununla birlikte hem primer hem de sekonder rölelerin toplam çalışma süresinin optimize edildiği amaç fonksiyonu geliştirilmiştir. Geliştirilen amaç fonksiyonu Denklem (6) ile gösterilmiştir [21]. Primer rölelerin toplam çalışma zamanının artması OF_3 'ün en büyük dezavantajıdır [22].

$$OF_3 = \min \sum_{i=1}^n W_i \cdot (T_{pr,i,k} + T_{b,i,k}) \quad (6)$$

Arızanın şebekeden temizlenme sürecinde; seçici korumanın sağlanması için aşırı akım röleleri arasında koordinasyon kurulmalıdır. Şekil 1 ile iki adet aşırı akım rölesine sahip radyal dağıtım sistemi gösterilmiştir.



Şekil 1: Örnek radyal dağıtım şebekesi.

F noktasında gerçekleşen arıza için hem R_B hem de R_P röleleri arızayı algılamalıdır. R_P rölesi F arızası için birincil röle olduğundan dolayı R_B rölesinden daha önce açma sinyali üretmeli ve arıza

temizlenmelidir. R_P rölesinin açmaması durumunda R_B rölesi ayarlanan zaman gecikmesinden sonra açma sinyali üretmelidir. Zaman gecikmesi koordinasyon zaman aralığı (İng: Coordination Time Interval) olarak tanımlanmaktadır. Koordinasyon zaman aralığı kısıt fonksiyonu olarak optimizasyon sürecine dahil edilmektedir. Denklem (7) ile koordinasyon kısıdı ifade edilmiştir.

$$T_{(i,k)_b} - T_{(i,k)_p} \geq CTI \quad (7)$$

Koordinasyon kısıdının yanı sıra aşırı akım koordinasyon optimizasyonu rölenin fiziksel kısıtlarına, işletme kısıtlarına bağlı olarak farklı kısıt fonksiyonları da sisteme dâhil edilmektedir. TDS kısıtları, eşik akım kısıtları ve çalışma zaman aralığı kısıtları şeklinde sıralanabilir. Bu kısıtlar sırasıyla Denklem (8)-Denklem (10) ile ifade edilmektedir.

$$TDS_{(i)min} \leq TDS_{(i)} \leq TDS_{(i)max} \quad (8)$$

$$I_{P(i)min} \leq I_{P(i)} \leq I_{P(i)max} \quad (9)$$

$$T_{(i)min} \leq T_{(i)} \leq T_{(i)max} \quad (10)$$

TDS değerleri genellikle 0.025 ile 1.2 değerleri arasında değişmektedir. Minimum çalışma zamanı olarak faz aşırı akım rölelerin minimum 0.1 saniye sonra sinyal üretmesi istenmektedir. Maksimum çalışma süresinin 1.2 saniyeyi geçmemesi istenmektedir [23].

3. BOZKURT OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Sürü temelli geliştirilen meta-sezgisel algoritmalar birisi de Bozkurt Optimizasyon Algoritması'dır (BOA). BOA av sırasında bozkurtların sergilediği davranışlardan esinlenerek Mirjalili tarafından 2014 yılında literatüre kazandırılmıştır [24]. Elektrik Mühendisliği alanlarında motor kontrol, PI, PID ve hibrit enerji sistemleri gibi güç elektroniği alanlarında tercih edilmektedir. BOA elektrik mühendisliği dışında pek çok farklı mühendislik disiplininde de daha iyi çözüm sunduğu için tercih edilmektedir [24].

Her bir kurt sürüsünde alfa (α) beta (β) teta (δ) ve omega (ω) olmak üzere hiyerarşik form bulunmaktadır. Alfa bozkurt sürünün lideri olmakla beraber en iyi çözümü ifade etmektedir. Çözümün en iyiliği α 'dan ω 'ya doğru

sıralanmaktadır. Bozkurtların avını çevrelemesi matematiksel olarak Denklem (11)-(14) ile ifade edilebilir.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (11)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (12)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (13)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (14)$$

Burada;

t ; iterasyonu,

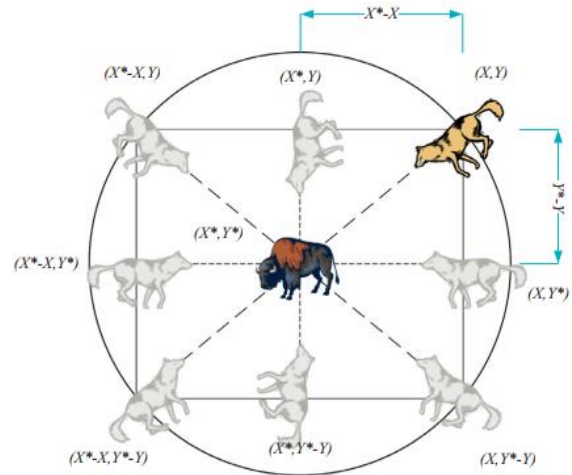
\vec{X}_p ; avın konum vektörünü,

\vec{X} ; bozkurtun konum vektörünü,

\vec{D} ; av ile bozkurt arasındaki konum vektörünü,

\vec{A} ve \vec{C} ; vektör katsayılarını temsil etmektedir.

Katsayıların hesaplaması \vec{r}_1 ve \vec{r}_2 0 ile 1 arasında değişen rastgele değer almak üzere Denklem (13) ve Denklem (14) ile hesaplanmaktadır. Alfa bozkurta ait iki boyutlu düzlemde muhtemel yeni konum vektörleri Şekil 2 ile gösterilmiştir.



Şekil 2: İki boyutlu düzlemde muhtemel yeni çözümler [24].

Bozkurtların avlanma süresince; alfa avı yöneten lider bozkurttur. Beta ve teta bozkurtlarda avı yardım etmektedir. Avlanma süreci Denklem (15)-(17) ile matematiksel olarak ifade edilebilmektedir.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \quad (15)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}|$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \quad (16)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) ;$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta)$$

Bozkurt popülasyonunu başlangıçlaştır.
 X_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)
 a, A ve C parametrelerini başlangıçlaştır
Her bir bozkurt için uyumluluk fonksiyonunu hesapla
 X_a = En iyi çözüm
 X_b =İkinci en iyi çözüm
 X_c =Üçüncü en iyi çözüm.
While ($t <$ Maksimum iterasyon sayısı)
for her bir bozkurt için
Denklem (16)'ya uygun olarak bozkurdun pozisyonunu güncelle
end for
 a, A ve C parametrelerini güncelle
Bütün bozkurtların vektör pozisyonlarını hesapla
En iyi çözümlerin hepsini güncelle
 $k=k+1$
end while
alfa bozkurdun pozisyonuna dön.

Şekil 3: BOA'ya ait sözde-kod.

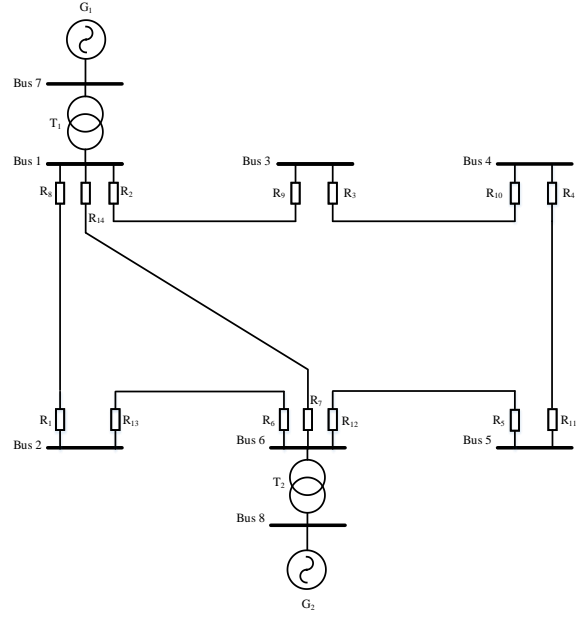
$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (17)$$

BOA'nın sözde-kodu Şekil 3 ile gösterilmiştir. Şekil 3 ile gösterilen sözde kod akışına röle aşırı akım röle koordinasyonu problemi uygulanacaktır.

4. BOA'NIN AŞIRI AKIM RÖLE KOORDİNASYONU PROBLEMİNE UYGULANMASI

BOA literatürde aşırı akım röle koordinasyonu probleminin optimize edilmesinde sıkça tercih edilen bir meta-sezgisel arama algoritmasıdır. BOA kullanarak bazı test şebekelerinde literatürde kullanılan geleneksel meta-sezgisel arama algoritmalarından daha optimum sonuçlar bulunduğu bilinmektedir [25]. Bu durum BOA'nın literatürde kullanılan diğer test şebekelerine uygulaması noktasında motivasyonu arttırmıştır. BOA'nın aşırı akım röle koordinasyonu probleminde performansını incelemek için sekiz baralı IEEE test şebekesi seçilmiştir. Test şebekesi Şekil 4 ile gösterilmiştir. Sekiz baralı IEEE test şebekesi sekiz bara, iki generator, iki yükseltici transformatör, yedi hat ve on dört adet aşırı akım rölesinden oluşmaktadır. Rölelerin lokasyonları ve numaralandırılması Şekil 4'de görülmektedir. Test şebekesinde bulunana aşırı akım rölelerin hepsi

yönlü aşırı akım rölesi olduğundan dolayı ikinci amaç fonksiyonu (OF₂) kullanılmıştır



Şekil 4: IEEE 8 baralı test şebekesi.

Aşırı akım rölelerin arıza noktalarına göre üç faz kısa devre akım genlikleri ve koordinasyon ilişkileri Tablo 1 ile gösterilmiştir. Tablo 1'de verilen arıza akım genlikleri ve koordinasyon ilişkileri kullanarak amaç fonksiyonu ve kısıt fonksiyonları yazılmıştır. Sekiz baralı şebekede iki farklı optimizasyon modellemesi gerçekleştirilmiştir. Birinci optimizasyon modeli eşik akım değerlerinin sabit olduğu LP yöntemidir. Her bir röle seçilen sabit eşik akım değerleri Tablo 2 ile listelenmiştir. Tablo 2'deki eşik akım değerleri için rölelerin optimum TDS ayarları elde edilecektir.

Bu durumda BOA 14 adet tasarım değişkenine sahiptir. BOA yüz kere simule edilmiştir. Her bir benzetim çalışması sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu Şekil 5 ile gösterilmiştir.

Şekil 5 incelendiğinde minimum çalışma süresinin 10.7597 saniye olduğu ve bu değer 57. benzetim çalışmasında elde edildiği görülmektedir. Optimum amaç fonksiyonun elde edildiği 57. Benzetim çalışmasında elde edilen röle TDS ayarları Şekil 6 ile gösterilmiştir.

Sekiz baralı test şebekesinin LP yöntemi ile çözümünde BOA'ya ait hesaplama süreleri her bir simülasyon sayısı için elde edilmiştir. Şekil 7 ile görüldüğü gibi her bir simülasyonun tamamlanma süresi farklı olmakla birlikte ortalama 2.7031

saniyedir. Optimum TDS ayarlarının elde edildiği 57. benzetim ortalama hesaplama süresinin altındadır. Böylece Optimum sonuca ortalamadan daha hızlı bir şekilde ulaşılmıştır. Bununla birlikte daha hızlı ulaşılan sonuçlar bulunmaktadır fakat bu sonuçlar optimum sonuç değildir.

Tablo 1: IEEE sekiz baralı test şebekesine ait akım ve röle koordinasyon bilgisi.

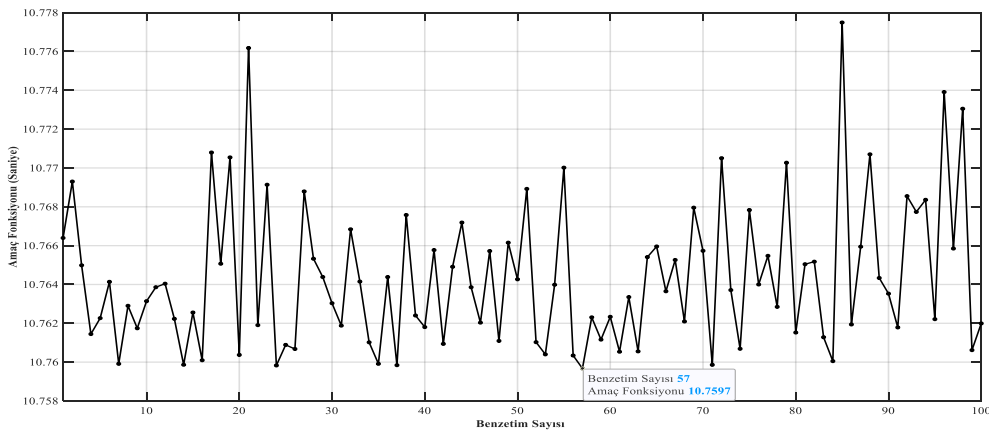
Birincil Röle	$I_{F,P}(A)$	İkincil Röle	$I_{F,B}(A)$
1	2666.3	6	2666.3
2	5374.8	1	804.7
2	5374.8	7	1531.5
3	3325.6	2	3325.6
4	2217.1	3	2217.1
5	1334.3	4	1334.3
6	4975	5	403.6
6	4975	14	1533
7	4247.6	5	403.6
7	4247.6	13	805.5
8	4973.2	7	1531.5
8	4973.2	9	403.2
9	1420.9	10	1420.9
10	2313.5	11	2313.5
11	3474.3	12	3474.3
12	5377	13	805.5
12	5377	14	1533
13	2475.7	8	2475.7
14	4246.4	1	804.7
14	4246.4	9	403.2

ve röle TDS ayarları için problem LOP yöntemi ile kurgulanmıştır. Böylece 14 adet eşik akım dizayn parametresi ve 14 adet röle TDS dizayn parametresi bulunmaktadır. Ayrıca problem 20 adet koordinasyon kısıtı, 28 adet minimum ve maksimum çalışma kısıtı içermektedir. Probleme BOA yüz kere uygulanmıştır. Her bir benzetim için elde edilen toplam çalışma süresi Şekil 8 ile gösterilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü gibi elde edilen amaç fonksiyonları arasındaki değişim LP'den daha fazladır. Optimum çözüm 72. benzetim çalışmasında elde edilmiştir. Elde edilen amaç fonksiyonunun değeri 6.44928 saniyedir. Bir önceki senaryodan 4.31 saniye daha düşüktür. Böylece sistemde kullanılan aşırı akım röleleri daha hızlı bir şekilde arızayı algılamıştır.

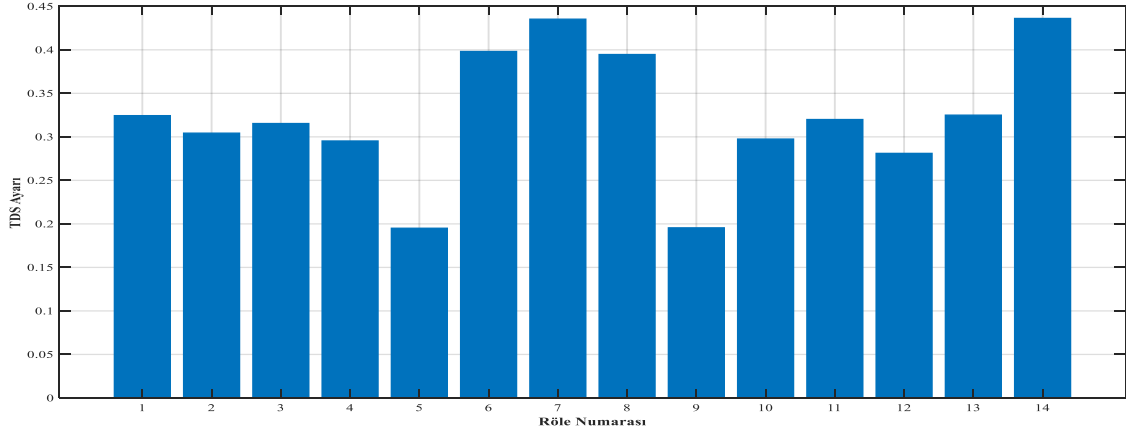
Tablo 2: IEEE sekiz baralı test şebekesine ait sabit eşik akım değerleri.

Eşik Akım Değeri (A)	Röle Numarası (R _N)
120	R ₁ , R ₄ , R ₅ , R ₇ , R ₉ , R ₁₀ , R ₁₃ , R ₁₄
180	R ₆ , R ₈
240	R ₃ , R ₁₁
500	R ₂
600	R ₁₂

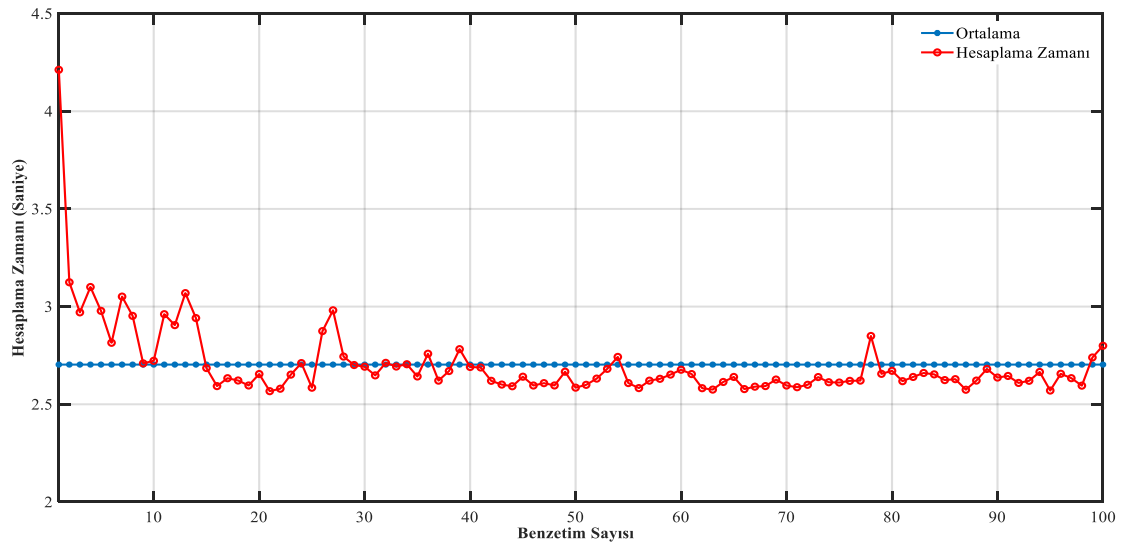
Sekiz baralı test şebekesinde röle eşik akım değerleri değişken tutulmuştur. Değişken eşik akım



Şekil 5: BOA'nın farklı simülasyon sayılarına göre amaç fonksiyonu değeri.



Şekil 6: 57.benzetime ait optimum röle TDS ayarları.



Şekil 7: BOA'nın farklı simülasyon sayılarına göre hesaplama zaman değerleri.

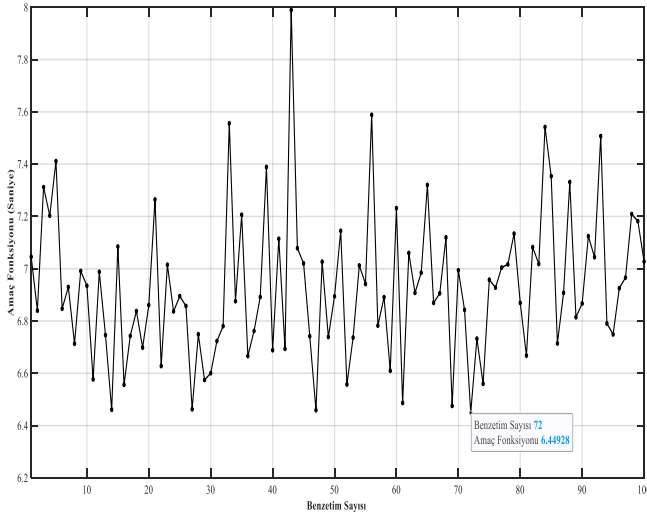
Optimum sonucun elde edildiği 72.benzetim çalışmasında elde edilen röle eşik akım ve röle TDS ayarları Şekil 9 ile gösterilmiştir.

Şekil 9 incelendiğinde en yüksek TDS ayarının 14. ve 7. Rölelere ait olduğu görülmektedir. Benzer durum Lineer Programlama yönteminde de elde edilmiştir. Fakat diğer rölelerde oldukça farklı TDS ayarları gözlemlenmiştir. Örneğin Lineer Programlama yönteminde birinci röle 0.3 değerinden yüksek bir ayar önerirken Lineer Olmayan Programlama yönteminde 0.1 değerinin altında ayar önermektedir. LOP daha optimum sonuç bulmasının yanına hesaplama süresinin uzun olması beklenmektedir.

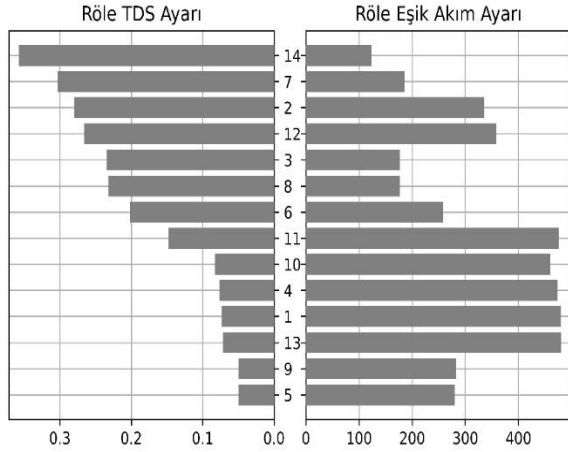
Şekil 10 ile BOA'nın farklı simülasyon sayılarına göre hesaplama süresi ve ortalama değeri

gösterilmektedir. Optimum TDS ayarlarının elde edildiği 72.benzetim ortalama hesaplama süresinin altındadır. Böylece Optimum sonuca ortalamadan daha hızlı bir şekilde ulaşılmıştır.

Tablo 3 ile her iki programlama yöntemi için BOA'nın farklı büyüklüklerdeki performansı özetlenmiştir. Beklendiği gibi LOP yöntemi LP yönteminden daha optimum amaç fonksiyonu elde edilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte LP yöntemi LOP yönteminden daha hızlı bir şekilde sonuca ulaşmasını sağlamıştır.



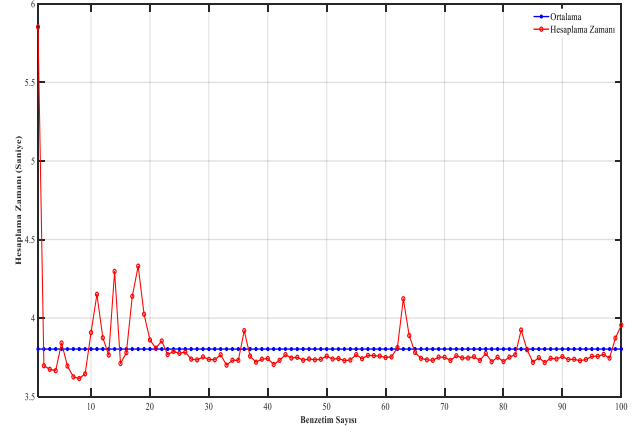
Şekil 8: BOA'nın farklı simülasyon sayılarına göre amaç fonksiyonu değeri (Lineer Olmayan Programlama).



Şekil 9: 72.benzetim çalışmasında elde edilen optimum eşik akım ve röle TDS ayarları.

Tablo 3: BOA'nın iki farklı programlama yöntemine göre performansı.

Bozkurt Optimizasyon Algoritması		
Büyükük	LP	LOP
Min. Amaç Fonks.	10.7597 s	6.4492 s
Ortalama Amaç Fonks.	10.7634 s	6.9290 s
Min. Hesaplama Süresi	2.5669 s	3.6154 s
Ort. Hesaplama Süresi	2.7031 s	3.8029 s



Şekil 10: BOA'nın farklı simülasyon sayılarına göre hesaplama zamanı değerleri (Lineer Olmayan Programlama).

BOA'nın diğer metasezgisel algoritmalar (Harmoni Arama (HA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Nöron Ağ Algoritması (NAA), Elektromanyetik Alan Optimizasyonu (EAO) ile kıyası Tablo 4 ile özetlenmiştir. Tablo 4 ile açıkça görüldüğü üzere kıyaslaması yapılan metasezgisel algoritmalar arasında en düşük amaç fonksiyonu BOA'ya aittir.

Tablo 4: BOA'nın farklı optimizasyon algoritmaları ile kıyası.

Yöntem	Amaç Fonksiyonu(s)
HA [26]	11.76
PSO [26]	10.42
NAA [16]	7.61
EAO [26]	7.31
BOA	6.44

5. SONUÇLAR

Geleneksel optimizasyon çözüm yöntemlerinin yanı sıra meta-sezgisel algoritmaların aşırı akım röle koordinasyonu probleminde kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu çalışma kapsamında pek çok optimizasyon probleminin çözümünde başarılı sonuçlar veren BOA aşırı akım röle koordinasyonu probleminde test edilmiştir. Bu çalışmada IEEE 8 Baralı test şebekesi için aşırı akım röle koordinasyonu optimizasyonu problemi BOA kullanılarak başarılı bir şekilde çözülmüştür. BOA hem LP yöntemi hem de LOP yöntemi için optimum sonuçlar vermiştir. BOA her iki yöntem için de 100 farklı şekilde çalıştırılmıştır. Senaryolarda herhangi bir yakınsama veya yerel minimumda kalma problemi yaşanmamıştır. Böylece BOA'nın aşırı akım röle koordinasyonu

optimizasyonunda etkin ve başarılı sonuçlar veren bir meta-sezgisel algoritmadır. Bu durum BOA'nın diğer koruma problemlerinin optimize edilmesinde kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] T. H. Ortmeier, T. Hiyama, and H. Salehfar, "Power quality effects of distribution," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 18, no. 5, pp. 323-329, 1996.
- [2] Horowitz ve A. Phadke, "Power system relaying", New York: Wiley, 2008.
- [3] J.M. Postforoosh, et al. "Computer aided coordination of line protection schemes IEEE Comitee Report", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 2, pp. 575-583, 1991.
- [4] A.J. Urdaneta, R. Nadira, and L. G. Perez Jimenez, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 3, no. 3, pp. 903-911, 1988.
- [5] H. K. Karegar, H. A. Abyaneh, V. Ohis and M. Meshkin, "Pre-processing of the optimal coordination of overcurrent relays", *Electr. Pow. Syst. Res.*, vol. 75, no. 2, pp. 134-141, 2005.
- [6] H. Zeineldin, E. El-Saadany and M. A. Salama, "Optimal coordination of directional overcurrent relay coordination", *IEEE Pow. Eng. Soc. General Meeting*, 2005.
- [7] H. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, H.K. Karegar, S.H.H. Sadeghi and R.A.J. Khan, "A new optimal approach for coordination of overcurrent relays in interconnected power systems", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol 18, no. 2, pp. 430-435, 2003.
- [8] H.H. Zeineldin, E.F. El-Saadany and M.M.A Salama, "Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization", *Electr. Pow. Syst. Res.*, vol 76, no. 11, pp. 988-995, 2006.
- [9] P.P. Bedekar and S.R. Bhide, "Optimum Coordination of Directional Overcurrent Relays Using the Hybrid GA-NLP Approach", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol 26, no. 1, pp. 109-119, 2011.
- [10] M. N. Alam and B.D.V. Pant, "A comparative study of metaheuristic optimization approaches for directional overcurrent relays coordination", *Electr. Pow. Syst. Res.*, vol 128, no. 1, pp. 39-52, 2015.
- [11] P.P. Bedekar and S.R. Bhide, "Optimum coordination of overcurrent relay timing using continuous genetic algorithm", *Exp. Syst. Appl.*, vol 38, no. 9, pp. 11286-11292, 2011.
- [12] S.S. Gokhale and V.S Kale, "An application of a tent map initiated Chaotic Firefly algorithm for optimal overcurrent relay coordination" *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol 78, no. 1, pp. 336-342, 2016.
- [13] S.S. Gokhale and V.S.Kale, «Application of the Firefly algorithm to optimal over-current relay coordination,» *2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Bran,Romina*, 2014.
- [14] A. Wadood, et. al., "An optimized protection coordination scheme for the optimal coordination of overcurrent relays using a nature-inspired root tree algorithm," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 9, 2018.
- [15] M.B. Atsever, Ö. Karacasu and M.H. Hocaoglu, "Optimal Overcurrent Relay Coordination in Distribution Networks", *2021 56th Int. Univ. Power Eng. Conf. (UPEC)*, Middlesbrough, UK, 2021.
- [16] M.B. Atsever, Ö. Karacasu and M.H. Hocaoglu, "Performance Analysis of Different Optimization Algorithms on Overcurrent Relay Coordination Problem in Distribution Systems", *2021 11th Smart Grid Conference (SGC)*, Tebriz, 2021.
- [17] S.D Godwal, K.D. Pandya, V.N. Rajput and S.C. Vora, "A Review on Approaches Employed for Solving Directional Overcurrent Relays' Coordination Problem", *Adv. in Electr. Power Energy Infr.*, Singapur, 2020.
- [18] N. El-Naily, S.M. Saad and F.A. Mohamed, "Novel approach for optimum coordination of overcurrent relays to enhance microgrid earth fault protection scheme", *Sustain. Cities and Soc.*, vol 54, no. 1, pp. 1-13, 2020.
- [19] V.N. Rajput and K.S. Pandya, "On 8-bus test system for solving challenges in relay coordination", *2016 IEEE 6th Int. Conf. on Power Syst. (ICPS)*, Delhi, 2016.
- [20] T. Amraee, "Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol 27, no. 3, pp. 1415 - 1422, 2012.
- [21] J. Shah, N. Khristi, V.N. Rajput and K. Padya, "A New Objective Function for Optimal Coordination of Directional Over-current

Relays", *Adv. Electr. Power Energy Infr.*, Singapur, 2020.

- [22] O. Akdağ and C. Yöreoglu, "Optimal directional overcurrent relay coordination using MRFO algorithm: A case study of adaptive protection of the distribution network of the Hatay province of Turkey", *Electr. Pow. Syst. Res.*, vol 192, no. 1, pp. 1-11, 2021.
- [23] P.P. Bedekar and V. Kale, "Optimum Coordination of Overcurrent Relay Timing Using Simplex Method", *Electr. Power Comp. Syst.*, vol 38, no. 10, pp. 1175-1193, 2010.
- [24] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer", *Adv. Eng. Software*, vol 69, no. 1, pp. 46-61, 2014.
- [25] M.B. Atsever and M.H. Hocaoglu, "Optimal Overcurrent Relay Coordination Using Grey Wolf Optimizer", *3rd Int. Turk. World Eng. Sci. Cong.*, Ankara, 2021.
- [26] H.R.E.H. Bouchekara, M. Zellagui and M.A. Abido, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using a modified electromagnetic field optimization algorithm", *Appl. Soft Computing*, vol 54, pp. 267-283, 2017.