



## Adaptive protection method with fault current limiting mechanism for directional over current relays coordination problem

Ozan Akdağ\*<sup>ID</sup>, Celaleddin Yeroğlu<sup>ID</sup>

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Inonu University, 44100, Malatya, Turkey

### Highlights:

- Protection coordination in DOCR
- Application of FCL mechanism in power systems
- Adaptive protection in power systems

### Keywords:

- Optimization
- Adaptive protection
- Fault current limiter

### Article Info:

Research Article  
Received: 19.05.2020  
Accepted: 06.11.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.739949

### Correspondence:

Author: Ozan Akdağ  
e-mail: ozanakdag@live.com  
phone: +90 541 310 8631

### Graphical/Tabular Abstract

In this paper, the Directional Over Current Relay (DOCR) coordination with high constraints, which is an important problem in power systems engineering, is discussed. The classical object function reported in the literature has been modified to ensure optimum coordination of DOCRs. For the optimum coordination of the DOCR problem, Evaporation Rate Controlled Water Cycle Algorithm (ER-WCA) and Harris Hawk Optimization (HHO) algorithm are applied to modified object function. The proposed method is applied to the 9-bus test system. The results are compared with the literature.

**Table A.** Comparison of results for minimization of relay operating time in 9-bus test system.

Method	MO-OF	Method	MO-OF	Method	MO-OF
ER-WCA	4.3607	FFA [22]	6.340	MWCA [21]	3.707
HHO	3.9947	CSA [22]	5.180	MEFO [21]	6.088
GA [22]	7.4947	HAS [22]	4.9046	BBO [21]	5.243

**Purpose:** The aim of this paper is to minimize the total relay operating time in the power system by using ER-WCA and HHO algorithms and also to propose an adaptive protection method with Fault Current Limiting (FCL) mechanism.

### Theory and Methods:

In this study, the classical objective function used in the DOCRs problem in literature has been modified. Then, an adaptive protection structure with a Fault Current Limiter (FCL) is proposed using the modified objective function.

### Results:

The relay operation time is computed by HHO, and ER-WCA using proposed object function. Optimum values obtained by HHO was better than most of the algorithms presented in the literature. Then, successful application of FCL was presented.

### Conclusion:

One can conclude from results of the paper that the HHO algorithm and proposed object function produces satisfactory results in DOCRs coordination problem. On the other hand, FCL mechanism may yield successful result in adaptive protection of power systems.



## Yönlü aşırı akım röleleri koordinasyon problemi için arıza akımı sınırlama mekanizmalı adaptif koruma yöntemi

Ozan Akdağ\*<sup>ID</sup>, Celaledin Yeroğlu<sup>ID</sup>

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 44100, Malatya, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yönlü Aşırı Akım Röleleri ile koruma koordinasyonunun yapılması
- Arıza Akım Sınırlama Mekanizmasının güç sistemlerine uygulanması
- Güç sistemlerinde adaptif koruma sağlanması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.05.2020

Kabul: 06.11.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.739949

### Anahtar Kelimeler:

Optimizasyon,  
adaptif koruma,  
arıza akım sınırlama

### ÖZ

Güç sistemlerinin korunmasında Yönlü Aşırı Akım Röleleri (YAAR) koordinasyonu önemli bir konudur. Bu makalede doğrusal olmayan ve yüksek kısıtlara sahip YAAR koordinasyonu problemi ele alınmıştır. YAAR'nin optimum koordinasyonunu sağlamak için literatürde verilen amaç fonksiyonuna röle ayar kısıtları bir ağırlık faktörü ile eklenerek, yeniden düzenlenmiştir. YAAR probleminin optimum koordinasyonunun hesaplanmasında Buharlaşma Hızı Kontrollü Su Çevrim Algoritması (BH-SÇA) ve Harris Şahin Optimizasyonu (HŞO) algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar 9-bara test sistemine uygulanmıştır. Ayrıca BH-SÇA ve HŞO kullanılarak elde edilen sonuçlar, literatürdeki diğer algoritmalar kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra Dağıtık Üretim (DÜ) sistemi barındıran güç şebekelerinde değişen güç sistemi koşullarına uyum sağlayan yeni adaptif bir koruma yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde YAAR'nin optimum koordinasyonunun sağlanmasında HŞO algoritması kullanılmıştır. Ayrıca, bu yeni adaptif koruma yönteminde, güç sistemlerinde kritik arıza noktasını aynı anda akım ve gerilim indeksini temel alarak belirleyen Arıza Akım Sınırlama (AAS) mekanizmalı bir yapı önerilmiştir. Sonrasında bu yeni adaptif koruma yöntemi 10 bara Türkiye dağıtım sistemine uygulanarak, çalışmanın etkinliği tartışılmıştır.

## Adaptive protection method with fault current limiting mechanism for directional over current relays coordination problem

### H I G H L I G H T S

- Protection coordination using Directional Overcurrent Relays
- Application of Fault Current Limiting mechanism to power systems
- Adaptive protection in power systems

### Article Info

Research Article

Received: 19.05.2020

Accepted: 06.11.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.739949

### Keywords:

Optimization,  
adaptive protection,  
fault current limiter

### ABSTRACT

Coordination of Directional Over Current Relays (DOCR) is an important issue in the protection of power systems. In this paper, DOCR coordination, which has the problem of nonlinear and high constraints, is discussed. The object function, reported in the literature, has been re-written by adding relay setting constraints multiplied by a weight factor to ensure optimum coordination of DOCRs. At first, the Evaporation Rate Controlled Water Cycle Algorithm (ER-WCA) and Harris Hawk Optimization (HHO) algorithms were used to compute the optimum coordination of the DOCR problem. The proposed algorithms are applied to the 9-bus test system. In addition, the results obtained using ER-WCA and HHO were compared with those obtained using other algorithms in the literature. Then, a new adaptive protection method, which adapts to changing power system conditions in power grids with Distributed Generation (DG) system, is proposed. In this new adaptive protection method, the HHO algorithm has been used to ensure optimum coordination of DOCRs. Also, in this new adaptive protection method, a structure with Fault Current Limiting (FCL) mechanism, which determines the critical fault point based on the both of the current and voltage index, is proposed in power systems. Then, by applying this new adaptive protection method to 10 bus Turkey distribution system, the effectiveness of the study was discussed.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Aşırı akım röleleri (AAR) dağıtım sistemlerini korumak için etkin bir cihaz olarak kullanılmaktadır. AAR'nin güç sistemi ekipmanlarının hasar görmesini en aza indirmek için hızlı ve seçici çalışması gereklidir. Özellikle son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına artan ilgiden güç sistemlerinde dağıtım seviyesinden entegre edilen DÜ sistemlerinin sayısı artmıştır [1]. Bu artış ile DÜ barındıran şebekelerde AAR arasındaki önceden belirlenmiş koordinasyonu sağlama konusu, artan arıza akımları ve ters akış nedeniyle daha ciddi durum haline gelmiştir. Bu gibi durumlarda koruma koordinasyonunu sağlayabilmek için adaptif koruma sistemleri kullanılabilir. Adaptif koruma sisteminde, AAR şebeke koşullarındaki değişiklikleri tespit ettikten sonra koruma ayar parametrelerini doğrudan veya içerisinde önceden belirlenmiş olan ayar gruplarına göre değiştirebilme yeteneğine sahiptir. Bu sayede, adaptif koruma sisteminde meydana gelebilecek çeşitli işletme senaryolarına uyum sağlayarak, sistemin hatalı çalışma ihtimalini en aza indirebilir. Bundan dolayı, adaptif koruma sistemleri klasik koruma sistemleri ile karşılaştırıldığında sistem için daha güvenilir ve seçici koruma sağlamaktadır [2]. Dijital teknolojinin gelişmesiyle DÜ tabanlı adaptif koruma ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Adaptif koruma felsefesinin temel kavramı 1970'lerde güç sistemlerinde ortaya çıkmıştır [3, 4]. 1990'lı yıllarda, güç sistemindeki değişen koşullar dikkate alınarak, aşırı akım röle koordinasyonu probleminde değişkenler ve kısıtlamalar altında en uygun röle ayar değerlerini bulmayı amaçlayan doğrusal programlama teknikleri kullanılmıştır [5, 6]. Ek olarak, adaptif aşırı akım koordinasyonu için doğrusal olmayan programlama teknikleri kullanılmıştır [7]. Son yıllarda YAAR'nin optimum koordinasyonu, optimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir. Bu problem oldukça fazla kısıtlara sahip ve farklı amaç fonksiyonları ile formüle edilebilir. Literatürde adaptif koruma için sezgisel algoritmaların kullanıldığı bazı örneklerde; DÜ barındıran bir mikrogrid şebekede YAAR'nin optimum koordinasyonu Çizge Teorisi ile sağlanmıştır [8], IEEE 19 bara test sistemi DÜ'lerin etkisini görebilmek için modifiye edilmiş evrimsel algoritma ile YAAR koordinasyonu sağlatılmıştır [9], DÜ barındıran güç sisteminde farklı işletme koşullarına göre AAR'nin farklı ayar gruplarını ve röle koordinasyonunun sağlatılmasında hibrit GA-LP algoritması kullanılmıştır [10], DÜ ilavesi ile modifiye edilmiş bir IEEE 9 test bara sisteminde Yapay Sinir Ağları ve Ateş Böceği algoritması ile YAAR koordinasyonu sağlatılmıştır [11]. DÜ eklenmiş bir güç sisteminde Ateş Böceği algoritması ile YAAR röle koordinasyonu sağlatılmıştır [12].

Bu çalışmada ise, YAAR koordinasyon probleminde karşılaşılan yanlış koordinasyon vakalarının en aza indirilmesine katkı sağlayabilmek için, literatürde [13] sunulan bir amaç fonksiyonuna röle ayar kısıtları eklenerek, Kısıtlı Amaç Fonksiyonu (KAF) elde edilmiştir. Akdağ ve Yeroğlu'nun [14] yaptığı çalışmada, hem ileri/geri rölelerinin çalışma sürelerini azaltmak hem de yanlış

koordinasyon problemini gidermek için yeni terimler ağırlık faktörleri ile amaç fonksiyonuna dâhil edilmiş, yeni terimlerden biri olan röle ayar kısıtları bir ağırlık faktörü ile amaç fonksiyonuna eklenmiş ve röle ayarlar kısıtlarının istenilen aralıkta kalması sağlanmıştır [14]. Önerilen bu çalışmada ise literatürde [13] sunulan amaç fonksiyonuna [14]'deki röle ayar kısıt mekanizması farklı bir ağırlık faktörü ile eklenerek, KAF elde edilmiştir. Böylece elde edilen KAF'nin, YAAR koordinasyonu probleminde etkili sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca önerilen bu çalışmada, güç sistemlerinin herhangi bir yerinde meydana gelebilecek olan kısa devre arızasına karşı güç sisteminin kararlılığını en iyi şekilde sağlayacak olan, arıza akım sınırlayıcı teçhizatların yerleşim noktasının bulunmasına yardımcı olacak bir yöntem önerilmiştir. Özellikle DÜ barındıran şebekelerde değişen kısa devre akımlarından dolayı arıza akımlarının sınırlanması üzerine birçok çalışma vardır. Literatürde, güç sisteminde kritik arıza noktasının bulunması konusunda yapılan çalışmalar genel olarak, iletim hattı akımının değişiminin dikkate alındığı çalışmalardır [15, 16]. Diğer yandan literatürde kritik arıza noktasının bulunmasında, arıza sonrası jeneratör terminal gerilimi değişimini de dikkate alan çalışmalar bulunmaktadır [17, 18]. Bu çalışmada ise aynı anda hem akım hem de gerilim indeksini baz alan bir formülasyon ile kritik arıza noktasının belirlenmesine çalışılmıştır. Bu çalışmada sunulan kritik arıza noktasını belirleyen yöntem 10 bara test sistemine uygulanarak, etkinliği tartışılmıştır. Bu makalenin geri kalanı ise şöyle düzenlenmiştir: Bölüm 2, literatürdeki mevcut çalışmalara bu çalışmanın katkılarını vurgulamak için temel bilgileri sunmaktadır. Bölüm 2'de ayrıca YAAR koordinasyon problemi için modifiye edilmiş yeni formülasyon tanıtılmıştır. Bölüm 3'de BH-SÇA ve HŞO algoritmaları ile YAAR probleminin çözümü sunulmuştur. Bölüm 4'de güç sistemlerinde kritik arıza noktasını belirleyen yöntem ile önerilen adaptif koruma sistemi sunulmuştur. Bölüm 5'te ise sonuçlar verilmektedir.

## 2. TEMEL BİLGİLER (BACKGROUND INFORMATION)

### 2.1. Buharlaşma Hızı Kontrollü Su Çevrim Algoritması (Evaporation Rate Based Water Cycle Algorithm)

SÇA su döngüsü sürecinin gözlemlenmesi, nehirlerin ve akarsuların denize nasıl aktığının belirlenmesi temeline dayanır. Farklı nehirler ve akarsular için yeni buharlaşma oranı kavramını tanımlayan ve aramada iyileştirme sağlayan buharlaşma oranına dayalı BH-SÇA 2015 yılında Ali Sadollah [19] tarafından sunulmuştur.

### 2.2. Harris Şahini Optimizasyon Algoritması (Harris Hawk Optimization Algorithm)

HŞO algoritmasında doğanın zeki kuşlardan biri olan Harris şahinlerinin avlanma stratejisi taklit edilmiştir. Harris şahinleri avını belirlediği zaman, önce bir keşif planı sonrasında saldırma stratejisi geliştirir. HŞO, av stratejisine göre keşif ve sömürücü aşamalarına sahiptir. Harris

şahinlerinin bu özellikleri 2019 yılında Heidari tarafından matematiksel olarak modellenerek sunulmuştur [20]. HŞO popülasyon temelli, gradyansız bir optimizasyon tekniğidir. HŞO, uygun bir formülasyona sahip mühendislik problemlerine uygulanabilir.

### 2.3. YAAR Koordinasyon Problemi (DOCR Coordination Problem)

Eş. 1’de röle koordinasyon probleminde ileri yön rölelerinin çalışma süresini azaltan amaç fonksiyonu verilmiştir [13].

$$OF = \sum_{i=1}^M T_{pri} \cdot w \quad (1)$$

Bu rölelerin operasyonel zamanı aşağıdaki gibi ifade edilir (Eş. 2).

$$T_{pri} = \frac{\beta_1 x TDS_i}{\left(\frac{I_{f(i)}}{I_p(i)}\right)^{\beta_2 - \beta_3}} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

Burada, M toplam güç sistemindeki röle sayısı,  $T_{pri}$  ileri yönde koruma yapan rölelerin operasyonel zamanı,  $\beta_1 = 0,14$ ,  $\beta_2 = 0,02$ ,  $\beta_3 = 1$  ise sırasıyla IEC standartlarına göre verilen sabitlerdir.  $I_{f(i)}$  (A) 3-faz kısa devre akım değeridir,  $I_p(i)$  (A) arıza (eşik) başlatma akım değeridir. YAAR koordinasyon probleminde 2 tür kısıt vardır. Bunlar röle ayar kısıtları (Eş. 3-Eş. 5) ve koordinasyon kısıtlarıdır (Eş. 6).

Röle ayar kısıtları;

$$Ip(i)min \leq Ip(i) \leq Ip(i)max \quad (3)$$

Eş. 4’te röle çalışma zaman eğrisi için sınır değerler gösterilmiştir. Bu değer röle çalışma süresini etkileyen bir kavramdır.

$$TDS(i)min \leq TDS(i) \leq TDS(i)max \quad (4)$$

Eş. 5 birincil (ileri yön) rölelerin operasyonel zamanını belirtir.

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

Röle koordinasyon kısıtı (Eş. 6); burada, CTI (sn) röle koordinasyonu zaman aralığıdır (ayrım zamanı).

$$T_{b(i)} - T_{pr(i)} \geq CTI \quad (6)$$

Birbirine bağlı güç sistemlerinde birincil/yedek rölelerinin koordinasyon kısıtlamalarının sayısı oldukça çoktur. Böyle güç sistemlerinde yedek rölelerinin herhangi bir arızaya tepki süresi ve birincil/yedek röleleri arasındaki ayrım zaman farkı oldukça yüksek çıkabilmektedir [13]. Bu gibi koordinasyon problemlerini düzeltmek için literatürde birçok Amaç Fonksiyonu (AF) önerilmiştir. En yaygın kullanılan AF’lerden biri Eş. 7’de verilmektedir [13].

$$OF2 = \gamma_1 \cdot \sum_{i=1}^M T_{pr,i} + \gamma_2 \cdot \sum_{i=1}^N (\Delta t - |\Delta t|)^2 \quad (7)$$

Burada, M toplam güç sistemindeki röle sayısı,  $T_{pr,i}$  ileri yönde koruma yapan rölelerin operasyonel zamanıdır.  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  amaç fonksiyonu için ağırlık faktörüdür. Eş. 7’de verilen amaç fonksiyonuna röle ayar kısıtları bir ağırlık faktörü ile eklenerek Eş. 8’de verilen KAF elde edilmiştir. Böylece tek bir amaç fonksiyonunda hem röle koordinasyon kısıtları hem de röle ayar kısıtlarına yer verilmiştir. YAAR probleminde bu amaç fonksiyonu ile röle ayar ve koordinasyon kısıtları göz önüne alınarak röle ayarları optimize edilebilir.

$$KAF = \gamma_1 \cdot \sum_{i=1}^M T_{pr,i} + \gamma_2 \cdot \sum_{t=1}^N (\Delta t - |\Delta t|)^2 + \gamma_3 \cdot \sum_{k1=1}^{N1} (\Delta c_{kt1} - |\Delta c_{kt1}|)^2 + (\Delta c_{kt2} - |\Delta c_{kt2}|)^2 \quad (8)$$

$$\Delta c_{kt1} = c_{kısıt1} - c_{kısıt1,min}, \Delta c_{kt2} = -c_{kısıt1} + c_{kısıt1,max}$$

Burada  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  ağırlık faktörleridir. N toplam güç sistemindeki röle çifti sayısı,  $N_1$  toplam güç sistemindeki röle sayısı,  $c_{kısıt1}$ , röle ayar kısıtlarını tanımlar (Eş. 3-Eş. 5). Eş. 8’de 2. terimde bulunan  $\Delta t$  ileri ( $T_{p(i)}$ ) ve geri ( $T_{b(i)}$ ) röleleri arasındaki ayrım zamanını belirtir (röle koordinasyon kısıtları) ve bu değer bir ağırlık faktörü ( $\gamma_2$ ) ile amaç fonksiyonuna dâhil edilmiştir [13].  $\Delta t$  Eş. 9 ile ifade edilir.

$$\Delta t = (T_{b(j)} - T_{p(i)} - CTI); \quad (9)$$

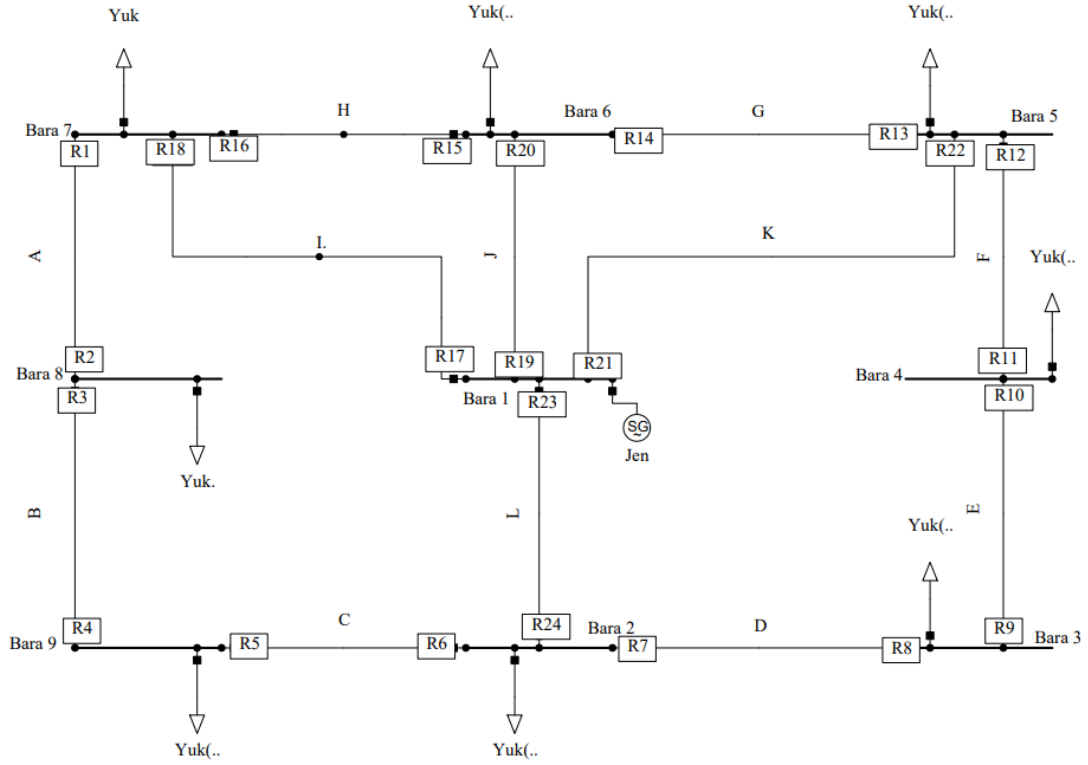
Eş. 8’de 3. terim röle kısıtlarını ifade eder. Bu değer bir ağırlık faktörü ( $\gamma_3$ ) ile amaç fonksiyonuna dâhil edilmiştir.

### 3. YAAR İÇİN SİMULASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS FOR DOCR)

Bu bölümde, 9-bara test sisteminde YAAR’nin koordinasyon problemini çözmek için BH-SÇA ve HŞO algoritmaları uygulanmıştır. BH-SÇA’nın kullanıcı parametreleri:  $Npop = 50$ ,  $Nsr = 4$ ,  $dmax = 1e-5$ ,  $Maksimum\_iterasyon = 5000$ ; HŞO:  $N = 50$ ,  $Maksimum\_iterasyon = 5000$  olarak seçilmiştir.

#### 3.1. 9-bara test sistemi (9-bus test system)

9-bara test sisteminin tek hat şeması ve rölelerin konumları Şekil 1’de verilmiştir. 9-bara test sistemi 1 jeneratör, 12 hat ve 24 röleden oluşmaktadır. Güç sisteminin ana karakteristikleri ve kısa devre akım değerleri [21]’den alınmıştır. Optimum röle ayarlarını bulmak için TDS değeri 0,025-1,2 aralığında ayarlanır ve CTI değeri minimum 0,2 s, maksimum 1,2 s olarak seçilir [21]. 9 bara test sisteminde röle koordinasyon probleminde 48 değişken ve 108 kısıt vardır. KAF’lı BH-SÇA ve HŞO yöntemi ile hesaplanmış optimum röle ayarları Tablo 1’de verilmiştir. Bu yöntem ile elde edilen sonuçlar Tablo 2’de literatürdeki diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Bu durum için BH-SÇA ve HŞO algoritmaları kullanılarak elde edilen rölelerin çalışma süreleri Tablo 3’de verilmiştir. Her iki yöntem için yakınsama eğrileri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 1. 9 bara test sistemine ait tek har diyagramı (Single-line diagram of the 9-bus test system) [21]

Tablo 1. 9 bara test sistemi için röle çalışma süreleri (Relay operation times for the 9-bus test system)

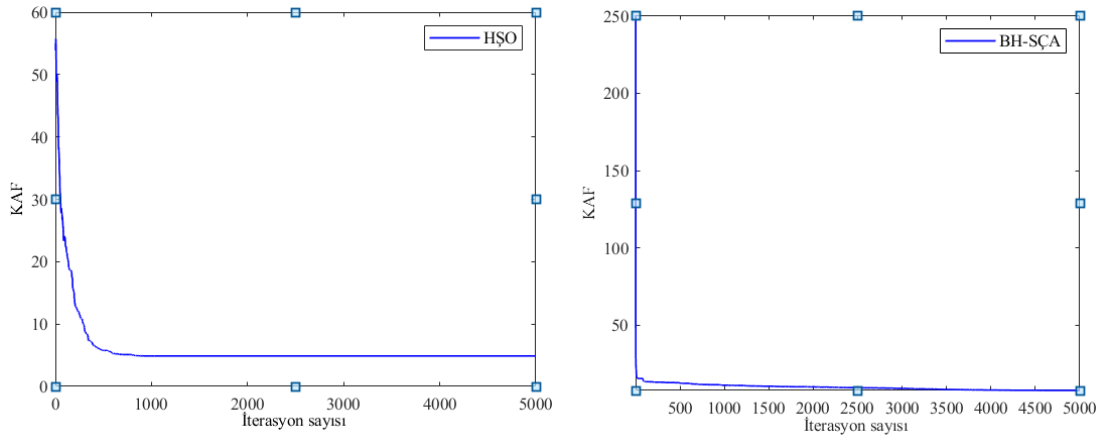
Röle	BH-SÇA		HŞO		Röle	BH-SÇA		HŞO	
	TDS	$I_p(A)$	TDS	$I_p(A)$		TDS	$I_p(A)$	TDS	$I_p(A)$
1	0,111	196	0,0704	481,9	14	0,0267	748,2	0,0551	507,4
2	0,025	383	0,025	410,7	15	0,032	711,4	0,0786	331,8
3	0,0392	748,7	0,1025	167,7	16	0,033	528,5	0,0422	502
4	0,0264	27,5	0,025	131,2	17	0,055	551,67	0,0538	549,2
5	0,1024	400,6	0,0272	474,15	18	0,025	582,31	0,025	681
6	0,0629	200,2	0,0351	520,2	19	0,027	707,8	0,0566	518,4
7	0,1533	97,85	0,0483	488	20	0,025	513,6	0,025	515,3
8	0,1239	137,29	0,0302	474,15	21	0,0251	786,5	0,0591	551,65
9	0,1296	72,25	0,0414	537,5	22	0,025	1028,1	0,0477	551,65
10	0,2331	36,67	0,124	124,5	23	0,05	646,03	0,0363	693
11	0,025	434,9	0,0482	236,8	24	0,044	633,29	0,025	700
12	0,0754	371,34	0,0442	423,7	AF(s)	4,3607	748,2	3,9947	
13	0,0297	545,5	0,1208	153,6					

Tablo 2. 9-bara test sisteminde röle çalışma süresinin karşılaştırılması (Comperison of operating time in 9-bus test system)

Metot	AF	Metot	AF	Metot	AF
BH-SÇA	4,3607	FFA [22]	6,340	MWCA [21]	3,707
HŞO	3,9947	CSA [22]	5,180	MEFO [21]	6,088
GA [22]	7,4947	HAS [22]	4,9046	BBO [21]	5,243

**Tablo 3.** 9-bara test sistemi için rölelerin çalışma ve CTI süreleri (Relay Operating times and CTI for the 9-bus test system)

İleri Röle	Geri Röle	BH-SÇA			HŞO		
		<i>Op, zmn (s)</i>	<i>Op, zmn (s)</i>	<i>CTI</i>	<i>Op, zmn (s)</i>	<i>Op, zmn (s)</i>	<i>CTI</i>
1	15	0,242	0,45	0,208	0,2084	0,4317	0,2233
1	17	0,242	0,448	0,206	0,2084	0,4364	0,228
2	4	0,1189	0,3189	0,2	0,125	0,3381	0,2131
3	1	0,2051	0,407	0,201	0,2474	0,47	0,2226
4	6	0,038	0,2388	0,2	0,0568	0,2843	0,2275
5	3	0,474	0,674	0,2	0,142	0,369	0,227
6	8	0,1384	0,5189	0,3805	0,113	0,520	0,407
6	23	0,1384	0,474	0,3356	0,113	0,3816	0,2686
7	5	0,274	1,242	0,968	0,1536	0,467	0,3134
7	23	0,274	0,474	0,2	0,1536	0,3816	0,228
8	10	0,26	0,46	0,2	0,158	0,3859	0,2259
9	7	0,2139	0,4139	0,2	0,1372	0,3641	0,2269
10	12	0,3599	0,698	0,3381	0,2699	0,4972	0,2273
11	9	0,1304	0,3309	0,2005	0,2061	0,4334	0,227
12	14	0,2557	0,4557	0,2	0,1606	0,4589	0,2983
12	21	0,2557	0,7617	0,506	0,1606	0,3867	0,2261
13	11	0,1068	0,4288	0,322	0,2577	0,4836	0,2259
13	21	0,1068	0,3529	0,2461	0,2577	0,4859	0,2282
14	16	0,1072	0,3439	0,2367	0,1793	0,4074	0,2281
14	19	0,1072	0,325	0,2178	0,1793	0,4403	0,261
15	13	0,1247	0,3248	0,2001	0,2119	0,4357	0,2238
15	19	0,1247	0,325	0,2003	0,2119	0,4403	0,2284
16	2	0,1168	0,3268	0,21	0,1452	0,3756	0,2304
16	17	0,1168	0,3268	0,21	0,1452	0,4364	0,2912
17	-	0,1429			0,1396		
18	2	0,1268	0,3268	0,2	0,1436	0,3756	0,232
18	15	0,1268	0,3269	0,2001	0,1436	0,4317	0,2701
19	-	0,0787			0,1447		
20	13	0,1055	0,3248	0,2193	0,1058	0,4357	0,3299
20	16	0,1055	0,3439	0,2384	0,1058	0,4074	0,3016
21	-	0,0759			0,154		
22	11	0,219	0,4288	0,2098	0,2319	0,4836	0,2517
22	14	0,219	0,4193	0,2003	0,2319	0,4589	0,227
23	-	0,1362			0,102		
24	5	0,3189	1,242	0,92	0,201	0,469	0,268
24	8	0,3189	0,519	0,2001	0,201	0,52	0,319

**Şekil 2.** BH-SÇA ve HŞO için yakınsama eğrileri (Convergence characteristics of ER-WCA and HHO)

Tablo 2'te görüldüğü gibi röle süresi BH-SÇA kullanılarak 4,3607 saniye ve HŞO kullanılarak 3,9947 saniye olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, önerilen KAF'lı HŞO algoritması, KAF'lı BH-SÇA, GA, FFA, CSA, HAS, MEFO ve BBO ile karşılaştırıldığında iyi sonuç elde etmiştir. Tablo 3'de, BH-SÇA ve HŞO tarafından hesaplanan CTI değerlerinin her durumda kısıtlamaları karşıladığı görülmektedir.

#### 4. ADAPTİF KORUMA YÖNTEMİ (ADAPTIVE PROTECTION METHOD)

Geleneksel koruma yöntemleri bazen DÜ içeren güç sistemleri için yetersizdir. Bu tür koruma sorunlarını önlemek için, güç sistemlerinde yeni koruma yöntemleri önerilmelidir. Bu çalışmada HŞO algoritması kullanılarak değişen koruma ayarlarını belirlemek için AAS mekanizmalı uyarlanabilir YAAR modeli önerilmiştir.

##### 4.1. Arıza akım sınırlayıcı mekanizmalı optimal adaptif koruma yöntemi (Optimal adaptive protection method with fault current limiting mechanism)

Güç sistemlerinde kısa devre arızalarından kaynaklanan zararları önleme çalışmaları yıllardır devam etmektedir. Bu çalışmaların temel amacı kısa devre akımını sınırlamak ve jeneratör çıkış voltajını hata öncesi değerinin üzerine çıkarmaktır. Güç sistemlerindeki kısa devre akımları yalıtım ekipmanına, koruma elemanlarına, sistem yüklerine ve koruma koordinasyonuna... (vb.) zarar verebilir [23]. Bu durumda, güç sisteminde bara kısa devre arıza akımlarını gözlemleyerek kısa devre arıza akımlarının limit değerlere ulaşmasını sınırlamak önemlidir [23]. Güç sistemlerinde arıza akımlarının sınırlanmasında kritik arıza noktalarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada genel olarak aynı anda hem akım hem de gerilim indeksini baz alan bir formülasyon ile kritik arıza noktasının belirlenmesine çalışılmıştır. Daha sonra güç sisteminde belirlenen kritik arıza noktalarında arıza akımı sınırlaması için seri reaktörler kullanılmıştır. Seri reaktörler çoğu durumda kısa devre akımını sınırlayan tek çözüm olabilir [24]. Referans [25]'de verilen eşitlik akım endeksi belirlemek için kullanılır. Genel olarak arızadan sonra jeneratör geriliminin normal işletme voltajına yükseltilmesi önemlidir. Bu çalışmada literatürden farklı olarak gerilim endeksi değeri tanımlanarak, akım endeksi ile birlikte dikkate alınmıştır. Böylece, Eş. 10 (akım endeksi) [25] ve 11 (bu çalışmada önerilen gerilim endeksi,) birlikte değerlendirilerek, güç sisteminde seri reaktör yerleşimi için uygun yerler belirlenir. Bu çalışmada literatürdeki benzer çalışmalarda olduğu gibi güç sistemlerindeki en zor koşullar olan üç fazlı kısa devre arızaları dikkate alınmış ve analizlerde aşağıda verilen 3 faz kısa devre akım değerleri kullanılmıştır.

$$K_k = Imaks' . asum_k \quad (10)$$

$$V_k = sum(V_{DGpf,n} - V_{DGaf,n}) \quad (11)$$

$$a_k = (Imaks_n - Inom_n)/Inom_n \quad (12)$$

$$asum_k = \sum_{k=1}^n ak \quad (13)$$

Eş. 12'de  $a_k$  k. arıza noktasındaki n. jeneratörün arıza akımının artış oranıdır,  $Imax_n$  k. arıza noktasındaki n. jeneratörün maksimum arıza akımı iken;  $Inom_n$  n. jeneratörün nominal akımıdır. Eş. 13'de  $asum_k$  k. arıza noktasındaki toplam arıza akım artış oranıdır. Eş. 10'da  $K_k$  kritik akım endeksini ifade ederken,  $Imax'$  k. arıza noktasındaki tüm jeneratörler (ilgili arıza noktası) arasındaki en yüksek maksimum arıza akım değerini gösterir. Eşitlik 11'de  $V_k$ , gerilim kritik indeksidir.  $V_{DGpf}$  n. jeneratöre ait arıza öncesi gerilim değeri iken,  $V_{DGaf}$  arıza sonrası gerilim değeridir. Simülasyon uygulamasında ilgili iletim hattı için kısa devre arızasının iletim hattının tam orta noktasında olduğu kabul edilmiştir. Kısa devre analizleri DigSilent yazılımında [26] oluşturulmuş ve farklı iletim hatlarına ayrı ayrı 3 Faz Toprak kısa devre arızaları uygulanarak, önerilen yönteme göre en kritik arıza noktasının bulunması amaçlanmıştır. Bu çalışmada önerilen kritik arıza noktasının belirlenmesine ait akış diyagramı Şekil 3'de görüldüğü gibidir.

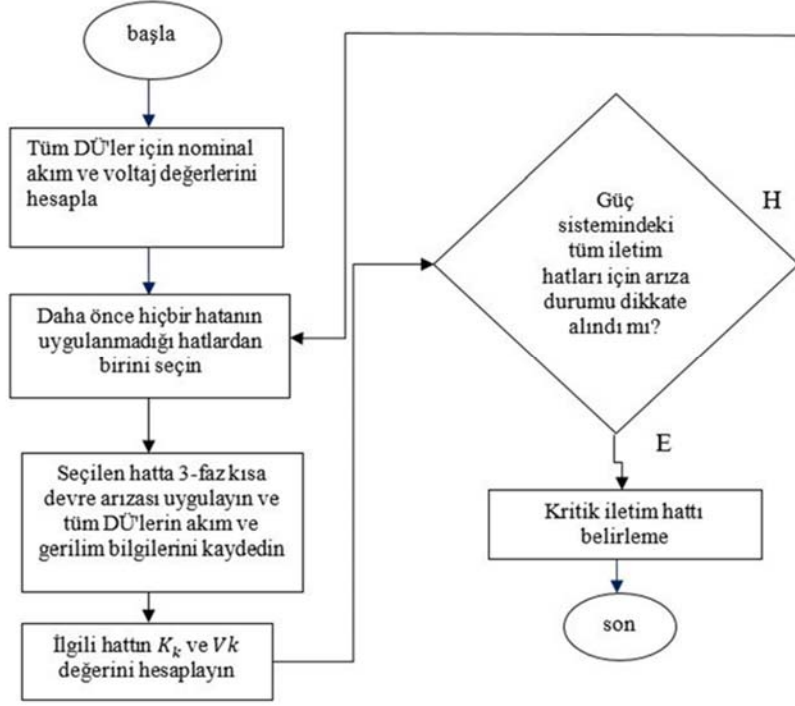
##### 4.2. 10 Bara Türkiye dağıtım sistemi (10 bus Turkey distribution system)

Adaptif korumanın gerçekleştirileceği 10-bara test sistemi Şekil 4'de görüldüğü gibi, DigSilent PowerFactory simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiştir [26]. Bu test sistemi 3 DÜ, 1 transformatör, 10 bara, 6 hat ve 12 röleden (yönlü aşırı akım rölesi) oluşur. 1 ve 2 numaralı baralar arasında 154 / 34,5 kV (62,5 MVA-% 10,62 uk) güç transformatörü bulunmaktadır. Bara 3, Bara 5 ve Bara 6'da bulunan DÜ'lerin kurulu gücü sırasıyla 15 MW, 15 MW ve 20 MW'dir. Bu güç sisteminin hat parametreleri Tablo 4'de verilmiştir. Yük parametreleri ise Yük1; 15 MW/0,4 MVAR, Yük 2; 11 MW/0,5 MVAR, Yük 3; 11MW/1,1 MVAR, Yük4; 7 MW/0,8 MVAR, Yük5; 5 MW/ 1,02 MVAR'dır.

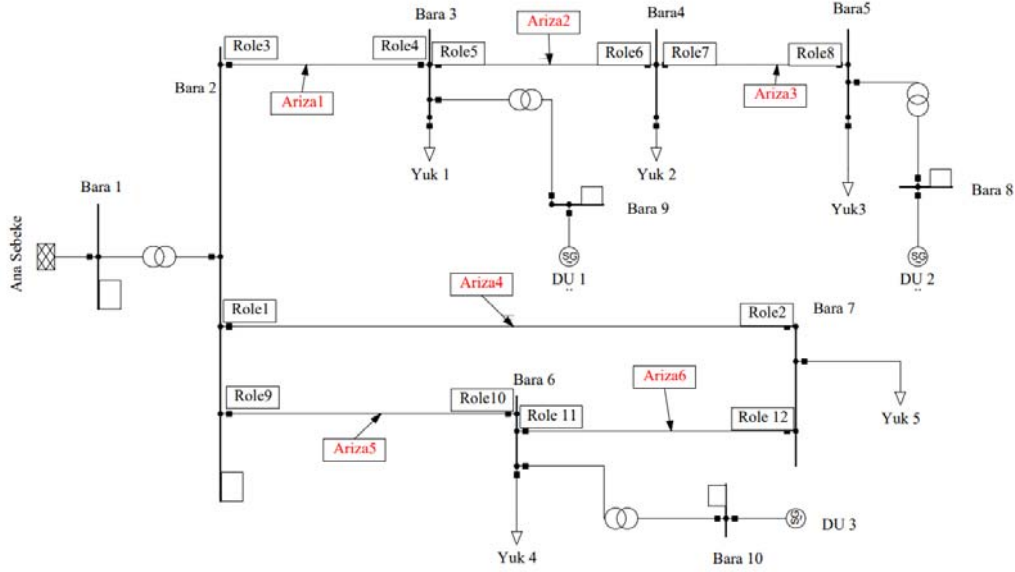
##### 4.3. Önerilen Adaptif Koruma Yöntemi (Proposed Adaptive Protection Method)

Günümüzde DÜ barındıran güç sistemlerinde geleneksel korumalar yeterli gelmeyebilir [27]. Bu nedenle, DÜ barındıran güç sistemlerinde değişen işletme koşullarına göre adaptif koruma yapılabilir. Bu bölümde, yeni bir adaptif koruma yapısı önerilmiş ve Türkiye güç şebekesinin 10-bara test sisteminin sanal modelinde (yaklaşık modeli) denenmiştir. Önerilen adaptif koruma yapısında, DÜ'lerin durumuna göre 4 çalışma modu belirlenmiştir. Bu adaptif koruma metodunda mod 2'de, önerilen kritik arıza bulma metodu göz önüne alınarak kısa devre arıza limitlenmesi gösterilmiştir. Ayrıca adaptif koruma metodunda HŞO yöntemiyle YAAR-parametrelerinin bulunmasında KAF kullanılmıştır (Eşitlik 8). Önerilen adaptif koruma yönteminin akış diyagramı Şekil 5'de verilmiştir.

Adaptif koruma metodunda kullanılan HŞO algoritmasına ait sözde kod Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 3. AAS mekanizmasına ait akış diyagramı (Flow diagram of the FCL mechanism)

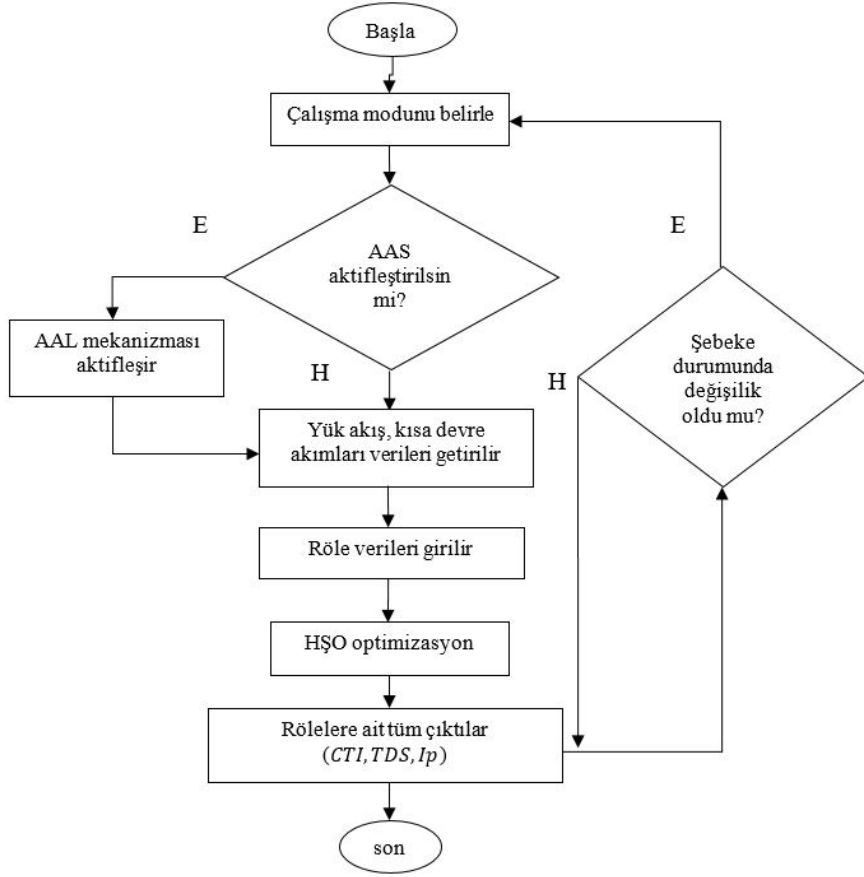


Şekil 4. 10 bara Türkiye dağıtım sistemi (10 bus Turkey distribution system)

Tablo 4. 10-bara Türkiye dağıtım sistemine ait hat parametreleri (Line data of a 10-bus test system of Turkey power network)

Bara baş.	Bara bitiş	R (ohm/km)	X (ohm/km)	B ( $\mu$ S/km)	km
2	3	0,3358	0,381	4,105	16,1
3	4	0,3358	0,381	4,105	3,6
4	5	0,3358	0,381	4,105	16,25
2	7	0,3358	0,381	4,105	5,45
2	6	0,3358	0,381	4,105	5,7
6	12	0,3358	0,381	4,105	5,32





Şekil 5. Adaptif koruma yapısına ait akış diyagramı (Flow diagram of the adaptive protection scheme)

Çalışma modu dağıtılmış üretim sistemlerinin konumuna göre belirlenir  
 Baraların kısa devre akım değerleri çalışma modlarına göre sağlanır  
 Girişler:  $N$  popülasyon boyutu,  $T$  iterasyon sayısı  
 Rastgele popülasyon başlatılır  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )  $X_i$  röleye girilecek ayarları temsil eder  
 while (durma koşulu sağlanmadığında) do  
   Her şahinin optimum değerini hesapla  
    $X_{rabbit/prey}$  tavşanın yeri olarak ayarla(en iyi konum)  
   for (her şahin için ( $X_i$ )) do  
     Başlangıç enerjisi  $E_0$  ve kaçma gücü  $J$  güncelleyin  
      $E_0 = 2 \cdot rand() - 1$ ,  $J = 2(1 - rand())$   
      $E^i$  yi güncelleyin  
     if ( $|E| \geq 1$ ) olursa  $\triangleright$  Keşif aşaması  
       konum vektörünü güncelle  
     if ( $|E| < 1$ ) olursa  $\triangleright$  Sömürge Aşaması  
       if ( $r \geq 0.5$  and  $|E| \geq 0.5$ ) olursa  $\triangleright$  Yumuşak kuşatma  
         konum vektörünü güncelle  
       else if ( $r \geq 0.5$  and  $|E| < 0.5$ ) olursa  $\triangleright$  Sert kuşatma  
         konum vektörünü güncelle  
       else if ( $r < 0.5$  and  $|E| \geq 0.5$ ) olursa  $\triangleright$  Yumuşak kuşatma  
         hızlı dalgımlarla yumuşak kuşatma  
         konum vektörünü güncelle  
       else if ( $r < 0.5$  and  $|E| < 0.5$ ) then  $\triangleright$  Sert kuşatma  
         hızlı dalgımlarla sert kuşatma  
         konum vektörünü güncelle  
   Return  $X_{rabbit}$ ; Röle ayarları getirilir

Şekil 6. HŞO algoritmasına ait söz kod (The pseudo code of the HHO algorithm)

## 4.4. Test Sonuçları (Test Results)

Bu çalışmada, önerilen adaptif röle koordinasyonu için HŞO parametreleri;  $N_{pop} = 50$ ,  $Maksimum\_İterasyon = 500$  ve  $UB$  (Üst değer) =  $2LB$  (Alt değer) =  $0,05$  seçilmiştir. TDS için röle kısıtlamaları  $0,05-1,1$  arasında ve  $CTI$  için  $0,2-2,2$  saniye arasında alınmıştır. Tüm çalışma modları için MATLAB platformu, önerilen adaptif koruma algoritması için kullanılır. Adaptif koruma yapısı, farklı çalışma koşulları dikkate alınarak geliştirilmiştir. Her çalışma modu için hata noktalarında 3 fazlı kısa devre arızaları sanal modelde üretilir ve sonuçlar gözlemlenir. Bu röle koordinasyon problemi için toplam 24 değişken ve 32 kısıtlama dikkate alınmıştır.

Aşağıdaki alt bölümlerde 4 çalışma modu açıklanmaktadır.

## Mode 1

Mod 1'de dağıtım sistemi ana şebekeye bağlanır ve tüm DÜ'ler etkinleştirilir. Arıza akımı verileri ve bu çalışma modunun ana karakteristikleri Tablo 5'de verilmiştir. Ardından, röle ayar değerleri adaptif koruma algoritmasına göre hesaplanır ve röle koordinasyonu sağlanır. Bu güç sisteminde bulunan optimum röle ayarları Tablo 6'deki gibidir. Bu durumda önerilen adaptif röle algoritması kullanılarak elde edilen birincil ve yedek rölelerin /  $CTI$ 'nin çalışma süreleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6'da, 10-bara test sistemindeki toplam röle açılma süresi  $3,53$  s olarak bulunmuştur. Tablo 7'de, algoritma tarafından bulunan  $CTI$  değerlerinin her durumda kısıtlamaları sağladığını görülmektedir. Örneğin, Röle 5 ile

**Tablo 5.** Mod 1 için 10-bara test sistemi birincil / yedek rölelerin arıza akım verileri ve akımlarının temel özellikleri  
(The main characteristics of the and Primary/backup relays and fault currents for the 10-bus test system for Mode 1)

Birincil Röle	$I_f(A)p$	Yedek Röle	$I_f(A)b$	Röle no	$I_p(A)min$	$I_p(A)max$
1	5600	-	-	1	750	1010
2	2102	-	-	2	721	940
3	3588	-	-	3	640	1000
4	1457	6	1457	4	640	842
4	1457	8	586	5	240	1000
5	1980	3	1980	6	240	456
6	2152	8	864	7	220	635
7	2007	5	1151	8	180	635
7	2007	3	1151	9	590	1020
8	1137	-	-	10	580	1030
9	5682	-	-	11	145	1030
10	1596	12	1596	12	145	1030
11	2648	9	2648			
12	3484	-	-			

**Tablo 6.** Mod 1 için optimum röle ayarları (Optimal relay settings for Mode 1)

Röle no	$I_p(i) A$	$TDS$	Röle no	$I_p(i) A$	$TDS$
1	1000	0,05	7	220	0,05
2	723,4	0,05	8	511,7	0,132
3	705,7	0,063	9	887,1	0,0501
4	640	0,05	10	580	0,05
5	434,4	0,05	11	145,9	0,05
6	454,2	0,1047	12	198	0,165
$KAF(s)$	3,53				

**Tablo 7.** Mod 1 için rölelerin çalışma ve  $CTI$  süreleri (Operating times and  $CTI$  for Mode 1)

Birincil röle	Yedek röle	Mod 1			Birincil röle	Yedek röle	Mod 1		
		(s)	(s)	$CTI$			(s)	(s)	$CTI$
1	-	0,199	-	-	7	5	0,154	0,355	0,201
2	-	0,324	-	-	7	3	0,154	0,906	0,752
3	-	0,269	-	-	8	-	0,434	-	-
4	6	0,421	0,621	0,2	9	-	0,185	-	-
4	8	0,421	2,159	1,362	10	12	0,342	0,542	0,2
5	3	0,227	0,427	0,2	11	9	0,117	0,317	0,2
6	8	0,464	0,664	0,20	12	-	0,39	-	-

korunan iletim hattında (ileri yönde) bir hata oluşursa ve röle 5 (0,227 s) aktif değilse, bu hattı koruyan yedek röle 3 (0,427 s) hatayı gidermek için 0,2 s'lik bir gecikme ile çalışır. Böylece arızadan sonra ilgili röle veya röleler en hızlı şekilde devreye girer ve koruma sağlanır.

### Mod 2

Mod 2'de dağıtım sistemi ana şebekeye bağlanır ve tüm DÜ'ler etkinleştirilir. Mod 2'de Mod 1'den farklı olarak AAS mekanizması etkinleştirilmiştir. Şekil 5'de verilen akış diyagramına göre bu dağıtım sisteminde kritik arıza noktaları belirlenmeye çalışılmıştır. Öncelikle, kısa devre arıza akımları Şekil 4'de belirtilen arıza noktalarına uygulandığında DÜ'lerin bulunduğu baradaki voltaj değişiklikleri Tablo 8'de verildiği gibi olur. Sonrasında Eş. 10-Eş. 13'e göre 10 baralı 6 iletim hattı barındıran bu güç sistemindeki  $K_{ij}$  (akım indeksi) ve  $V_{ij}$  (gerilim indeksi) değerleri hesaplanır. Hesaplanan bu değerler topluca Çizelge Tablo 9'da verilmiştir. Tablo 9 incelendiğinde, kritik akım endeksi için en yüksek değerler sırasıyla  $K_{26}$ ,  $K_{23}$ ,  $K_{27}$ ,  $K_{34}$ ,  $K_{45}$ ,  $K_{67}$  iken kritik gerilim indeksi için  $V_{26}$ ,  $V_{27}$ ,  $V_{23}$ ,

$V_{34}$ ,  $V_{45}$ ,  $V_{67}$  olmuştur. Bu verilere göre bu dağıtım sisteminde kritik arıza noktaları hat 2-6 ve 2-7 olarak belirlenmiştir. Sonrasında bu noktalara DigSilent yazılımında seri reaktör eklenerek, arıza akımlarının limitlenmesi sağlatılmıştır. Arıza akımı limitlenmesi sonucu elde edilen kısa devre akım değerleri Tablo 10'da görüldüğü gibidir. Bu güç sisteminde bulunan optimum röle ayarları Tablo 11'deki gibidir. Bu durumda önerilen adaptif röle algoritması kullanılarak elde edilen birincil ve yedek rölelerin / CTI'nin çalışma süreleri Tablo 12'de verilmiştir.

Maksimum kısa devre akımları AAS mekanizması olmadan Röle1 (5600A) ve Röle 9 (5682A) için hesaplanmıştır (bkz. Tablo 5). AAS etkinleştirildiğinde, bu değerler sırasıyla 3405A, 3400A'ya düşürülür (bkz. Tablo 10). Böylece, bu mod için önerilen AAS mekanizması başarılı sonuç vermiştir. Tablo 11'de verilen optimal röle ayarları, Tablo 10'daki kısıtlamalara göre adaptif koruma algoritması ile hesaplanmaktadır. Bu durum için önerilen adaptif röle algoritması kullanılarak elde edilen birincil ve yedek rölelerin / CTI'nin çalışma süreleri Tablo 12'de verilmiştir. Böylece AAS aktifleştirilmeden 3,53 s olarak hesaplanan

**Tablo 8.** Kısa devre öncesi ve sonrası jeneratör bara gerilimleri (Voltage changes in generator buses before and after short-circuit)

Arıza noktası	DÜ1 (pu)		DÜ2 (pu)		DÜ3(pu)	
	$V_{DGpf}$	$V_{DGaf}$	$V_{DGpf}$	$V_{DGaf}$	$V_{DGpf}$	$V_{DGaf}$
1.1	1	0,56	1	0,75	1	0,84
1.2	1	0,49	1	0,57	1	0,96
1.3	1	0,54	1	0,49	1	1
1.4	1	0,83	1	0,94	1	0,32
1.5	1	0,84	1	0,94	1	0,47
1.6	1	0,9	1	0,98	1	0,4

**Tablo 9.** 10-bara Türkiye dağıtım sistemine ait  $K_{ij}$  ve  $V_{ij}$  değerleri ( $K_{ij}$  and  $V_{ij}$  data of 10-bus test system of Turkey power system)

Hat	$K_k$	$V_k$	Hat	$K_k$	$V_k$
Hat23	7,24	0,85	Hat27	7,99	0,91
Hat34	5,68	0,98	Hat26	7,46	0,75
Hat45	5,81	0,97	Hat67	5,43	0,702

**Tablo 10.** Mod 2 için 10-bara test sisteminde birincil / yedek rölelerin arıza akım verileri ve akımlarının temel özellikleri (The main characteristics of the Primary/backup relays and fault currents for the 10-bus test system for Mode 2)

Birincil Röle	$I_f(A)_p$	Yedek Röle	$I_f(A)_b$	Röle no	$I_p(A)_{min}$	$I_p(A)_{max}$
1	3405	-	-	1	560	1010
2	2300	-	-	2	465	1020
3	3581	-	-	3	460	1010
4	1458	6	1458	4	460	830
4	1458	8	586	5	168	1130
5	1978	3	1978	6	165	440
6	2152	8	864	7	116	650
7	1812	5	1150	8	116	650
7	2000	3	1150	9	525	1050
8	1137	-	-	10	525	1040
9	3400	-	-	11	132	1040
10	1867	12	1867	12	132	1040
11	2108	9	2108			
12	3000	-	-			

röle açma zamanı, AAS aktifleştirildiğinde 3,311 s olarak hesaplanmıştır.

### Mod 3

Mod 3'de DÜ1 ve DÜ2 etkinleştirilir. Arıza akımı verileri ve bu çalışma modunun ana özellikleri Tablo 13'de verilmiştir.

Sonrasında bu verilere göre adaptif koruma algoritmasında röle ayar parametreleri hesaplanır. Hesaplanan röle ayar parametreleri Tablo 14'de verildiği gibidir. Bu modda önerilen adaptif röle algoritması kullanılarak, elde edilen birincil ve yedek rölelerin / CTI'nin çalışma süreleri Tablo 15'de verilmiştir. Örneğin, Röle 6 ile korunan hatta (ileri yönde) bir arıza olursa ve röle 6 (0,326 s) bu arızada

**Tablo 11.** Mod 2 için optimum röle ayarları (Optimal relay settings for Mode 2)

Röle no	$I_p(i)$ A	TDS	Röle no	$I_p(i)$ A	TDS
1	1000	0,05	7	116	0,05
2	465	0,05	8	121	0,178
3	978,5	0,05	9	694,09	0,051
4	460	0,05	10	525	0,05
5	199,5	0,081	11	132,5	0,05
6	173	0,155	12	823	0,055
KAF	3,311				

**Tablo 12.** Mod 2 için rölelerin çalışma ve CTI süreleri (Operating times and CTI for Mode 2)

Birincil röle	Yedek röle	Mod 2			Birincil röle	Yedek röle	Mod 2		
		(s)	(s)	(CTI)			(s)	(s)	(CTI)
1	-	0,282	-	-	7	5	0,119	0,319	0,20
2	-	0,215	-	-	7	3	0,119	2,1	1,981
3	-	0,266	-	-	8	-	0,544	-	-
4	6	0,3	0,5	0,2	9	-	0,224	-	-
4	8	0,3	0,79	0,49	10	12	0,272	0,472	0,2
5	3	0,242	0,49	0,248	11	9	0,123	0,323	0,2
6	8	0,421	0,621	0,2	12	-	0,297	-	-

**Tablo 13.** Mod 3 için 10 bara test sisteminde birincil / yedek rölelerin arıza akım verileri ve akımlarının temel özellikleri  
(The main characteristics of the Primary/backup relays and fault currents for the 10-bus test system for Mode 3)

Birincil Röle	$I_f(A)p$	Yedek Röle	$I_f(A)b$	Röle no	$I_p(A)min$	$I_p(A)max$
1	5471	-	-	1	550	1050
2	1084	-	-	2	550	940
3	3483	-	-	3	550	1040
4	1459	6	1459	4	285	555
4	1459	8	586	5	240	800
5	1938	3	1938	6	200	495
6	2152	8	864	7	190	553
7	1997	5	1134	8	190	640
7	1997	3	1134	9	468	1080
8	1137	-	-	10	460	1070
9	5359	-	-	11	130	1080
10	1121	12	1121	12	130	1040
11	2556	9	2556			
12	2634	-	-			

**Tablo 14.** Mod 3 için optimum röle ayarları (Optimal relay settings for Mode 3)

Röle No	$I_p(i)$ A	TDS	Röle No	$I_p(i)$ A	TDS
1	550,6	0,0576	7	191,1	0,05
2	550	0,05	8	388,75	0,0604
3	577,8	0,0742	9	1000	0,05
4	285	0,05	10	460	0,05
5	415,6	0,05	11	131,1	0,05
6	318,13	0,0907	12	619,9	0,0501
KAF	3,213				

etkinleştirilmezse, bu hattı koruyan yedek röle 8 (0,526 s) hatayı 0,2 sn zaman gecikmesi ile temizler. Böylece röle koordinasyonunda gerekli seçicilik sağlanır.

#### Mod 4

Mod 4'te önerilen adaptif röle koordinasyon algoritması, ada modunda mikro şebeke sistemi için röle koordinasyon problemini çözmek amacıyla kullanılır. Ada modunda, ağı

kısa devre arıza akım ve röle arıza başlatma akım değerlerinde önemli değişiklikler olacaktır. Arıza akımı verileri ve bu çalışma modunun ana karakteristikleri Tablo 16'da verilmiştir. Mod 4 için hesaplanan röle parametreleri Tablo 17 ve Tablo 18'de verilmiştir. Ada modunda, toplam röle açılma süresi 3,171 s olarak bulunmuştur. Örneğin, Röle 6 ile korunan dağıtım hattında (ileri yönde) bir hata oluşursa ve röle 6 (0,316 s) bu arızada etkinleşmezse, bu hattı koruyan yedek röle 8 (0,516 s) hatayı 0,2 saniye gecikme ile temizler.

**Tablo 15.** Mod 3 için rölelerin çalışma ve CTI süreleri (Operating times and CTI for Mode 3)

Birincil röle	Yedek röle	Mod 3			Birincil röle	Yedek röle	Mod 3		
		(s)	(s)	CTI			(s)	(s)	CTI
1	-	0,171	-	-	7	5	0,145	0,345	0,202
2	-	0,512	-	-	7	3	0,145	0,765	0,6
3	-	0,287	-	-	8	-	0,390	-	-
4	6	0,21	0,41	0,2	9	-	0,205	-	-
4	8	0,21	1,027	0,817	10	12	0,389	0,589	0,2
5	3	0,224	0,424	0,2	11	9	0,114	0,369	0,255
6	8	0,326	0,526	0,2	12	-	0,239	-	-

**Tablo 16.** Mod 4 için 10 bara test sisteminde birincil / yedek rölelerin arıza akım verileri ve akımlarının temel özellikleri  
(The main characteristics of the Primary/backup relays and fault currents for the 10-bus test system for Mode 2)

Birincil Röle	$I_f(A)_p$	Yedek Röle	$I_f(A)_b$	Röle no	$I_p(A)_{min}$	$I_p(A)_{max}$
1	1111	-	-	1	145	822
2	1269	-	-	2	155	425
3	1046	-	-	3	196	288
4	1466	6	1466	4	209	852
4	1466	8	589	5	158	888
5	851	3	851	6	178	452
6	2158	8	867	7	186	549
7	1594	5	589	8	188	292
7	1594	3	589	9	178	635
8	1139	-	-	10	172	859
9	1462	-	-	11	129	882
10	792	12	792	12	132	409
11	698	9	698			
12	1577	-	-			

**Tablo 17.** Mod 4 için optimum röle ayarı (Optimal relay settings for Mode 4)

Röle No	$I_p(i) A$	TDS	Röle No	$I_p(i) A$	TDS
1	145,4	0,0503	7	188,01	0,05
2	155,1	0,05	8	190,1	0,1137
3	196,19	0,1264	9	296,2	0,05
4	209	0,05	10	173,3	0,05
5	166,41	0,0658	11	129,05	0,05
6	178	0,1157	12	138,04	0,1084
KAF	3,171				

**Tablo 18.** Mod 4 için rölelerin çalışma ve CTI süreleri (Operating times and CTI for Mode 3)

Birincil röle	Yedek röle	Mod 4			Birincil röle	Yedek röle	Mod 4		
		(s)	(s)	CTI			(s)	(s)	CTI
1	-	0,169	-	-	7	5	0,16	0,36	0,2
2	-	0,163	-	-	7	3	0,16	0,796	0,636
3	-	0,519	-	-	8	-	0,436	-	-
4	6	0,176	0,376	0,2	9	-	0,215	-	-
4	8	0,176	0,696	0,52	10	12	0,226	0,426	0,2
5	3	0,278	0,594	0,316	11	9	0,203	0,403	0,2
6	8	0,316	0,516	0,2	12	-	0,304	-	-

Bu durum diğer rölelerde de görülmektedir. Böylece gerekli koruma koordinasyonu sağlanabilir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede röle koordinasyon problemi için literatürde verilen amaç fonksiyonuna röle ayar kısıtları bir ağırlık faktörü ile eklenerek, modifiye edilmiştir. Sonrasında, bu yayında önerilen KAF iki farklı röle koordinasyon problemine başarıyla uygulanmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde KAF'lı algoritma 9-bara test sistemine uygulanmıştır. Sonuçlar literatürdeki diğer güncel algoritmalar ile karşılaştırılmıştır (GA, FFA, CSA, HAS, MWCA, MEFO ve BBO). HŞO algoritması, hem BH-SÇA'dan hem de literatürdeki diğer tekniklerin genelinden daha iyi sonuç verdiği için çalışmanın ikinci bölümünde yeni sunulan adaptif koruma yönteminde kullanılmıştır. Bu yeni sunulan adaptif koruma yöntemi DÜ barından 10 bara Türkiye dağıtım sistemine uygulanmıştır. Önerilen adaptif koruma yapısında, güç sistemine eklenen DÜ'lerin durumuna göre 4 çalışma modu (ada modu dahil) belirlenmiştir. Bu adaptif koruma yapısında, ayrıca güç sistemlerinin herhangi bir yerinde meydana gelebilecek olan kısa devre arızasına karşı güç sisteminin kararlılığını en iyi şekilde sağlayacak olan, AAS ile teçhizatların yerleşim noktasının bulunmasına yardımcı olacak bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde, literatürden farklı olarak aynı anda akım ve voltajdaki artışı baz alan bir yöntem önerilerek, kritik arıza noktasının (hattın) bulunması amaçlanmıştır. Önerilen adaptif koruma yönteminde, ağ durumu bilgilerinin belirlenmesi, kısa devre akımlarının hesaplanması, DÜ'lerin durum bilgileri ve hem ağ hem de ada moduna göre seçicilik hesaplaması gibi tüm sistem parametreleri dikkate alınmıştır. Önerilen algoritmanın başarısı ve etkinliği çeşitli senaryolar ile test edilmiş ve değerlendirilmiştir. Böylece, bu çalışmada, güç sistemindeki koruma koordinasyonunu etkileyebilecek tüm değişkenlerden bilgi sağlayarak, aşırı akım rölelerinin açma süresi hesaplanabilir. Bu çalışmanın literatüre katkıları şöyle sıralanabilir; *i-* Röle koordinasyon probleminde röle ayar kısıtları ve röle koordinasyon kısıtlarının bir ağırlık faktörü ile eklendiği yeni bir amaç fonksiyonunu önerilmiştir. *ii-* Çoklu DG'li ağ yapısında dinamik koruma modeli sunulmuştur. Önceki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada gerçek bir güç sisteminin dinamik modeli kullanılmıştır. *iii-* Sunulan adaptif koruma yönteminde dağıtım sisteminde kritik arıza noktasını bulan yeni yaklaşım sunulmuştur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Wang Y., Huang Y., Wang Y., Zeng M., Li F., Wang Y., Zhang, Y. Energy management of smart micro-grid with response loads and distributed generation considering demand response, Journal of cleaner production, 197, 1069-1083, 2018.
2. Ates Y., Uzunoglu M., Karakas A., Boynuegri A.R., Nadar A., Dag, B., Implementation of adaptive relay coordination in distribution systems including distributed generation. Journal of Cleaner Production, 112, 2697-2705, 2016.
3. Mann B. J., Morrison I. F., Digital calculation of impedance for transmission line protection, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1, 270-279, 1971.
4. Udren E. A., Sackin M., Relaying features of an integrated microprocessor-based substation control and protection system, In Developments in Power System Protection, 97-101, 1980.
5. Elrafie H. B., Irving M. R., Linear programming for directional overcurrent relay coordination in interconnected power systems with constraint relaxation, Electric power systems research, 27 (3), 209-216, 1993.
6. Urdaneta A. J., Perez, L. G., Gomez, J. F., Feijoo, B., Gonzalez, M., Presolve analysis and interior point solutions of the linear programming coordination problem of directional overcurrent relays, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 23 (8), 819-825, 2001.
7. Birla D., Maheshwari R. P., Gupta H. O., A new nonlinear directional overcurrent relay coordination technique, and banes and boons of near-end faults based approach. IEEE transactions on power delivery, 21 (3), 1176-1182, 2006.
8. Swathika O. G., Hemamalini S., Graph Theory and Optimization Algorithms Aided Adaptive Protection in Reconfigurable Microgrid, Journal of Electrical Engineering & Technology, 15 (1), 421-431, 2020.
9. Orazgaliyev D., Tleubayev A., Zholdaskhan B., Nunna H. K., Dadlani A., Doolla S., Adaptive Coordination Mechanism of Overcurrent Relays using Evolutionary Optimization Algorithms for Distribution Systems with DGs. In 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 1-6, 2019.
10. Chabanloo R. M., Safari M., Roshanagh R. G., Reducing the scenarios of network topology changes for adaptive coordination of overcurrent relays using hybrid GA-LP. IET Generation, Transmission & Distribution, 12 (21), 5879-5890, 2018.
11. Lestari D. S., Pujiantara M., Purnomo M. H., Rahmatullah D., Adaptive YAAR coordination in loop distribution system with distributed generation using firefly algorithm-artificial neural network, In 2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), 579-584, 2018.
12. Tjahjono A., Anggriawan D. O., Faizin A. K., Priyadi A., Pujiantara M., Taufik T., Purnomo M. H., Adaptive modified firefly algorithm for optimal coordination of overcurrent relays. IET Generation, Transmission & Distribution, 11 (10), 2575-2585, 2017.
13. Mohammadi, R., Abyaneh, H., Razavi, F., Al-Dabbagh, M., & Sadeghi, S., Optimal relays coordination efficient method in interconnected power systems. Journal of Electrical Engineering, 61 (2), 75-83, 2010.
14. Akdag O., Yeroğlu C. Optimal directional overcurrent relay coordination using MRFO algorithm: a case study

- of adaptive protection of the distribution network of the Hatay province of Turkey. *Electric Power Systems Research*, 192, 2021.
15. Jangale M., Thakur K. D., Optimum Positioning of Superconducting Fault Current Limiter for Wind Farm Fault Current in Smart Grid, 2017 International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, 312-316, 2017.
  16. Kalage A. A., Ghawghawe N. D., Deokar T. V., Optimum Location of Superconducting Fault Current Limiter to Mitigate DG Impact, International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics, 1-4, 2016.
  17. Didier G., Lévêque J., Rezzoug A., A Novel Approach to Determine the Optimal Location of SFCL in Electric Power Grid to Improve Power System Stability, *IEEE Transactions On Power Systems*, 28(2), 2013.
  18. Mansour D. E. A., Yehia D. M., Analysis of 3-Phase Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems with Inhomogeneous Quenching, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28 (3), 2013.
  19. Sadollah A., Eskandar H., Bahreininejad A., Kim J. H., Water cycle algorithm with evaporation rate for solving constrained and unconstrained optimization problems, *Applied Soft Computing*, 30, 58-71, 2015.
  20. Heidari A. A., Mirjalili A., Faris H., Aljarah I., Mafarja M., Chen H., Harris hawks optimization: Algorithm and applications, *Future Generation Computer Systems*, 97, 849-872, 2019.
  21. Korashy A., Kamel S., Youssef A.R., Jurado F., Modified water cycle algorithm for optimal direction overcurrent relays coordination, *Applied Soft Computing*, 74, 10–25, 2019.
  22. Rajput V. N., Pandya K. S., K. A hybrid improved harmony search algorithm-nonlinear programming approach for optimal coordination of directional overcurrent relays including characteristic selection. *International Journal of Power and Energy Conversion*, 9 (3) 228-253, 2018.
  23. Ngoc P. T., Singh J. G., Short circuit current level reduction in power system by optimal placement of fault current limiter, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27 (12), e2457, 2017.
  24. Cakal G., Bagriyanik F. G., Bagriyanik M., The effect of fault current limiters on distribution systems with wind turbine generators, *Int. J. Renew. Energy Res.*, 3 (1), 2013.
  25. Ayvaz A., Ayvaz B. B., Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızalarına karşı akım sınırlayıcı yapısının en uygun yerleşim yerinin belirlenmesi, *Sakarya University Journal of Science*, 2 (2), 613-621, 2018.
  26. PowerFactory (EN), 2018. User (accessed 01.05.2019) M.   
 <http://www.digsilent.de/index.php/downloads.html>. Yayın tarihi Temmuz 7, 2017. Erişim tarihi Kasım 11, 2019.
  27. Teke A., Yıldırım E., Distributed solar power application effects on short circuit protection in distributed generation-new techniques for short circuit protection in distributed generation, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 34 (4), 2141-2158, 2019.

