



## OPTİMAL REAKTİF GÜÇ DAĞITIMI İÇİN KIR KURDU OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Uğur GÜVENÇ<sup>1</sup>, Okan BİNGÖL<sup>2</sup>, Burçin ÖZKAYA<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye  
<sup>2,3\*</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

| Anahtar Kelimeler  | Öz  |
|--|---|
| <i>Güç Sistemleri,<br/>Optimal Reaktif Güç<br/>Dağıtımı,<br/>Optimizasyon,<br/>Kır Kurdu Optimizasyon<br/>Algoritması.</i> | Optimal reaktif güç dağıtım problemi, sürekli ve ayrık kontrol değişkenlerini içeren doğrusal olmayan ve dışbükey olmayan bir optimizasyon problemidir. Bu çalışmada, kır kurdu optimizasyon algoritmasının optimal reaktif güç dağıtım problemine uygulaması sunulmuştur. Kır kurdu optimizasyon algoritması, optimal reaktif güç dağıtım problemi için IEEE-30 ve IEEE-50 baralı sistemlerde test edilmiştir. Benzetim sonuçları, literatürde verilen SHADE-EC algoritmasının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, optimal reaktif güç dağıtım problemini çözmek için kır kurdu optimizasyon algoritmasının üstünlüğünü ve doğruluğunu göstermiştir. |

## COYOTE OPTIMIZATION ALGORITHM FOR OPTIMAL REACTIVE POWER DISPATCH

| Keywords  | Abstract   |
|---|--|
| <i>Power Systems,<br/>Optimal Reactive Power<br/>Dispatch,<br/>Optimization,<br/>Coyote Optimization<br/>Algorithm.</i> | The optimal reactive power dispatch problem is a nonlinear and non-convex optimization problem containing both continuous and discrete control variables. In the study, coyote optimization algorithm is applied to optimal reactive power dispatch problem. Coyote optimization algorithm is tested on IEEE-30 and IEEE-57 bus test systems for the optimal reactive power dispatch problem. The simulation results are compared with the results of SHADE-EC algorithm given in the literature. The comparison results demonstrate the superiority and accuracy of the coyote optimization algorithm to solve the optimal reactive power dispatch problem. |

### Alıntı / Cite

Güvenç, U., Bingöl, O., Özkaya, B., (2020). Optimal Reaktif Güç Dağıtımı için Kır Kurdu Optimizasyon Algoritması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(5), 1-10.

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process  |            |
|--|----------------------------------|------------|
| U. Güvenç, 0000-0002-5193-7990           | Başvuru Tarihi / Submission Date | 26.11.2020 |
| O. Bingöl, 0000-0001-9817-7266           | Revizyon Tarihi / Revision Date  | 16.12.2020 |
| B. Özkaya, 0000-0002-9858-3982           | Kabul Tarihi / Accepted Date     | 16.12.2020 |
|  | Yayın Tarihi / Published Date    | 29.12.2020 |

### 1. Giriş (Introduction)

Optimal reaktif güç dağıtımı (Optimal Reactive Power Dispatch, ORPD), güç sistemlerinde eşitlik ve eşitsizlik kısıtları içerisinde sürekli ve ayrık kontrol değişkenlerini içeren karmaşık bir optimizasyon problemidir (Yan vd., 2004; AlRashidi ve El-Hawary, 2009; Mallipeddi vd., 2012). Geçmişten günümüze bu problemin çözümü için, kuadratik programlama (Quintana ve Santos-Nieto, 1989), doğrusal programlama (Alsac vd., 1990), iç nokta yöntemi (Granville, 1994), Newton yaklaşımı (Bjelogrlic vd., 1990) gibi farklı klasik matematiksel yöntemler kullanılmıştır. Ancak, problemin çözümünde bu yaklaşımların yerel minimuma takılma durumu bir dezavantaj olarak ortaya çıkmıştır. Bu dezavantajdan dolayı, ORPD probleminin çözümü için literatürde sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır (Duman vd., 2012; Mandal ve Roy, 2013; Singh vd., 2015; Basu, 2016).

\* İlgili yazar / Corresponding author: [burcinozkaya@isparta.edu.tr](mailto:burcinozkaya@isparta.edu.tr), +90-246-214-6832

Literatürde araştırmacılar, sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanarak ORPD problemini çözmek için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Dai vd. (2009), bir güç sistemindeki aktif güç kaybını en aza indirmek için arayıcı optimizasyon algoritmasını (Seeker Optimization Algorithm, SOA) kullanmıştır. Başka bir çalışmada, Li vd., (2009) aktif güç kaybını minimize etmek için parçacık sürü optimizasyon (Particle Swarm Optimization, PSO) algoritması temelli bir hibrit algoritma önermiştir. Mahadevan ve Kannan (2010), güç sistemlerinde aktif güç kayıplarını azaltmak için kapsamlı öğrenme tabanlı parçacık sürü optimizasyon (Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization, CLPSO) algoritmasını önermiştir. Khazali ve Kalantar (2011), gerilim kararlılığını iyileştirmek, yük baralarındaki gerilim sapsmasını ve iletim hattı kayıplarını minimize etmek için uyum arama algoritmasını (Harmony Search Algorithm, HSA) kullanmıştır. Khorsandi vd. (2011), bir iletim hattındaki aktif güç kayıplarını azaltmak için karışık kurbağa sıçrama algoritması (SFLA) ve Nelder-Mead Simpleks arama algoritmalarını birleştiren hibrit bir algoritma önermiştir. Duman vd. (2012) gerilim profilini iyileştirmek, aktif güç kayıplarını azaltmak ve gerilim kararlılığını iyileştirmek için yerçekimi arama algoritmasını (Gravitational Search Algorithm, GSA) kullanmıştır. Liang vd. (2015), optimal reaktif ve aktif güç dağıtım problemlerini çözmek için geliştirilmiş ateş böceği algoritmasını (Enhanced Firefly Algorithm, EFA) önermiştir. Rajan ve Malakar (2015), aktif güç kaybını ve gerilim sapsmasını minimize etmek için ateş böceği algoritması (Firefly Algorithm, FA) ve Nelder-Mead Simpleks arama algoritmasını birleştiren hibrit bir algoritma önermiştir. Sulaiman vd. (2015) gerilim sapsmasını ve aktif güç kaybını minimize etmek için gri kurt algoritmasını (Grey Wolf Optimizer, GWO) kullanmıştır. Biswas vd. (2019), ORPD problemini çözmek için diferansiyel evrim (DE) algoritmasının gelişmiş bir versiyonu olan başarı geçmişi tabanlı uyarlanabilir diferansiyel evrim (Success History based Adaptive Differential Evolution, SHADE) algoritmasını önermiştir. Başka bir çalışmada, aktif güç kaybını azaltmak, gerilim kararlılığını iyileştirilmek ve yük baralarındaki gerilim sapsmasını minimize etmek için geliştirilmiş sosyal örümcek algoritmasını (Improved Social Spider Optimization, ISSO) önermiştir (Nguyen ve Vo, 2019).

Bu çalışmada, kır kurdu optimizasyon algoritmasının (Coyote Optimization Algorithm, COA) güç sistemlerinde ORPD problemine uygulaması sunulmuştur. Çalışmada kullanılan amaç fonksiyonları, aktif güç kayıplarının ve yük baralarındaki gerilim sapsmasının minimize edilmesidir. COA, IEEE-30 ve IEEE-50 baralı test sistemlerinde farklı durumlar için test edilmiştir. Benzetim sonuçları, Biswas vd. (2019) makalesinde verilen SHADE-EC algoritmasının sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu makalede, amaç fonksiyonları ve kısıtlar ikinci bölümde, COA algoritması üçüncü bölümde, dördüncü bölümde benzetim sonuçları ve beşinci bölümde ise sonuçlar yer almaktadır.

## 2. Problemin Tanımı (Definition of the Problem)

ORPD' nin amacı, eşitlik ve eşitsizlik kısıtları içerisinde, aktif güç kaybının ve yük baralarındaki gerilim sapsmasının minimize edilmesidir (Li vd., 2009; Mahadevan ve Kannan, 2010; Duman vd., 2012; Biswas vd., 2019).

### 2.1. Amaç Fonksiyonları (Objective Functions)

(i) *Aktif Güç Kayıplarının Minimizasyonu*: İletim hatlarındaki aktif güç kaybının matematiksel gösterimi Eşitlik (1)' de verilmiştir.

$$F_1 = \min(P_{loss}) = \sum_{k=1}^{NTL} g_{k(ij)} [(V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j))] \quad (1)$$

Burada,  $P_{loss}$  aktif güç kaybı,  $g_k$   $i$ . ve  $j$ . baralara bağlı  $k$ . iletim hattın kondüktansı,  $V_i$  ve  $V_j$   $i$ . ve  $j$ . baranın gerilimi,  $\delta_i$  ve  $\delta_j$   $i$ . ve  $j$ . baranın gerilim faz açısı,  $NTL$  ise iletim hatlarının sayısıdır.

(ii) *Yük Baralarında Gerilim Sapsmasının Minimizasyonu*: Yük baralarındaki gerilim sapsması Eşitlik (2) ile ifade edilmektedir.

$$F_2 = \min(VD) = \sum_{i=1}^{NL} |V_i - 1| \quad (2)$$

Burada,  $VD$  yük baralarındaki gerilim sapsması ve  $NL$  yük baralarının sayısını göstermektedir. ORPD probleminde,  $x$  ve  $u$  sırasıyla bağımlı ve kontrol değişkenlerinin vektörüdür.  $x$  ve  $u$  vektörü sırasıyla Eşitlik (3) ve Eşitlik (4)' te verilmiştir.  $P_{G1}$  salınım barasının aktif güç değerini,  $Q_G$  jeneratörlerin reaktif güç değerini,  $Q_C$  şönt kapasiteyi,  $V_L$  yük baralarının gerilim değerini,  $V_G$  jeneratörlerin terminal gerilim değerini,  $T$  transformatörlerin kademe değiştirme değerini,  $S_{l_q}$   $q$ . hattın yüklenebilirliğini,  $NG$  jeneratör sayısını,  $NL$  yük bara sayısını,  $NC$  şönt kapasite sayısını ve  $NT$  kademe değiştirici transformatör sayısını göstermektedir.

$$x^T = [P_{G1}, V_{L1} \dots V_{LNL}, Q_{G1} \dots Q_{GNG}, S_{l1} \dots S_{lNL}] \quad (3)$$

$$\mathbf{u}^T = [V_{G1} \dots V_{G_{NG}}, Q_{C1} \dots Q_{C_{NC}}, T_1 \dots T_{NT}] \quad (4)$$

## 2.2. Eşitlik ve Eşitsizlik Kısıtları (Equality and Inequality Constraints)

*Eşitlik Kısıtları*

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] = 0 \quad (5)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] = 0 \quad (6)$$

Burada,  $P_{Di}$  ve  $Q_{Di}$   $i$ . baranın aktif ve reaktif güçlerini,  $P_{Gi}$  ve  $Q_{Gi}$   $i$ . baraya ait generatörün aktif ve reaktif güçlerini,  $G_{ij}$  ve  $B_{ij}$   $i$ . ve  $j$ . baraları arasındaki iletim hattının kondüktansı ve süseptansı,  $\delta_i$  ve  $\delta_j$   $i$ . ve  $j$ . baraları arasındaki iletim hattının sırasıyla kondüktans ve süseptans değerlerinin açısı ve  $NB$  toplam bara sayısıdır.

*Eşitsizlik Kısıtları*

(i) *Generatörlerin aktif ve reaktif güç kısıtları:*

$$V_{Gi,min} \leq V_i \leq V_{Gi,max} \quad i = 1, 2, \dots, NG \quad (7)$$

$$Q_{Gi,min} \leq Q_i \leq Q_{Gi,max} \quad i = 1, 2, \dots, NG \quad (8)$$

(ii) *Kademe değiştirici transformatör kısıtları:*

$$T_{i,min} \leq T_i \leq T_{i,max} \quad i = 1, 2, \dots, NT \quad (9)$$

(iii) *Yük baralarının kısıtı:*

$$V_{Li,min} \leq V_i \leq V_{Li,max} \quad i = 1, 2, \dots, NL \quad (10)$$

(iv) *İletim hatlarının maksimum yüklenebilirlik kısıtı:*

$$S_{lq} \leq S_{lq,max} \quad q = 1, 2, \dots, NTL \quad (11)$$

(v) *Şönt kapasite kısıtları:*

$$Q_{ck,min} \leq Q_{ck} \leq Q_{ck,max} \quad k = 1, 2, \dots, NC \quad (12)$$

## 3. Kır Kurdu Optimizasyon Algoritması (Coyote Optimization Algorithm)

Kır Kurdu Optimizasyon Algoritması, kır kurtlarının davranışlarından esinlenen popülasyon tabanlı bir algoritmadır. COA' da kır kurtlarının popülasyonu  $N_p \in N^+$  paketlere, her bir paket  $N_c \in N^+$  kır kurtlarına bölünmüştür ve toplam popülasyon  $N_p$  ve  $N_c$ ' nin çarpımı olarak ifade edilmektedir (Pierezan ve Coelho, 2018; Güvenç ve Kaymaz, E., 2019). COA' da kır kurtlarının faaliyetleri dış etkenler ve iç etkenlerden etkilendiğinden dolayı sosyal koşulları dikkate alınmaktadır.  $t$ . zaman anındaki  $p$ . paket için  $c$ . kır kurdunun sosyal durumu Eşitlik (13) ile ifade edilir.

$$\mathbf{soc}_c^{p,t} = \vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_D) \quad (13)$$

COA, her kır kurdu için arama uzayında rasgele atanan ilk sosyal koşulla başlar ve Eşitlik (14) ile gösterilir.

$$\mathbf{soc}_{c,j}^{p,t} = lb_j + r_j \cdot (ub_j - lb_j) \quad (14)$$

Burada,  $ub_j$  ve  $lb_j$  üst ve alt limitleri,  $r_j$  ise  $[0, 1]$  aralığında rasgele bir sayıdır. Her bir kır kurdunun uygunluk değeri Eşitlik (15) ile hesaplanır.

$$\mathbf{fit}_c^{p,t} = f(\mathbf{soc}_c^{p,t}) \quad (15)$$

Kır kurtları popülasyondaki etkileşimlerini çeşitlendirmek için paketlerini bırakıp bir olasılık değeri ile yalnız kalabilirler veya başka bir sürüye katılabilirler. Bu olasılık değeri Eşitlik (16) ile hesaplanır.

$$P_e = 0.005 \cdot N_c^2 \quad (16)$$

COA' da sadece bir alfa kır kurdu bulunur ve uygunluk değeri en yüksek olan bireydir. Alfa Eşitlik (17) ile ifade edilir.

$$\alpha^{p,t} = \{soc_c^{p,t} \mid \arg_{c=\{1,2,\dots,N_c\}} \min(soc_c^{p,t})\} \quad (17)$$

COA' da, her paketteki kır kurdu konumunu paketin geri kalanıyla paylaşır. Paketteki her üyeye sağlanan bilgiler kültürel eğilim olarak tanımlanmaktadır ve Eşitlik (18) ile hesaplanır. Burada,  $O^{p,t}$  tüm kır kurtlarının sıralı sosyal koşullarını gösterir.

$$cult_j^{p,t} = \begin{cases} O_{\frac{(N_c+1)}{2},j}^{p,t} & N_c \text{ tek sayı ise} \\ \frac{O_{\frac{N_c}{2},j}^{p,t} + O_{\frac{(N_c+1)}{2},j}^{p,t}}{2}, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (18)$$

COA, kır kurtlarının doğum ve ölüm gibi yaşam döngüsünü dikkate alır. Yeni bir kır kurdunun doğumu, rasgele seçilen iki ebeveynin arama alanı içindeki sosyal davranışının ve çevresel faktörün bir kombinasyonudur ve Eşitlik (19) ile ifade edilmektedir.

$$pup_j^{p,t} = \begin{cases} soc_{r_1,j}^{p,t}, & rnd_j < P_s \text{ ya da } j = j_1 \\ soc_{r_2,j}^{p,t}, & rnd_j \geq P_s + P_a \text{ ya da } j = j_2 \\ R_j, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (19)$$

Burada,  $P_s$  ve  $P_a$  sırasıyla dağılım ve birleşme olasılığı,  $R_j$   $j$ . boyutun karar değişken sınırındaki rasgele bir sayı,  $r_1$  ve  $r_2$   $p$ . paketten rasgele seçilmiş kır kurtları,  $j_1$  ve  $j_2$  problem boyutunda iki rasgele sayı ve  $rnd_j$   $[0, 1]$  arasında rasgele bir sayıdır. COA' da  $P_s$  ve  $P_a$  Eşitlik (20) ve (21) ile ifade edilir:

$$P_s = 1/D \quad (20)$$

$$P_a = (1 - P_s)/2 \quad (21)$$

Kır kurtlarının yavrularının ölüm olasılığı % 10 civarındadır. COA' da doğum ve ölüm arasındaki senkronizasyon Eşitlik (22) ile ifade edilir. Burada,  $\delta$  en kötü çözümleri olan kır kurtlarını temsil eder ve  $\alpha$  grup içindeki kır kurtlarının sayısıdır.

*Bir pakette doğum ve ölüm*

$$= \begin{cases} \delta = 1, & \text{yavru hayatta kalır ve } \alpha \text{ içinde kır kurdu ölür} \\ \delta > 1, & \text{yavru hayatta kalır ve } \alpha \text{ içinde en yaşlı kır kurdu ölür} \\ \text{diğer durumlarda,} & \text{yavru ölür} \end{cases} \quad (22)$$

COA,  $\delta_1$  ve  $\delta_2$  faktörlerini kullanarak gruplar içindeki kültürel etkileşimi gösterir ve sırasıyla Eşitlik (23) ve (24) ile hesaplanırlar.  $\delta_1$  alfa kır kurdunun rasgele bir kır kurdu üzerindeki kültürel farkını,  $\delta_2$  ise paketin rasgele bir kır kurdu üzerindeki kültürel eğilimini temsil eder.

$$\delta_1 = \alpha^{p,t} - soc_{cr_1}^{p,t} \quad (23)$$

$$\delta_2 = cult^{p,t} - soc_{cr_2}^{p,t} \quad (24)$$

Kır kurtlarının yeni sosyal davranışı Eşitlik (25) ile ifade edilir. Burada,  $r_1$  ve  $r_2$   $[0, 1]$  arasında değer alır ve sırasıyla alfa ve paket etkisinin ağırlık değerleridir.

$$new\_soc_c^{p,t} = soc_c^{p,t} + r_1 \cdot \delta_1 + r_2 \cdot \delta_2 \quad (25)$$

Kır kurtlarının yeni uygunluk değeri Eşitlik (26) ile hesaplanır.

$$new\_fit_c^{p,t} = f(new\_soc_c^{p,t}) \quad (26)$$

Kır kurtları bilişsel kapasitesine göre sosyal duruma karar verir ve yeni sosyal durum eskisinden daha iyiye, yeni sosyal durum korunur ve Eşitlik (27) ile belirlenir.

$$soc_c^{p,t+1} = \begin{cases} new\_soc_c^{p,t}, & new\_fit_c^{p,t} < fit_c^{p,t} \\ soc_c^{p,t}, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (27)$$

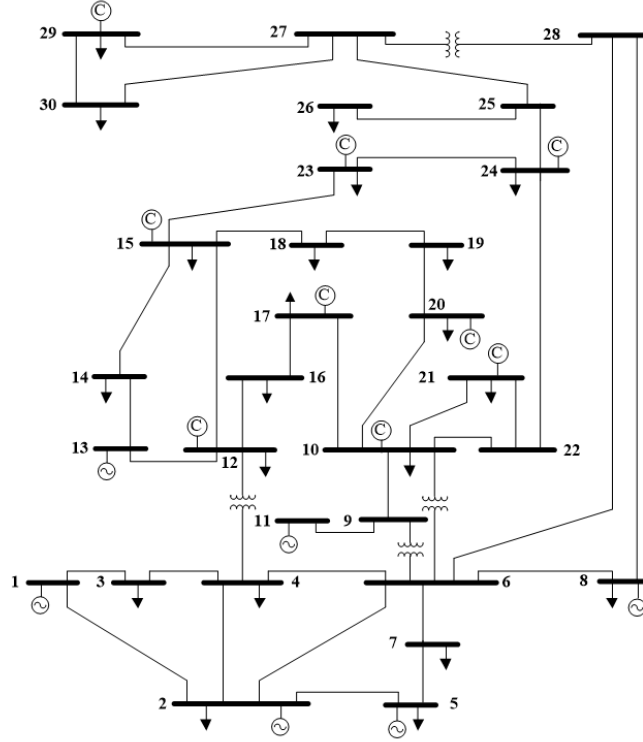
#### 4. Benzetim Sonuçları (Simulation Results)

COA, ORPD probleminin çözümü için IEEE-30 ve IEEE-57 baralı test sistemlerinde uygulanmıştır. Önerilen

algoritma, iletim hatlarındaki aktif güç kayıplarını ve yük baralarındaki gerilim sapsmasını minimize etmek için kullanılmıştır. COA ile elde edilen sonuçlar, SHADE-EC algoritmasından elde edilen sonuçlar (Biswas et al. (2019)) ile karşılaştırılmıştır.

#### 4.1. Benzetim Çalışması 1: IEEE-30 baralı test sistemi (Simulation Study 1: IEEE-30 bus test system)

IEEE-30 baralı test sistemi 19 kontrol değişkeninden oluşmaktadır ve tek hat şeması Şekil (1) 'de verilmiştir. COA çeşitli amaç fonksiyonlarına sahip dört farklı durumun çözümü için uygulanmıştır. Durum 1 ve Durum 2 aktif güç kayıplarının ( $P_{loss}$ ) minimize edilmesi ile ilgili iken, Durum 3 ve Durum 4 yük baralarındaki gerilim sapsmasının minimize edilmesi ile ilgilidir.



Şekil 1. IEEE-30 baralı test sisteminin tek hat şeması (The single line diagram of the IEEE 30-bus test system)

##### 4.1.1. Aktif Güç Kayıplarının Minimasyonu (Minimization of Active Power Losses)

Aktif güç kayıplarının minimasyonu problemi iki farklı durum için test edilmiştir. Durum 1 ve Durum 2' de COA' dan elde edilen sonuçlar, SHADE-EC algoritmasının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır ve kontrol değişkenlerinin optimal değerleri Tablo 1' de verilmiştir. Durum 1 için COA' dan elde edilen  $P_{loss}$  değeri 4.41238 MW iken, SHADE-EC algoritmasından elde edilen değer 4.4126 MW bulunmuştur. Durum 2' de COA' dan elde edilen  $P_{loss}$  değeri 4.861183 MW bulunurken, SHADE-EC algoritması için bu değer 4.8612 MW' tır.

Tablo 1. IEEE-30 baralı test sisteminde Durum 1 ve Durum 2' nin sonuçları (The results of the Case 1 and Case 2 for IEEE-30 bus test system)

| Parametre       | Min  | Max  | Durum 1  |        | Durum 2  |        |
|-----------------|------|------|----------|--------|----------|--------|
|                 |      |      | SHADE-EC | COA    | SHADE-EC | COA    |
| $V_1$ (p.u.)    | 0.95 | 1.10 | 1.0694   | 1.0693 | 1.0720   | 1.0719 |
| $V_2$ (p.u.)    | 0.95 | 1.10 | 1.0609   | 1.0609 | 1.0628   | 1.0627 |
| $V_5$ (p.u.)    | 0.95 | 1.10 | 1.0375   | 1.0375 | 1.0405   | 1.0403 |
| $V_8$ (p.u.)    | 0.95 | 1.10 | 1.0434   | 1.0434 | 1.0406   | 1.0405 |
| $V_{11}$ (p.u.) | 0.95 | 1.10 | 1.0918   | 1.0808 | 1.0923   | 1.0924 |
| $V_{13}$ (p.u.) | 0.95 | 1.10 | 1.0508   | 1.0496 | 1.0526   | 1.0569 |
| $T_{11}$ (p.u.) | 0.90 | 1.10 | 1.04     | 1.0948 | 1.0624   | 1.0745 |
| $T_{12}$ (p.u.) | 0.90 | 1.10 | 0.96     | 0.9000 | 0.9153   | 0.9036 |
| $T_{15}$ (p.u.) | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9806 | 0.9873   | 0.9880 |

| $T_{36}$ (p.u.)         | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9724         | 0.9752   | 0.9745          |
|-------------------------|------|------|----------|----------------|----------|-----------------|
| <b>Tablo 1 (Devamı)</b> |      |      |          |                |          |                 |
| Parametre               | Min  | Max  | Durum 1  |                | Durum 2  |                 |
|                         |      |      | SHADE-EC | COA            | SHADE-EC | COA             |
| $Q_{C10}$ (MVAR)        | 0.0  | 5.0  | 2.8      | 4.9650         | 0.0      | 0.0156          |
| $Q_{C12}$ (MVAR)        | 0.0  | 5.0  | 0.4      | 1.1799         | 2.8322   | 0.1120          |
| $Q_{C15}$ (MVAR)        | 0.0  | 5.0  | 4.2      | 4.2736         | 4.0992   | 4.1144          |
| $Q_{C17}$ (MVAR)        | 0.0  | 5.0  | 5.0      | 4.9325         | 5.0      | 4.9989          |
| $Q_{C20}$ (MVAR)        | 0.0  | 5.0  | 4.0      | 4.0539         | 3.9847   | 3.9647          |
| $Q_{C21}$ (MVAR)        | 0.0  | 5.0  | 5.0      | 4.9209         | 5.0      | 5.0             |
| $Q_{C23}$ (MVAR)        | 0.0  | 5.0  | 3.0      | 2.9269         | 2.7884   | 2.8608          |
| $Q_{C24}$ (MVAR)        | 0.0  | 5.0  | 5.0      | 4.9101         | 5.0      | 4.9999          |
| $Q_{C29}$ (MVAR)        | 0.0  | 5.0  | 2.6      | 2.6666         | 2.4367   | 2.4116          |
| $P_{loss}$ (MW)         |      |      | 4.4126   | <b>4.41238</b> | 4.8612   | <b>4.861183</b> |

#### 4.1.2. Yük Baralarındaki Gerilim Sapmasının Minimizasyonu (Minimization of Voltage Deviation at Load Buses)

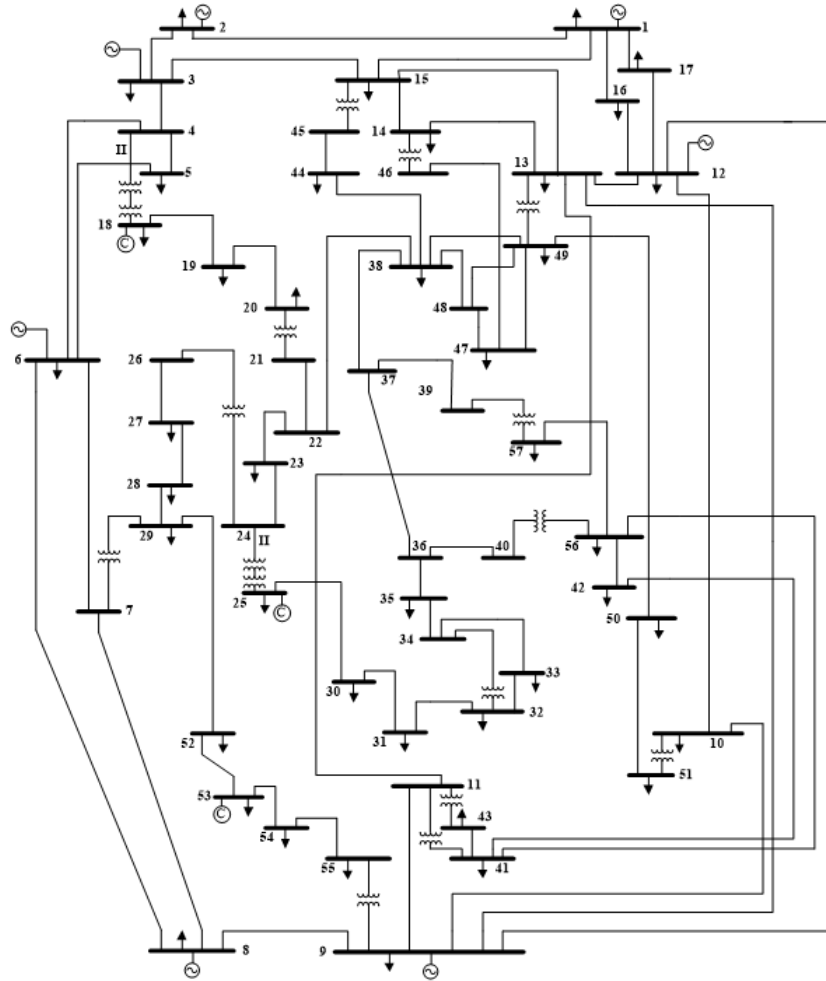
Yük baralarındaki gerilim sapmasının ( $VD$ ) minimize edilmesi için iki farklı durum için uygulanmıştır. Durum 3 ve Durum 4 için COA ve SHADE-EC algoritmasının kontrol değişkenlerinin optimal değerleri Tablo 2 'de verilmiştir. Durum 3' te COA' dan elde edilen  $VD$  değeri 0.08837 p.u. iken, SHADE-EC algoritmasından elde edilen  $VD$  değeri 0,08886 p.u, Durum 4' te ise, COA ve SHADE-EC algoritmalarından elde edilen  $VD$  değeri aynı bulunmuştur.

**Tablo 2.** IEEE-30 baralı test sisteminde Durum 3 ve Durum 4' ün sonuçları (The results of the Case 3 and Case 4 for IEEE-30 bus test system)

| Parametre        | Min  | Max  | Durum 3  |                | Durum 4  |                |
|------------------|------|------|----------|----------------|----------|----------------|
|                  |      |      | SHADE-EC | COA            | SHADE-EC | COA            |
| $V_1$ (p.u.)     | 0.95 | 1.10 | 1.0045   | 1.0006         | 1.0031   | 1.0031         |
| $V_2$ (p.u.)     | 0.95 | 1.10 | 1.0019   | 0.9969         | 0.9986   | 0.9986         |
| $V_5$ (p.u.)     | 0.95 | 1.10 | 1.0203   | 1.0165         | 1.0162   | 1.0162         |
| $V_8$ (p.u.)     | 0.95 | 1.10 | 1.0063   | 1.0089         | 1.0084   | 1.0084         |
| $V_{11}$ (p.u.)  | 0.95 | 1.10 | 1.0268   | 1.0588         | 1.0674   | 1.0674         |
| $V_{13}$ (p.u.)  | 0.95 | 1.10 | 1.0222   | 1.0209         | 1.0206   | 1.0222         |
| $T_{11}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 1.04     | 1.0899         | 1.0918   | 1.0918         |
| $T_{12}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.9      | 0.9            | 0.9      | 0.9            |
| $T_{15}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 1.0      | 1.0009         | 1.0067   | 1.0067         |
| $T_{36}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.96     | 0.9510         | 0.9697   | 0.9697         |
| $Q_{C10}$ (MVAR) | 0.0  | 5.0  | 4.6      | 4.9999         | 5.0      | 5.0            |
| $Q_{C12}$ (MVAR) | 0.0  | 5.0  | 0.2      | 0.0            | 4.1036   | 2.924          |
| $Q_{C15}$ (MVAR) | 0.0  | 5.0  | 5.0      | 5.0            | 5.0      | 5.0            |
| $Q_{C17}$ (MVAR) | 0.0  | 5.0  | 0.2      | 0.0            | 0.0      | 0.0            |
| $Q_{C20}$ (MVAR) | 0.0  | 5.0  | 5.0      | 4.9949         | 5.0      | 5.0            |
| $Q_{C21}$ (MVAR) | 0.0  | 5.0  | 5.0      | 5.0            | 5.0      | 5.0            |
| $Q_{C23}$ (MVAR) | 0.0  | 5.0  | 5.0      | 4.9647         | 5.0      | 5.0            |
| $Q_{C24}$ (MVAR) | 0.0  | 5.0  | 5.0      | 4.9999         | 5.0      | 5.0            |
| $Q_{C29}$ (MVAR) | 0.0  | 5.0  | 2.0      | 1.8581         | 2.62     | 2.6199         |
| $VD$ (p.u.)      |      |      | 0.08886  | <b>0.08837</b> | 0.08724  | <b>0.08724</b> |

#### 4.2. Benzetim Çalışması 2: IEEE-57 baralı test sistemi (Simulation Study 2: IEEE-57 bus test system)

IEEE-57 baralı test sistemi 27 kontrol değişkeninden oluşmaktadır ve tek hat şeması Şekil (2) 'de verilmiştir. COA, Durum 5, Durum 6, Durum 7 ve Durum 8 olmak üzere dört farklı durum için uygulanmıştır. Durum 5 ve Durum 6 aktif güç kayıplarının ( $P_{loss}$ ) minimize edilmesi ile ilgili iken, Durum 7 ve Durum 8 yük baralarında gerilim sapmasının ( $VD$ ) minimize edilmesi ile ilgilidir.



Şekil 2. IEEE-57 baralı test sisteminin tek hat şeması (The single line diagram of the IEEE 57-bus test system)

#### 4.2.1. Aktif Güç Kayıplarının Minimizasyonu (Minimization of Active Power Losses)

Bu problem için, iki farklı test durumu kullanılmıştır ve COA ve SHADE-EC algoritmalarından elde edilen kontrol değişkenlerinin optimal değerleri Tablo 3' te verilmiştir. Durum 5' de COA' dan elde edilen  $P_{loss}$  değeri 18.3825 MW iken, SHADE-EC algoritmasından elde edilen değer 18.4 MW bulunmuştur. Durum 6' da ise  $P_{loss}$  değeri SHADE-EC algoritmasından elde edilen 23.3031 MW değerinden, COA algoritması ile 23.30308 MW' a düşmüştür. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, COA' nın SHADE-EC algoritmasından daha iyi sonuçlar elde ettiği görülmektedir.

Tablo 3. IEEE-57 baralı test sisteminde Durum 5 ve Durum 6' nın sonuçları (The results of the Case 5 and Case 6 for IEEE-57 bus test system)

| Parametre       | Min  | Max  | Durum 5  |        | Durum 6  |        |
|-----------------|------|------|----------|--------|----------|--------|
|                 |      |      | SHADE-EC | COA    | SHADE-EC | COA    |
| $V_1$ (p.u.)    | 0.95 | 1.10 | 1.0848   | 1.0857 | 1.0875   | 1.0876 |
| $V_2$ (p.u.)    | 0.95 | 1.10 | 1.0782   | 1.0789 | 1.0768   | 1.0768 |
| $V_3$ (p.u.)    | 0.95 | 1.10 | 1.0661   | 1.0664 | 1.0653   | 1.0651 |
| $V_6$ (p.u.)    | 0.95 | 1.10 | 1.0584   | 1.0588 | 1.0562   | 1.0562 |
| $V_8$ (p.u.)    | 0.95 | 1.10 | 1.0731   | 1.0714 | 1.0746   | 1.0748 |
| $V_9$ (p.u.)    | 0.95 | 1.10 | 1.0464   | 1.0444 | 1.0428   | 1.0429 |
| $V_{12}$ (p.u.) | 0.95 | 1.10 | 1.048    | 1.0466 | 1.0455   | 1.0453 |
| $T_{19}$ (p.u.) | 0.90 | 1.10 | 1.06     | 0.9248 | 0.9729   | 0.9    |
| $T_{20}$ (p.u.) | 0.90 | 1.10 | 0.94     | 1.0411 | 1.0085   | 1.0998 |
| $T_{31}$ (p.u.) | 0.90 | 1.10 | 1.0      | 1.0088 | 1.0054   | 1.0075 |
| $T_{35}$ (p.u.) | 0.90 | 1.10 | 0.96     | 1.0432 | 1.0302   | 0.9737 |
| $T_{36}$ (p.u.) | 0.90 | 1.10 | 1.04     | 0.9718 | 0.989    | 1.0522 |
| $T_{37}$ (p.u.) | 0.90 | 1.10 | 1.0      | 0.9965 | 1.0044   | 1.0049 |
| $T_{41}$ (p.u.) | 0.90 | 1.10 | 1.0      | 0.9935 | 0.9968   | 0.9968 |

Tablo 3 (Devamı)

| Parametre        | Min  | Max  | Durum 5  |                | Durum 6  |                 |
|------------------|------|------|----------|----------------|----------|-----------------|
|                  |      |      | SHADE-EC | COA            | SHADE-EC | COA             |
| $T_{46}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.96     | 0.9646         | 0.9524   | 0.9553          |
| $T_{54}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.94     | 0.9009         | 0.9094   | 0.9087          |
| $T_{58}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 1.0      | 1.0092         | 0.9894   | 0.9898          |
| $T_{59}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9823         | 0.9712   | 0.9694          |
| $T_{65}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9897         | 0.9749   | 0.9739          |
| $T_{66}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.94     | 0.9328         | 0.9416   | 0.9406          |
| $T_{71}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9877         | 0.971    | 0.9710          |
| $T_{73}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 1.0      | 0.9887         | 0.9848   | 0.9886          |
| $T_{76}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9581         | 0.959    | 0.9588          |
| $T_{80}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 1.0      | 0.9826         | 0.9845   | 0.9850          |
| $Q_{C18}$ (MVAR) | 0.0  | 20   | 5.2      | 4.2506         | 8.148    | 12.3638         |
| $Q_{C25}$ (MVAR) | 0.0  | 20   | 14.2     | 15.6045        | 14.4048  | 14.5304         |
| $Q_{C53}$ (MVAR) | 0.0  | 20   | 13.6     | 12.9480        | 13.2747  | 13.1066         |
| $P_{loss}$ (MW)  |      |      | 18.4000  | <b>18.3825</b> | 23.3031  | <b>23.30308</b> |

#### 4.2.2. Yük Baralarındaki Gerilim Sapmasının Minimizasyonu (Minimization of Voltage Deviation at Load Buses)

Bu problem için iki farklı durum kullanılmıştır ve algoritmalarından elde edilen kontrol değişkenlerinin optimal değerleri Tablo 4' te verilmiştir. Durum 7' de SHADE-EC algoritmasından elde edilen  $VD$  değeri 0.62632 p.u. bulunurken, COA algoritması ile  $VD$  değeri 0.60936 p.u. bulunmuştur. Durum 8' de ise SHADE-EC algoritmasından elde edilen  $VD$  0.59673 p.u. değerinden COA ile 0.59582 p.u. değerine düşürülmüştür.

Tablo 4. IEEE-57 baralı test sisteminde Durum 7 ve Durum 8' in sonuçları (The results of the Case 7 and Case 8 for IEEE-57 bus test system)

| Parametre        | Min  | Max  | Durum 7  |                | Durum 8  |                |
|------------------|------|------|----------|----------------|----------|----------------|
|                  |      |      | SHADE-EC | COA            | SHADE-EC | COA            |
| $V_1$ (p.u.)     | 0.95 | 1.10 | 1.021    | 1.0209         | 1.02     | 1.0203         |
| $V_2$ (p.u.)     | 0.95 | 1.10 | 1.0172   | 1.0166         | 1.0116   | 1.0118         |
| $V_3$ (p.u.)     | 0.95 | 1.10 | 1.0158   | 1.0137         | 1.0107   | 1.0102         |
| $V_6$ (p.u.)     | 0.95 | 1.10 | 1.0005   | 1.0028         | 1.0034   | 1.0040         |
| $V_8$ (p.u.)     | 0.95 | 1.10 | 1.0064   | 1.0068         | 1.0297   | 1.0323         |
| $V_9$ (p.u.)     | 0.95 | 1.10 | 0.9945   | 0.9960         | 1.007    | 1.0089         |
| $V_{12}$ (p.u.)  | 0.95 | 1.10 | 1.0246   | 1.0295         | 1.036    | 1.0371         |
| $T_{19}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.96     | 0.9070         | 0.9653   | 1.1            |
| $T_{20}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 1.04     | 1.0199         | 0.9942   | 0.9            |
| $T_{31}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9827         | 0.9714   | 0.9725         |
| $T_{35}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 1.04     | 1.0958         | 1.0541   | 1.0704         |
| $T_{36}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 1.0425         | 1.0876   | 1.0704         |
| $T_{37}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 1.0      | 1.0283         | 1.0039   | 1.0040         |
| $T_{41}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9782         | 1.0017   | 1.0036         |
| $T_{46}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.94     | 0.9206         | 0.918    | 0.9178         |
| $T_{54}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.9      | 0.9001         | 0.9001   | 0.9            |
| $T_{58}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.94     | 0.9407         | 0.9303   | 0.9304         |
| $T_{59}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.96     | 0.9833         | 0.9849   | 0.9845         |
| $T_{65}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 1.0      | 1.0016         | 1.0072   | 1.0172         |
| $T_{66}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.9      | 0.9003         | 0.9      | 0.9            |
| $T_{71}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9584         | 0.9589   | 0.9615         |
| $T_{73}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9942         | 1.0082   | 1.0072         |
| $T_{76}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.9      | 0.9            | 0.9      | 0.9            |
| $T_{80}$ (p.u.)  | 0.90 | 1.10 | 0.98     | 0.9774         | 0.987    | 0.9888         |
| $Q_{C18}$ (MVAR) | 0.0  | 20   | 13.8     | 0.0218         | 0.0075   | 0              |
| $Q_{C25}$ (MVAR) | 0.0  | 20   | 18.4     | 19.9609        | 19.9909  | 20             |
| $Q_{C53}$ (MVAR) | 0.0  | 20   | 20       | 19.9836        | 19.9974  | 20             |
| $VD$ (p.u.)      |      |      | 0.62632  | <b>0.60936</b> | 0.59673  | <b>0.59582</b> |



## 5. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada, optimal reaktif güç probleminin çözümü için literatürde verilen COA algoritması ile kullanılmıştır. ORPD' nin amacı, eşitlik ve eşitsizlik sınırları içerisinde aktif güç kayıplarının ve yük baralarındaki gerilim sapmasının minimize edilmesidir. Bu amaç fonksiyonlarındaki kontrol değişkenlerinin optimal değerleri COA algoritması ile bulunmuş ve literatürde bu problemler için sonuçları verilen SHADE-EC algoritması ile karşılaştırılmıştır. COA, IEEE-30 ve IEEE-57 baralı test sistemlerinde uygulanmıştır. Benzetim sonuçları, COA' nın SHADE-EC algoritmasına göre optimum değerleri bulmada daha başarılı ve etkili olduğunu göstermektedir.

## EK (APPENDIX)

Tablo A.1 ve A.2

**Tablo A.1.** IEEE-30 baralı test sistemi için generatör verileri (Generator data for IEEE-30 bus system)

| Bara No | $P_{G,min}$ (MW) | $P_{G,max}$ (MW) | $Q_{G,min}$ (MVar) | $Q_{G,max}$ (MVar) | $P_G$ (MW)     |                |
|---------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
|         |                  |                  |                    |                    | Durum 1 ve 3   | Durum 2 ve 4   |
| 1       | 50               | 200              | -20                | 150                | Salınım barası | Salınım barası |
| 2       | 20               | 80               | -20                | 60                 | 75             | 80             |
| 5       | 15               | 50               | -15                | 62.5               | 40             | 50             |
| 8       | 10               | 35               | -15                | 48.7               | 30             | 20             |
| 11      | 10               | 30               | -10                | 40                 | 25             | 20             |
| 13      | 12               | 40               | -15                | 44.7               | 30             | 20             |

**Tablo A.2.** IEEE-57 baralı test sistemi için generatör verileri (Generator data for IEEE-57 bus system)

| Bara No | $P_{G,min}$ (MW) | $P_{G,max}$ (MW) | $Q_{G,min}$ (MVar) | $Q_{G,max}$ (MVar) | $P_G$ (MW)     |                |
|---------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
|         |                  |                  |                    |                    | Durum 1 ve 3   | Durum 2 ve 4   |
| 1       | 0                | 576              | -140               | 200                | Salınım barası | Salınım barası |
| 2       | 30               | 100              | -17                | 50                 | 50             | 0              |
| 3       | 40               | 140              | -10                | 60                 | 60             | 40             |
| 6       | 30               | 100              | -8                 | 25                 | 50             | 0              |
| 8       | 100              | 550              | -140               | 200                | 400            | 450            |
| 9       | 30               | 100              | -3                 | 9                  | 50             | 0              |
| 12      | 100              | 410              | -150               | 155                | 300            | 310            |

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- AlRashidi, M. R., El-Hawary, M. E., 2009. Applications of computational intelligence techniques for solving the revived optimal power flow problem. *Electric Power Systems Research*, 79 (4), 694-702.
- Alsac, O., Bright, J., Prais, M., Stott, B., 1990. Further developments in LP-based optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(3), 697-711.
- Basu, M., 2016. Quasi-oppositional differential evolution for optimal reactive power dispatch. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 29-40.
- Biswas, P. P., Suganthan, P. N., Mallipeddi, R., Amaratunga, G. A., 2019. Optimal reactive power dispatch with uncertainties in load demand and renewable energy sources adopting scenario-based approach. *Applied Soft Computing*, 75, 616-632.
- Bjelogrlic, M., Calovic, M. S., Ristanovic, P., Babic, B. S., 1990. Application of Newton's optimal power flow in voltage/reactive power control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5 (4), 1447-1454.
- Dai, C., Chen, W., Zhu, Y., Zhang, X., 2009. Seeker optimization algorithm for optimal reactive power dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24 (3), 1218-1231.
- Duman, S., Sönmez, Y., Güvenç, U., Yörükeren, N., 2012. Optimal reactive power dispatch using a gravitational search algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 6 (6), 563-576.
- Güvenç, U., Kaymaz, E., 2019. Economic Dispatch Integrated Wind Power Using Coyote Optimization Algorithm. In 2019 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG) IEEE, 179-183.
- Granville, S., 1994. Optimal reactive dispatch through interior point methods. *IEEE Transactions on power systems*, 9(1), 136-146.
- Khazali, A. H., Kalantar, M., 2011. Optimal reactive power dispatch based on harmony search algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33 (3), 684-692.
- Khorsandi, A., Alimardani, A., Vahidi, B., Hosseini, S. H., 2011. Hybrid shuffled frog leaping algorithm and Nelder-Mead simplex search for optimal reactive power dispatch. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5 (2), 249-256.

- Mahadevan, K., Kannan, P. S., 2010. Comprehensive learning particle swarm optimization for reactive power dispatch. *Applied Soft Computing*, 10 (2), 641-652.
- Mallipeddi, R., Jeyadevi, S., Suganthan, P. N., Baskar, S., 2012. Efficient constraint handling for optimal reactive power dispatch problems. *Swarm and Evolutionary Computation*, 5, 28-36.
- Mandal, B., Roy, P. K., 2013. Optimal reactive power dispatch using quasi-oppositional teaching learning based optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 123-134.
- Li, Y., Cao, Y., Liu, Z., Liu, Y., Jiang, Q., 2009. Dynamic optimal reactive power dispatch based on parallel particle swarm optimization algorithm. *Computers & Mathematics with Applications*, 57 (11-12), 1835-1842.
- Liang, R. H., Wang, J. C., Chen, Y. T., Tseng, W. T., 2015. An enhanced firefly algorithm to multi-objective optimal active/reactive power dispatch with uncertainties consideration. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 1088-1097.
- Nguyen, T. T., Vo, D. N., 2019. Improved social spider optimization algorithm for optimal reactive power dispatch problem with different objectives. *Neural Computing and Applications*, 1-32.
- Pierezan, J., Coelho, L. D. S., 2018. Coyote optimization algorithm: a new metaheuristic for global optimization problems. In 2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 1-8.
- Quintana, V. H., Santos-Nieto, M., 1989. Reactive-power dispatch by successive quadratic programming. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 4 (3), 425-435.
- Rajan, A., Malakar, T., 2015. Optimal reactive power dispatch using hybrid Nelder-Mead simplex based firefly algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 66, 9-24.
- Singh, R. P., Mukherjee, V., Ghoshal, S. P., 2015. Optimal reactive power dispatch by particle swarm optimization with an aging leader and challengers. *Applied Soft Computing*, 29, 298-309.
- Sulaiman, M. H., Mustafa, Z., Mohamed, M. R., Aliman, O., 2015. Using the gray wolf optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem. *Applied Soft Computing*, 32, 286-292.
- Yan, W., Lu, S., Yu, D. C., 2004. A novel optimal reactive power dispatch method based on an improved hybrid evolutionary programming technique. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2), 913-918.