



HİPOPOTAM ALGORİTMASI İLE OPTİMAL REAKTİF GÜÇ DAĞITIMI PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ

Hakan İŞİKER^{1*}, Kadir ABACI¹, İbrahim Çağrı BARUTÇU²

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

²Hakkari Üniversitesi, Çölemerik Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Hakkari, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
ORPD, Optimizasyon, Aktif Güç Kaybı, Hipopotam Algoritması, Şönt Kapasitör.	Bu çalışma, güç sistemlerinde aktif güç kayıplarını en aza indirmek amacıyla ORPD problemi için hipopotam davranışlarından esinlenen Hipopotam Optimizasyon (HO) algoritmasını önermektedir. Önerilen yöntem, sistem kısıtlarını ihlal etmeden en iyi çalışma noktasını aramaktadır. Algoritmanın performansı, 14 baralı IEEE standart test sistemi ve 380 kV seviyesindeki 22 baralı gerçek bir Türkiye güç sistemi üzerinde test edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre, HO algoritması IEEE-14 baralı sistemde aktif güç kaybını 13.49 MW'tan 12.342 MW'a düşürerek %8,51 oranında bir iyileşme sağlamıştır. Aynı zamanda, toplam 12.4 MVar gibi düşük bir şönt kompanzasyon kapasitesi ile bu sonucu elde ederek, literatürdeki PSO, ABC ve ACOR gibi yöntemlere kıyasla daha ekonomik ve verimli bir çözüm sunmuştur. 22 baralı Türkiye sisteminde ise aktif güç kayıpları %80,15 oranında kayıp azaltımı başarılmıştır. Bu sonuçlar, HO algoritmasının sadece kayıpları azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda reaktif güç kaynaklarının optimal kullanımıyla sistem verimliliğini artırdığını ve yerel minimumlardan kaçınma konusunda üstün bir performans sergilediğini somut verilerle kanıtlamaktadır.

SOLVING THE OPTIMAL REACTIVE POWER DISPATCH PROBLEM WITH THE HIPPOPOTAMUS ALGORITHM

Keywords	Abstract
ORPD, Optimization, Active Power Loss, Hippopotamus Algorithm, Shunt Capacitor.	This study proposes the Hippopotamus Optimization (HO) algorithm, inspired by hippopotamus behavior, for the ORPD problem with the aim of minimizing active power losses in power systems. The proposed method seeks the optimal operating point without violating system constraints. The algorithm's performance was tested on a 14-bus IEEE standard test system and a real 22-bus Turkish power system at the 380 kV level. According to the simulation results, the HO algorithm achieved an 8.51% improvement by reducing active power loss from 13.49 MW to 12.342 MW in the IEEE-14 busbar system. At the same time, it achieved this result with a low shunt compensation capacity of 12.4 MVar, offering a more economical and efficient solution compared to methods such as PSO, ABC, and ACOR in the literature. In the 22-bar Türkiye system, active power losses were reduced by 80.15%. These results concretely demonstrate that the HO algorithm not only reduces losses but also increases system efficiency through the optimal use of reactive power sources and exhibits superior performance in avoiding local minima.

Alıntı / Cite

İşiker, H., Abacı, K., Barutçu, İ. Ç., (2026). Hipopotam Algoritması ile Optimal Reaktif Güç Dağıtımı Probleminin Çözülmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 14(2), 170-181.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. İşiker, 0000-0002-6465-8480
K. Abacı, 0000-0001-5627-0032
İ. Ç. Barutçu, 0000-0001-6164-2048

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	15.10.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	18.12.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	14.04.2026
Yayın Tarihi / Published Date	30.06.2026

* İlgili yazar / Corresponding author: hakan.isiker@mersin.edu.tr, +90-532-655-6148

SOLVING THE OPTIMAL REACTIVE POWER DISPATCH PROBLEM WITH THE HIPPOPOTAMUS ALGORITHM

Hakan IŞIKER^{1†}, Kadir ABACI¹, İbrahim Çağrı BARUTÇU²

¹Mersin University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Mersin, Türkiye

²Hakkari University, Çölemerik Vocational Highschool, Department of Electricity and Energy, Hakkari, Türkiye

Highlights

- A hippopotamus-inspired metaheuristic optimization proposed for ORPD,
- Strict adherence to constraints; feasible solutions ensured,
- Fast convergence and competitive performance on standard and realistic systems.

Graphical Abstract

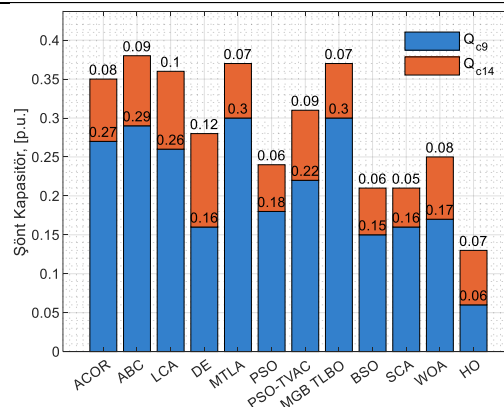


Figure. Comparison of values obtained by the HO algorithm versus those from state-of-the-art methods in the literature

Purpose and Scope

The aim of this paper is to produce feasible solutions that strictly adhere to all operational constraints while minimizing active power losses in the ORPD problem using a hippopotamus-inspired (HO) metaheuristic algorithm. The scope includes the joint optimization of control variables, constraint-handling strategies, and a comparative evaluation of HO against methods in the literature in terms of convergence speed, and robustness.

Design/methodology/approach

ORPD was formulated on an AC power-flow basis with active power loss minimization and operational constraints. Control variables were jointly optimized using a hippopotamus-inspired metaheuristic. Feasibility was ensured via penalty strategies. The method was tested with multiple runs on IEEE 14- and Turkish 22-bus systems and compared to the literature in terms of convergence speed, solution quality, and robustness.

Findings

HO reduced active power losses to lower levels than methods in the literature across all tests. It converged quickly, with pronounced improvements in early iterations. More balanced and stable solutions were obtained for shunt compensator settings and OLTC tap positions.

Research limitations/implications

Exceeding the operational and security limits in the Turkish 22-bus and IEEE 14-bus test systems posed challenges. To address these, a penalty technique was applied to keep violations within acceptable bounds. In future work, the HO algorithm will be adapted to large-scale interconnected systems to more thoroughly assess the balance among performance, robustness, and computational cost.

Practical implications

HO-based ORPD reduces active losses and improves voltage profiles, enhancing operational efficiency and utilization of existing assets. It reduces limit violations through penalty mechanisms.

Originality

This study proposes a new framework for AC power flow-based ORPD that jointly optimizes control variables using a HO metaheuristic with an effective penalty technique, delivering lower losses, faster convergence, and more robust solutions than the literature, thereby providing value to grid operators and researchers.

[†] Corresponding author: hakan.isiker@mersin.edu.tr, +90-532-655-6148

1. Giriş (Introduction)

Optimal Reaktif Güç Dağıtımı (ORGD; literatürde yaygın kullanımıyla ORPD) problemi, ilk olarak Carpentier tarafından ortaya konulmasından bu yana araştırmacılar için hem zorlu hem de ilham verici bir konu olmuştur (Carpentier, 1962). Problemin temel amacı, güç sistemlerindeki aktif güç kayıplarını en aza indirmektir. Zaman içinde, güç sistemlerinin güncel gereksinimleri doğrultusunda gerilim profilinin iyileştirilmesi ve gerilim kararlılığının artırılması gibi hedefler de ORPD'nin odak alanları arasına girmiştir (Naderi vd., 2017). Optimizasyon sürecinde, sistemin işletme ve güvenlik kısıtlarını ihlal etmeden, generatör gerilimleri, kademe ayarlı transformatör (OLTC) kademeleri ve şönt kompanzasyon elemanlarının reaktif güç çıkışları gibi kontrol değişkenleri ayarlanarak hedeflere ulaşılmaya çalışılır.

ORPD, ortaya atıldığı günden bu yana deterministik sayısal optimizasyon yöntemlerinden (Bjelogrić vd., 1990; Quintana ve Santos-Nieto, 1989) sürü/çekim tabanlı çağdaş metasezgisel yöntemlere kadar geniş bir yöntem yelpazesinde ele alınmıştır. Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (PSO), gerilim güvenliği değerlendirmesi ile birlikte reaktif güç ve gerilim kontrolüne erken dönemde uyarlanan yöntemlerden biridir (Cai vd., 2009; Mahadevan ve Kannan, 2010). Diferansiyel Evrim (DE) algoritması, ayrık-sürekli karma karar uzayında sergilediği dayanıklı arama kabiliyeti sayesinde ORPD'de rekabetçi sonuçlar üretmiştir (Varadarajan ve Swarup, 2008). Devam eden dönemde çekim tabanlı arayış paradigması örneklerinden Gravitational Search algoritması da ORPD'ye uyarlanmıştır (Duman vd., 2012). Ayrıca sezgisel ve metasezgisel arayış teknikleri üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir (Basu, 2016; Dai vd., 2009; Khazali ve Kalantar, 2011; Khorsandi vd., 2011; Nguyen ve Vo, 2020). Son yıllarda ise veri güdümlü yaklaşımlar, özellikle derin pekiştirmeli öğrenme tabanlı yöntemler, giderek artan biçimde dikkat çekmektedir. Derin pekiştirmeli öğrenme ajanlarının, çok zaman dilimli ve belirsizlik içeren senaryolarda reaktif güç ve gerilim kontrolünü optimize edebildiği gösterilmiştir (Zamzam vd., 2023). Bu gelişmeler, geleneksel tek atımlık (statik) ORPD formülasyonundan operasyonel zaman serisi temelli karar destek paradigma-sına geçişin yolunu açmaktadır.

Güncel eğilimler, belirsizlik altında çok amaçlı optimizasyonun senkron biçimde ele alınmasına ve operasyonel kısıtların ölçeklenebilir çözümlerle bütünleştirilmesine odaklanmaktadır (Tudose vd., 2021). Yenilenebilir enerji penetrasyonundaki artış, reaktif güç akışlarının zamansal oynaklığını büyütmüş; dağıtık üretim birimlerinin- özellikle evirici tabanlı kaynakların- volt/var kontrol yeteneklerinin dinamik olarak koordine edilmesi gerekliliğini ön plana çıkarmıştır. Bu bağlamda, yüksek boyutlu durum-eylem uzayında çevrimiçi öğrenme yetkinliği sunan veri güdümlü yöntemler önem kazanmıştır (Biswas vd., 2019; Güvenç ve Kaymaz, 2019; Liang vd., 2015).

Bu çalışmada, hipopotam davranışlarından esinlenerek geliştirilen yeni bir metasezgisel Hipopotam Optimizasyonu (Hippopotamus Optimization, HO) algoritması (Amiri vd., 2024) ilk kez ORGD/ORPD probleminin çözümü için önerilmekte ve başarıyla uygulanmaktadır. Klasik HO algoritmasının, kontrol değişkenlerinin sabit ve tekdüze sınırları altında yürüttüğü arama süreci, ORPD'nin değişken ve bileşene özgü sınır koşullarını yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, çalışmada kontrol değişkenleri için bileşen-türüne özgü farklı alt-üst sınırlarının dikkate alındığı uyarlanmış bir HO yaklaşımı geliştirilmiştir. Yapılan bu modifikasyonla, HO algoritması farklı sınır değerlerine sahip kontrol değişkenleri içeren problemler için de etkili çözümler üretebilen bir yapıya kavuşturulmuştur.

Önerilen yöntem, 14 baralı standart test sistemine ek olarak Türkiye 154 kV seviyesinde 22 baralı bir güç sistemi üzerinde de uygulanmış; söz konusu ulusal ölçekteki sistem için reaktif güç dağıtımına yönelik aktif güç kaybı minimizasyonu literatürde ilk kez bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. 14 baralı test sistemi üzerinde elde edilen sonuçlar, literatürde raporlanan çalışmalarla karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin birçok güncel algoritmaya kıyasla üstün performans sergilediği görülmüştür.

Bu makalenin özgün değeri ve katkıları aşağıda özetlenmiştir:

- HO algoritması ilk kez ORGD/ORPD probleminin çözümüne uyarlanmış ve geçerliliği gösterilmiştir.
- Aktif güç kaybı minimizasyonu, 14 baralı test sistemine ek olarak Türkiye 154 kV seviyesindeki 22 baralı güç sistemi üzerinde de ilk kez başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- 14 baralı test sistemi sonuçları, literatürdeki güncel çalışmalara kıyasla birçok son nesil algoritmanın geride bırakılmasını sağlamıştır.
- Şönt kompanzasyon güç değerini en aza indirerek minimum aktif güç kaybı değeri bulunmuştur.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Optimal Reaktif Güç Dağıtımı (Optimal Reactive Power Dispatch)

ORGD, güç sisteminde reaktif güç kaynaklarının (ör. generatörlerin reaktif güçleri, şönt kapasitörler ve kademe ayarlı transformatörler) uygun biçimde ayarlanması yoluyla; gerilim profilinin iyileştirilmesi, toplam aktif güç kaybının azaltılması, hat ve transformatör yüklenmelerinin sınırlar içinde tutulması ve gerilim kararlılığının artırılmasını amaçlayan bir optimizasyon problemidir. Bu çalışmada ekonomik/maliyet terimleri kapsam dışı bırakılmıştır. Problem çözümünde, seçilen amaç fonksiyonları $f(x, u)$ minimize edilirken, güç akışı eşitlik kısıtları $g(x, u) = 0$ ve işletim ile güvenlik kısıtlarını temsil eden eşitsizlik kısıtları $h(x, u) \leq 0$ birlikte sağlanır.

2.1.1. ORGD Problem Formülasyonu (ORPD Problem Formulation)

ORGD'de reaktif güç ve gerilimle ilişkili karar değişkenleri optimize edilir; aktif güç üretim programı (salınım barası hariç) sabit kabul edilir. Bu bağlamda:

$$u = [P_{Gsalınım}; V_L; Q_G; S_{TL}] \quad (1)$$

$$x = [V_G; Q_C; T] \quad (2)$$

Burada u vektörü durum değişkenlerini, x vektörü ise kontrol (karar) değişkenlerini göstermektedir. Durum değişkenleri; salınım barasının aktif güç çıkışı $P_{Gsalınım}$, yük baralarının gerilim genlikleri V_L , generatörlerin reaktif güç çıkışları Q_G ve iletim hattı yüklenmeleri S_{TL} 'den oluşur. Kontrol değişkenleri; generatör gerilim ayarları V_G , şönt VAR kompanzasyonları Q_C ve kademe ayarlı transformatörlerin kademeleri T olarak tanımlanır. Güç akışı eşitlikleri $g(x, u)$ aşağıdaki biçimdedir.

2.1.1.1. Eşitlik Kısıtları (Equality Constraints)

Aktif güç denklemleri:

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0, \quad (i = 1 \dots n) \quad (3)$$

Reaktif güç denklemleri:

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_{Ci} - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0, \quad (i = 1 \dots n) \quad (4)$$

Bu ifadelerde P_{Gi} ve Q_{Gi} sırasıyla i . baradaki generatörün aktif ve reaktif güç çıkışlarını, P_{Di} ve Q_{Di} i . baranın aktif ve reaktif yük taleplerini temsil eder. Q_{Ci} , i . baradaki şönt kompanzasyon (VAR) miktarıdır. $|Y_{ij}|$ ve θ_{ij} , bara admitans matrisinin ilgili elemanının genliği ve açısını belirtir. n , sistemdeki toplam bara sayısını göstermektedir. Faz açıları δ_i , baraların gerilim faz açılarını ifade eder.

2.1.1.2. Eşitsizlik Kısıtları (Inequality Constraints)

Güç sistemine ait eşitsizlik kısıtları aşağıdaki gibidir.

$$\text{Generatör gerilimleri:} \quad V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max} \quad (5)$$

$$\text{Generatör reaktif güçleri:} \quad Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad (6)$$

$$\text{Şönt kompanzasyon:} \quad Q_{Ci}^{min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{max} \quad (7)$$

$$\text{Transformatör tap oranları:} \quad T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max} \quad (8)$$

$$\text{Yük (PQ) baralarının gerilimleri:} \quad V_{Li}^{min} \leq V_{Li} \leq V_{Li}^{max} \quad (9)$$

$$\text{Hat yüklenebilirlik limitleri:} \quad S_{Li} \leq S_{Li}^{max} \quad (10)$$

2.1.1.3. Ceza Fonksiyonu (Penalty Function)

Güç sistemine ait ceza fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$[P_{Salınım}, Y] = GüçAkışı(x) \quad (11)$$

$$P_{Salınım} = 1000 * P_{Salınım} * (P_{Salınım} > Ub_{Salınım} || P_{Salınım} < Lb_{Salınım}) \quad (12)$$

$$Ceza(Y) = c * \sum_{i=1}^n [abs(Ub_i - Y_i) * (Y_i > Ub_i) + abs(Lb_i - Y_i) * (Y_i < Lb_i)] \quad (13)$$

$$f(x) = f(x) + Ceza(Y) \quad (14)$$

$GüçAkışı(x)$ fonksiyonu (Saadat, 2011) olduğunda, Ub_{Glsack} ve Lb_{Glsack} sırasıyla salınım barasının üst ve alt sınırları, Ub_i ve Lb_i sırasıyla i . kısıt parametrelerinin üst ve alt sınırları ve c , amaç fonksiyonu tanımı için deneysel olarak bulunan ceza katsayısıdır.

2.2. Amaç Fonksiyonu (Objective Function)

Bu çalışmada ORGD probleminin temel hedefi, sistemdeki toplam aktif güç kaybını minimize etmektir. Bu amaçla kontrol değişkenleri, güç akışı kısıtları ihlal edilmeden, toplam kaybı azaltacak şekilde optimize edilir.

2.2.1. Toplam Aktif Güç Kaybının Minimizasyonu (Minimization of Total Active Power Loss)

Toplam aktif güç kaybı, iletim hatları üzerindeki gerçek güç kayıplarının toplamı olarak ifade edilir. Her bir hat için hat iletkenliği ve uç gerilimlerine bağlı olarak kayıp aşağıdaki biçimde yazılır:

$$f_{gk} = \sum_{(k,m)=1}^{N_L} g_{km} [V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (15)$$

Bu denklemde, N_L iletim hatlarının sayısını, g_{km} k, m hatları arasındaki iletkenliğini, V_k ve V_m sırasıyla k ve m 'inci baraların gerilim büyüklüklerini, δ_k ve δ_m ise k ve m 'inci baralarındaki faz açılarını temsil eder.

3. Hipopotam Optimizasyon Algoritması (Hippopotamus Optimization Algorithm)

HO, doğadaki hipopotamların davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Algoritma, karmaşık optimizasyon problemlerini çözerken hipopotamların doğal yaşamlarında gözlemlenen üç farklı davranışa dayanmaktadır. Bunlar şunlardır:

- Konum Güncelleme (Exploration): Hipopotamların nehirleri ve göletleri kolaylıkla geçtikleri ve besin arama faaliyetlerinde bulundukları gözlemlenmiştir.
- Savunma (Defense): Yırtıcı hayvanların saldırılarından kendilerini korumak için bir dizi strateji kullandıkları belgelenmiştir. Bu stratejiler arasında güçlü çene hareketleri ve yüksek sesli sesler bulunmaktadır.
- Kaçış (Escape): Kişisel güvenliğin tehdit edildiği durumlarda, hayatta kalmak için güvenli bir yere hızla sığınmak zorunludur.

Bu davranışlar, optimizasyon problemleri bağlamında çözüm arama sürecine uyarlanmıştır. Her su aygırı, çözüm uzayında farklı bir aday çözümü temsil eder. Su aygırlarının hareketleri, çözüm uzayında üstün çözümler arayışı olarak modellenmiştir.

3.1. Algoritmanın Aşamaları (Steps of the Algorithm)

HO için temel sözde kod aşağıda sunulmuştur. Bu paradigmada, ilk değerler önce hipopotamlara atanır ve ardından her döngüde sırasıyla Nehir/Göl Keşfi, Avcı Savunması ve Avcıdan Kaçış/Sömürü aşamaları gerçekleştirilir. Bu bağlamda, N , D ve Max_iter sırasıyla popülasyon büyüklüğünü, problem büyüklüğünü ve maksimum yineleme sayısını belirtir.

```

1: Hipopotam_Popülasyonu = initialize(), where Hipopotam_Popülasyonu = [Hipopotam_i]
2: fitness_i = Evaluate(Hipopotam_i)
3: for t = 1: Max_iter do
4:   Baskın_Hipopotam = Hipopotam_Popülasyonu_RandomKarıştırma(i)
5:
6:   // Aşama 1: Nehir/Göl Keşif Fazı
7:   // Aşama 2: Avcı Savunma Fazı
8:   // Aşama 3: Avcıdan Kaçış/Sömürü Fazı
9:
10:  [En_iyi_fitness, En_iyi_indeks] = min(fitness)
11:  if En_iyi_fitness < Küresel_En_iyi_fitness then
12:    Küresel_En_iyi_fitness = En_iyi_fitness
13:    Küresel_En_iyi_Pozisyon = X(En_iyi_indeks,:)
14:  endif
15: endfor

```

3.1.1. Aşama 1: Nehir/Göl Keşif Fazı (Phase 1: River/Lake Exploration Phase)

Bu aşamada, nehir veya göl ortamlarındaki suaygırlarının doğal davranışları modellenmiştir. Popülasyonun ilk segmenti için iki farklı konum güncelleme stratejisi kullanılır. İlk strateji, baskın su aygırının konumuna bağlı rastgele hareket modelini kullanır. Buna karşılık, sonraki strateji, bozulma faktörü T 'ye bağlı uyarlanabilir davranışı ortaya koyar. $T > 0,6$ olduğunda, grup ortalaması ile baskın su aygırı arasındaki ilişki kullanılır; aksi takdirde, stokastik arama stratejileri kullanılır. İlk aşama için sözde kod aşağıda verilmiştir.

```

1: // Faz 1: Nehir/Göl Keşif Fazı
2: for i = 1: N/2 do
3:    $I_1 = randi([1,2]), I_2 = randi([1,2])$ 
4:   RastgeleGrup = rastgele_seç(Hipopotam_Popülasyonu)
5:   OrtalamaGrup = mean(RastgeleGrup)
6:    $Alfa = rand(1,D), rand(1,D), rand(1,D), rand(1,D), rand(1,D)$ 
7:    $A = Alfa(randi(5)), B = Alfa(randi(5))$ 
8:    $X_{p1}(i,:) = X(i,:) + rand \times (Baskın\_Hipopotam - I_1 \times X(i,:))$ 
9:    $X_{p1}(i,:) = \text{sınır\_kontrolü}(X_{p1}(i,:))$ 
10:   $T = \exp(-t/Max\_iter)$ 
11:  if  $T > 0.6$  then
12:     $X_{p2}(i,:) = X(i,:) + A \times (Baskın\_Hipopotam - I_2 \times OrtalamaGrup)$ 
13:  else
14:    if  $T > 0.5$  then
15:       $X_{p2}(i,:) = X(i,:) + B \times (OrtalamaGrup - Baskın\_Hipopotam)$ 
16:    else
17:       $X_{p2}(i,:) = \text{alt\_sınır} + rand \times (\text{üst\_sınır} - \text{alt\_sınır})$ 
18:    endif
19:  endif
20:   $X_{p2}(i,:) = \text{sınır\_kontrolü}(X_{p2}(i,:))$ 
21:   $F_{p1}(i) = \text{Evaluate}(X_{p1}(i,:))$ 
22:   $F_{p2}(i) = \text{Evaluate}(X_{p2}(i,:))$ 
23:  if  $F_{p1}(i) < fitness(i)$  then
24:     $X(i,:) = X_{p1}(i,:), fitness(i) = F_{p1}(i)$ 
25:  endif
26:  if  $F_{p2}(i) < fitness(i)$  then
27:     $X(i,:) = X_{p2}(i,:), fitness(i) = F_{p2}(i)$ 
28:  endif
29: endfor

```

3.1.2. Aşama 2: Avcı Savunma Fazı (Phase 2: Hunter Defense Phase)

Popülasyonun ikinci yarısında, hipopotamların avcılara karşı savunma davranışları simüle edilir. Rastgele avcının konumları oluşturulur ve her hipopotamın avcıdan uzaklığı hesaplanır. Levy uçuşuna dayalı rastgele yürüyüşler ve trigonometrik fonksiyonların bir kombinasyonu, su aygırının uygunluk değerine göre değişen savunma stratejilerini uygulamak için kullanılır. Bu aşamanın, algoritmanın keşif kapasitesini artırdığı ve böylece yerel optimuma hapsolmasını önlediği gösterilmiştir. İkinci aşamanın sözde kodu aşağıda verilmiştir.

```

1: // Faz 2: Avcı Savunma Fazı
2: for i = N/2 + 1: N do
3:   avcı = alt_sınır + rand(1,D) × (üst_sınır - alt_sınır)
4:   avcı = sınır_kontrolü(avcı)
5:   FHL = Evaluate(avcı)
6:   mesafe2Lider = abs(avcı - X(i,:))
7:   b = 2 + rand × 2, c = 1 + rand × 0.5
8:   d = 2 + rand, l = -2π + rand × 4π
9:   RL = levy(N,D,1.5)
10:  if fitness(i) > FHL then
11:    XP3(i,:) = RL(i,:) × avcı + (b/(c - d × cos(l))) × (1./mesafe2Lider)
12:  else
13:    XP3(i,:) = RL(i,:) × avcı + (b/(c - d × cos(l))) × (1./(2 × mesafe2Lider + rand))
14:  endif
15:  XP3(i,:) = sınır_kontrolü(XP3(i,:))
16:  FP3(i) = Evaluate(XP3(i,:))
17:  if FP3(i) < fitness(i) then
18:    X(i,:) = XP3(i,:), fitness(i) = FP3(i)
19:  endif
20: endfor

```

3.1.3. Aşama 3: Avcıdan Kaçış/Sömürü Fazı (Phase 3: Escape from the Hunter/Exploitation Phase)

Yerel bir sömürü stratejisi tüm popülasyona uygulanır. Uygulama, yineleme sayısına göre dinamik olarak ayarlanan yerel olarak güncellenen sınırları kullanır, böylece her bir su aygırının mevcut konumu etrafında ince ayar yapılmasını sağlar. Bu aşama, algoritmanın yakınsama hızını artırarak ve küresel optimumda hassas bir arama gerçekleştirerek bulunan çözümlerin kalitesinin optimizasyonunda önemli bir rol oynar. Son aşamanın sözde kodu aşağıda verilmiştir.

```

1: // Faz 3: Avcıdan Kaçış/Sömürü Fazı
2: for i = 1: N do
3:   ALT_YEREL = alt_sınır/t, ÜST_YEREL = üst_sınır/t
4:   Alfa = rand(1,D), rand(1,D), rand(1,D)
5:   D = Alfa(randi(3))
6:   XP4(i,:) = X(i,:) + rand × (ALT_YEREL + D × (ÜST_YEREL - ALT_YEREL))
7:   XP4(i,:) = sınır_kontrolü(XP4(i,:))
8:   FP4(i) = Evaluate(XP4(i,:))
9:   if FP4(i) < fitness(i) then
10:    X(i,:) = XP4(i,:), fitness(i) = FP4(i)
11:   endif
12: endfor

```

Bu üç faz birlikte, algoritmanın keşif-sömürü dengesini sağlayarak etkili bir optimizasyon performansı sunar. HO algoritmasına ait kullanılan parametrik değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Hipopotam Optimizasyon algoritmasına ait parametrik değerler
(Parametric values for the Hippopotamus Optimization algorithm)

Kategori	Parametre	Değer
Girdi (Fonksiyon Argümanları)	Arama ajanları	50
	Maksimum iterasyon	1000
Aşama 1 (Keşif/Exploration)	Alt Sınırlar	[0.95]
	Üst Sınırlar	[1.05]
	[I ₁ , I ₂]	[1, 2] (Rastgele Sayı)
	[I _{p1}]	[0, 1] (Rastgele Sayı)
Aşama 2 (Savunma)	Strateji Eşiği	0.6
	b	[2, 4] (Uniform Rastgele)
	c	[1, 1.5] (Uniform Rastgele)
	d	[2, 3] (Uniform Rastgele)
	l (Açı)	[-2\pi, 2\pi]
	Levy Uçuşu Katsayısı	0.05
Aşama 3 (Sömürü/Exploitation)	Levy Beta	1.5
	Yerel Sınırlar	lb/t ve ub/t
	Alpha (Alfa)	Çeşitli Rastgeleler
	Levy Uçuşu Katsayısı	0.05
	Levy Beta	1.5

3.2. HO Algoritmasının OPF'ye Adaptasyonu (Adaptation of the HO Algorithm to the OPF)

OPF'nin yapılandırması göz önüne alındığında, her kontrol değişkeninin farklı sınır değerleri ile karakterize olduğu açıktır. Sonuç olarak, mevcut optimizasyon algoritmalarının kullanımında zorluklar ortaya çıkmaktadır. HO algoritmasında da benzer bir sorun tespit edilmiştir. Farklı sınır değerlerinin yarattığı zorlukları gidermek için algoritmanın değiştirilmesi zorunludur. Sınır değerlerini kontrol etmek için *sınır_kontrolü()* olarak bilinen fonksiyon HO algoritmasına uyarlanmıştır. Uyarlama sürecini kolaylaştırmak için aşağıdaki sözde kod sunulmuştur.

```
% Sınır kontrolü fonksiyonu
sınır_kontrolü()
for d=1:dimension
    L(d) = min(max(L(d), alt_sınır(d)), üst_sınır(d));
end
```

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Önerilen HO algoritmasının geçerliliğini ve diğer yöntemlere kıyasla üstünlüğünü göstermek amacıyla, standart IEEE 14 baralı ve Türkiye 22 baralı test sistemlerinde aktif güç optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Her iki sistem üzerinde yürütülen çalışmaların ayrıntıları aşağıda sunulmuştur.

4.1. IEEE 14 Baralı Test Sistemi Üzerindeki Çalışmalar (Studies on the IEEE 14-Bus Test System)

IEEE 14 baralı standart test sistemine ait hat ve bara verileri, (Yoshida vd., 2000) referansında bulunmaktadır. Sistem konfigürasyonu şu şekildedir: 1 numaralı bara salınım barasıdır; 1, 2, 3, 6 ve 8 numaralı baralarda toplam beş generatör bulunmaktadır. 4-7, 4-9 ve 5-6 baraları arasına üç adet kademe ayarlı transformatör yerleştirilmiştir. Ayrıca 9 ve 14 numaralı baralarda iki adet şönt kompanzatör mevcuttur. Toplam talep 259.0 MW aktif güç ve 73.5 MVar reaktif güçtür.

Generatör çıkış gerilimleri 0.95–1.10 p.u aralığında sınırlandırılmıştır. Diğer kontrol değişkenleri kapsamında, kademe ayarlı transformatörlerin oranları 0.90–1.10 p.u aralığında tutulmuş; şönt kompanzatörler ise her bir ünite için en fazla 30 MVar kapasitif reaktif güç sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Tablo 2'de HO algoritmasıyla elde edilen sonuçlar, literatürde raporlanan alternatif algoritmalarla karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2 ayrıntılı olarak incelendiğinde, önerilen HO algoritmasının IEEE 14 baralı test sisteminde aktif güç kaybını başlangıç durumuna göre 1.148 MW azaltarak 12.342 MW seviyesine düşürdüğü görülmektedir. Bu sonuç, %8.51 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Ayrıca, aynı koşullar altında yapılan karşılaştırmada HO algoritmasının, ACOR, ABC, LCA, DE, MTLA, PSO ve BSO algoritmalarına kıyasla sırasıyla 0.7806 MW, 0.6494 MW, 0.6471 MW, 0.7633 MW, 0.5686 MW, 0.0580 MW, 0.908 MW ve 0.039 MW daha düşük kayıp ürettiği belirlenmiştir.

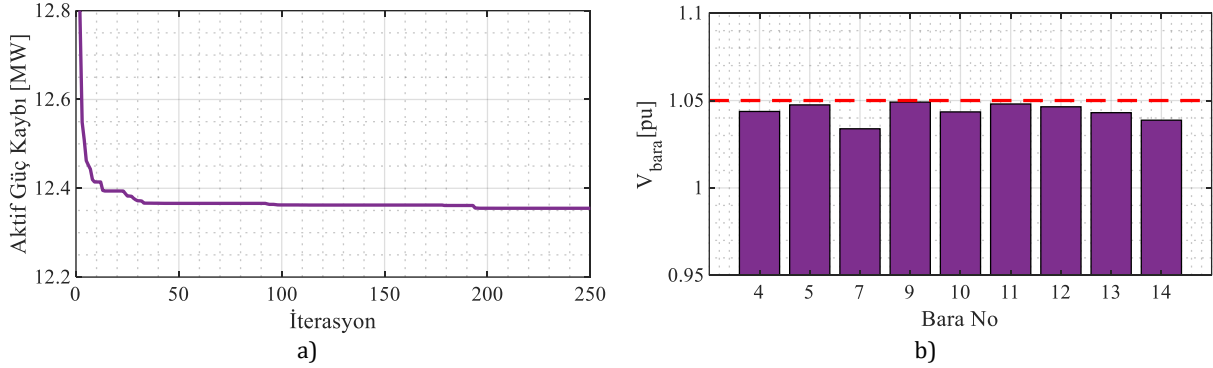
Tablo 2. IEEE 14 baralı sisteme ait optimizasyon sonuçları
(Optimization results for the IEEE 14-bus system)

Değiş. Temel	Aktif Güç Kaybı											HO
	ACOR (Ghasemi vd., 2014)	ABC (Ghasemi vd., 2014)	LCA (Ghasemi vd., 2014)	DE (Ghasemi vd., 2014)	MTLA (Ghasemi vd., 2014)	PSO (Medani vd., 2018)	PSO- TVAC (Medani vd., 2018)	MGB TLBO (Ghasemi vd., 2015)	BSO (Shaheen vd., 2018)	SCA (Saddique vd., 2022)	WOA (Medani vd., 2018)	
P _{G1}	232,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	231,28
V ₁	1,060	1.0672	1.07516	1.07423	1.07478	1.07466	1.1008	1.092	1.1	1.09	1.09	1.100
V ₂	1,045	1.04964	1.05661	1.05805	1.04918	1.05667	1.0804	1.085	1.0791	1.07	1.08	1.0859
V ₃	1,01	1.01708	1.02792	1.02571	1.01595	1.02729	1.044	1.058	1.0484	1.04	1.05	1.0566
V ₆	1,07	1.04433	1.0361	1.00892	1.02832	1.05069	1.0253	1.094	1.0553	1.05	1.09	1.0858
V ₈	1,09	1.05039	0.9802	0.96407	1.0415	1.01112	1.077	1.062	1.0326	1.05	1.09	1.1
Q _{C9}	0	0.27	0.29	0.26	0.16	0.3	0.086	0.2246	0.3	0.15	0.16	0.171
Q _{C14}	0	0.08	0.09	0.1	0.12	0.07	0.07	0.0901	0.07	0.06	0.05	0.082
T ₄₋₇	1,060	0.97	1.1	1.08	0.95	1.04	1.0357	0.9618	1.01	0.99	0.95	0.958
T ₄₋₉	1,045	1.08	0.9	0.99	1.09	0.93	1.019	1.0355	1.01	0.99	0.94	1.045
T ₅₋₆	1,01	1.0	1.08	1.07	1.0	1.04	1.07	1.0311	1.03	0.98	1.03	1.016
f _{gk} (MW)	13,49	13.1226	12.9914	12.9891	13.1053	12.9106	12.381	12.211	12.310	12.4	12.25	12.25
												12,342

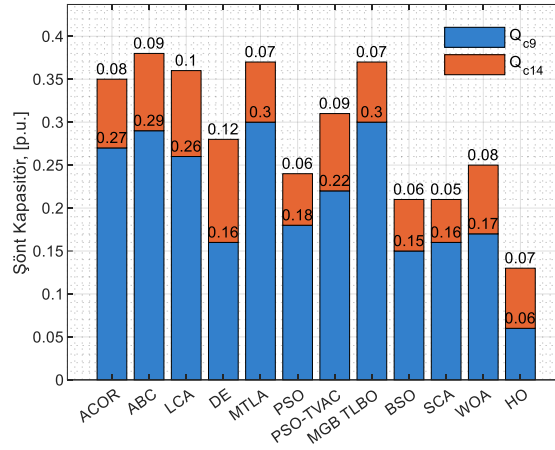
Önerilen yöntemin aktif güç kaybını azaltma performansına ilişkin yakınsama eğrisi Şekil 1.a'da sunulmuştur. HO algoritması, etkin arama kabiliyeti ve yerel minimumlardan kaçınma yeteneği sayesinde kısa sürede düşük

değere ulaşmıştır. Şekil 1.b'de ise yük baralarına ait gerilimlerin 0.95–1.05 p.u aralığında kaldığı açıkça görülmektedir. Bu çalışmada yük baralarına ilişkin gerilim sınırlarının aşılmamasına özellikle dikkat edilmiştir. Grafikten, 9 numaralı bara dışında tüm baraların üst sınırın altında işletildiği anlaşılmaktadır.

Buna ek olarak, HO algoritması aktif güç kaybını azaltırken 9 ve 14 numaralı baralara kurulu şönt kompensatörlerden, diğer algoritmalarla göre daha düşük düzeyde reaktif güç desteği kullanarak çözüm üretmiştir. Nitekim önerilen yaklaşım toplamda 12.4 MVar kompensatör gücüyle sonuç elde etmiştir. Şekil 2, şönt kompensatör kullanımındaki bu tasarrufu açık biçimde ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, HO algoritması, diğer tüm yöntemlere kıyasla daha düşük miktarda şönt kompensatör gücü kullanarak en düşük aktif güç kaybına ulaşmayı başarmıştır.



Şekil 1. 14 baralı test sistemine aktif güç kaybı optimizasyon sonuçları a) Yakınsama eğrisi b) Yük baralarının gerilim profili (Active power loss optimization results for the 14- bus test system a) Convergence curve b) Voltage profile of the load buses)

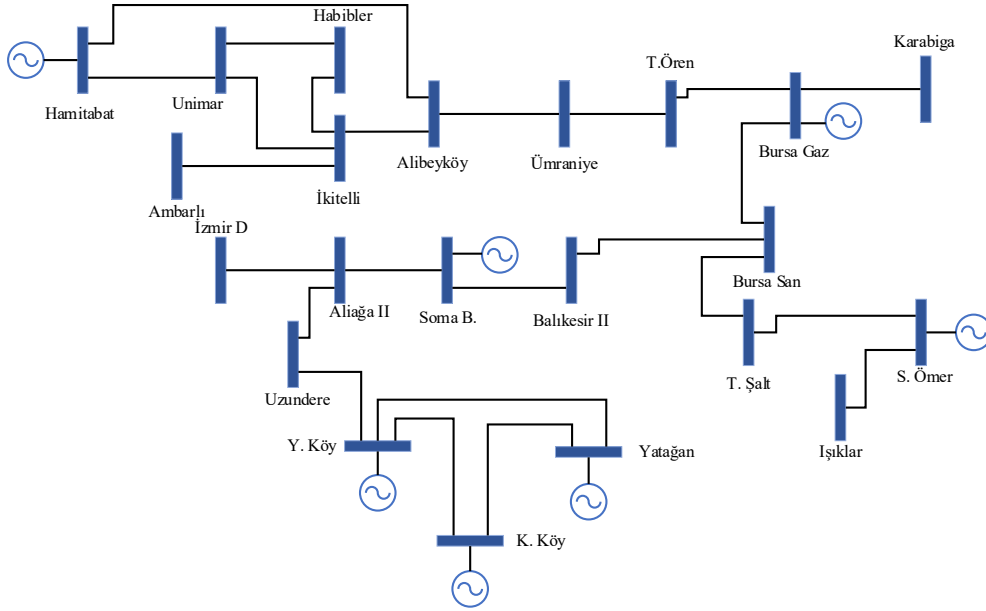


Şekil 2. 14 baralı test sisteminde HO algoritması toplam şönt kompensatör değerinin literatürdeki algoritmalar ile kıyaslanması (Comparison of the HO algorithm in a 14- bus test system with total shunt compensator values using algorithms in the literature)

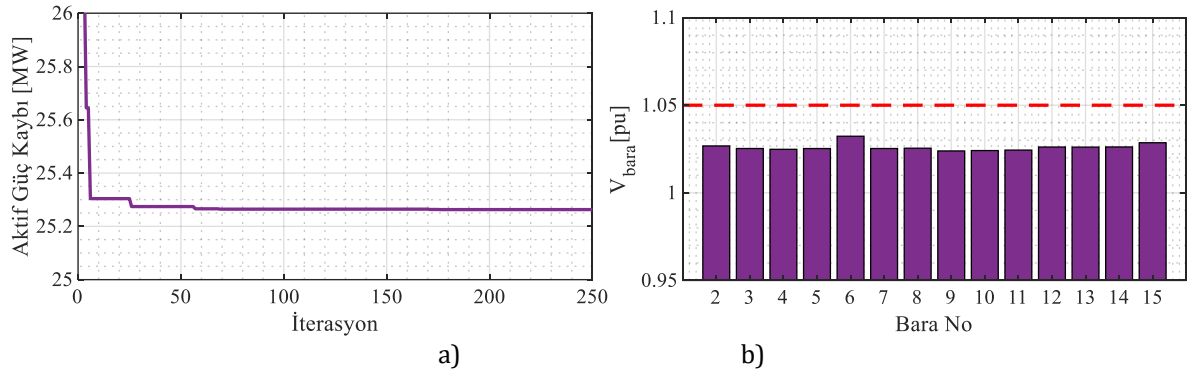
4.2. 22 Baralı Türkiye Sistemi Üzerindeki Çalışmalar (Studies on the 22-Bus Turkish System)

İkinci test sistemi olarak 380 kV seviyesinde çalışan 22 baralı Türkiye sistemi incelenmiştir (Kurban ve Filik, 2007). Sistemin şematik gösterimi Şekil 3'te sunulmaktadır. Bu sistem için aktif güç kaybının azaltılmasına yönelik bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Güç sistemindeki sekiz generatöre ait gerilimler kontrol değişkenleri olarak seçilmiş ve generatör gerilimleri tanımlı işletme sınırları içinde tutularak optimal çalışma noktaları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te ayrıntılı biçimde verilmektedir.

Optimizasyon sonrasında aktif güç kaybı, başlangıç durumuna kıyasla 102.0071 MW azaltılmış; bu da %80.15 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. HO algoritması, yüksek arama hızı ve yerel minimumlardan kaçınma yetkinliği sayesinde bu sonucu elde etmeyi başarmıştır. Şekil 4.a'daki yakınsama eğrisi bu bulguyu doğrulamaktadır. Ayrıca, Şekil 4.b'de tüm yük baralarına ait gerilimlerin sınır değerler ihlal edilmeksizin 0.95–1.10 p.u aralığında tutulduğu gösterilmektedir.



Şekil 3. Türkiye 22 baralı güç sistemi (Türkiye 22-bus power system)



Şekil 4. Türkiye 22 bara aktif güç kaybı optimizasyon sonuçları a) Yakınsama eğrisi b) Yük baralarının gerilim profili (Active power loss optimization results for the Türkiye 22-bus a) Convergence curve b) Voltage profile of the load buses)

Tablo 3. 22 baralı sistemine ait optimizasyon sonuçları (Optimization results for the 22-bus system)

Değişkenler	Limitler	Temel	HO
P_{G1}	[190 1120]	466,270	361,5551
V_1	[0,95 1,05]	1,015	1,0235
V_{16}	[0,95 1,05]	1,015	1,0236
V_{17}	[0,95 1,05]	1,0172	1,0236
V_{18}	[0,95 1,05]	1,01116	1,0237
V_{19}	[0,95 1,05]	1,017	1,0238
V_{20}	[0,95 1,05]	1,012	1,0237
V_{21}	[0,95 1,05]	1,012	1,0234
V_{22}	[0,95 1,05]	1,0251	1,0233
f_{gk} (MW)		127,27	25,2629

5. Sonuç (Result)

Bu çalışmada, Optimal Reaktif Güç Dağıtımı (ORPD) probleminin çözümü için doğadan esinlenen Hipopotam Optimizasyon (HO) algoritması başarıyla uygulanmıştır. IEEE 14 baralı ve Türkiye 22 baralı güç sistemleri üzerinde yapılan analizler, yöntemin hem yakınsama hızı hem de çözüm kalitesi açısından literatürdeki mevcut yöntemlerden (PSO, DE, ABC vb.) daha rekabetçi olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuçların fiziksel açıdan değerlendirilmesi, HO algoritmasının reaktif güç akışını optimize ederek sistemdeki gereksiz dolaşım akımlarını minimize ettiğini ortaya koymaktadır. Özellikle şönt kapasitörlerin ve generatör eksitasyonlarının optimal koordinasyonu sayesinde, reaktif güç yük merkezlerine daha yakın noktalarda üretilmiş, bu da iletim hatları üzerindeki reaktif yükü hafifleterek aktif güç kayıplarının %8,51 (IEEE-14) ve %80,15 (Türkiye 22) oranlarında azalmasını sağlamıştır. Ayrıca, algoritmanın literatürdeki diğer yöntemlere kıyasla daha az harici şönt kompanzasyon desteğine (12.4 MVar) ihtiyaç duyması, sistemin mevcut generatör ve transformatör kapasitelerini sınırlara takılmadan maksimum verimle kullanabildiğini göstermektedir. Bu durum, sistem operatörleri için ek

yatırım maliyeti gerektirmeyen, operasyonel verimliliği yüksek bir işletme stratejisi sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda HO algoritması büyük ölçekli ve modern güç sistemlerinin artan karmaşıklığı göz önüne alındığında enterkonnekte sistemlere uyarlanarak aktif güç kaybı minimizasyonunun yanı sıra, gerilim sapsmasının minimizasyonu ve işletme maliyetlerinin azaltılması gibi çelişen hedeflerin aynı anda ele alındığı çok amaçlı HO formülasyonları geliştirilmelidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr ve güneş) sisteme entegrasyonu ile ortaya çıkan stokastik üretim profilleri ve yük belirsizlikleri, senaryo tabanlı veya robust optimizasyon teknikleri ile modele dahil edilmelidir. Bu geliştirmeler, HO algoritmasının büyük ölçekli ve belirsizlik içeren akıllı şebeke uygulamalarında da güvenilir bir karar destek mekanizması olmasını sağlayacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Amiri, M.H., Mehrabi Hashjin, N., Montazeri, M., Mirjalili, S., Khodadadi, N., 2024. Hippopotamus optimization algorithm: a novel nature-inspired optimization algorithm. *Sci. Rep.* 14, 1–50. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54910-3>
- Basu, M., 2016. Quasi-oppositional differential evolution for optimal reactive power dispatch. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 78, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.067>
- Biswas, P.P., Suganthan, P.N., Mallipeddi, R., Amaratunga, G.A.J., 2019. Optimal reactive power dispatch with uncertainties in load demand and renewable energy sources adopting scenario-based approach. *Applied Soft Computing Journal* 75, 616–632. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.11.042>
- Bjelogrić, 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, 1447–1454. <https://doi.org/10.1109/59.99399>
- Cai, J., Ma, X., Li, Q., Li, L., Peng, H., 2009. A multi-objective chaotic particle swarm optimization for environmental/economic dispatch. *Energy Convers. Manag.* 50, 1318–1325. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.01.013>
- Carpentier, J., 1962. Contribution à l'étude du dispatching économique. *Bull. Soc. Française Electriciens* 8, 431–447.
- Dai, C., Chen, W., Zhu, Y., Zhang, X., 2009. Seeker optimization algorithm for optimal reactive power dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems* 24, 1218–1231. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2021226>
- Duman, S., Sönmez, Y., Güvenç, U., Yörükeren, N., 2012. Optimal reactive power dispatch using a gravitational search algorithm. *IET Generation, Transmission and Distribution* 6, 563–576. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2011.0681>
- Ghasemi, M., Ghanbarian, M.M., Ghavidel, S., Rahmani, S., Mahboubi Moghaddam, E., 2014. Modified teaching learning algorithm and double differential evolution algorithm for optimal reactive power dispatch problem: A comparative study. *Inf. Sci. (N. Y.)* 278, 231–249. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.03.050>
- Ghasemi, M., Taghizadeh, M., Ghavidel, S., Aghaei, J., Abbasian, A., 2015. Solving optimal reactive power dispatch problem using a novel teaching-learning-based optimization algorithm. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 39, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.12.001>
- Güvenç, U., Kaymaz, E., 2019. Economic Dispatch Integrated Wind Power Using Coyote Optimization Algorithm, in: 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair, ICSG 2019 - Proceedings. Istanbul, pp. 179–183. <https://doi.org/10.1109/SGCF.2019.8782354>
- Khazali, A.H., Kalantar, M., 2011. Optimal reactive power dispatch based on harmony search algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 33, 684–692. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.11.018>
- 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 and Distribution* 5, 249–256. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0256>
- Kurban, M., Filik, Ü., 2007. Türkiye'deki 22 Baralı 380 Kv'luk Güç Sisteminin İki Farklı Yöntem Kullanılarak Ekonomik Dağıtım Analizi. *Sakarya University Journal of Science* 11, 78–86. <https://doi.org/10.16984/saufbed.11036>
- 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 and Energy Systems* 64. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.008>
- Mahadevan, K., Kannan, P.S., 2010. Comprehensive learning particle swarm optimization for reactive power dispatch. *Applied Soft Computing Journal* 10. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.08.038>
- Medani, K. ben oualid, Sayah, S., Bekrar, A., 2018. Whale optimization algorithm based optimal reactive power dispatch: A case study of the Algerian power system. *Electric Power Systems Research* 163. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.001>
- Naderi, E., Narimani, H., Fathi, M., Narimani, M.R., 2017. A novel fuzzy adaptive configuration of particle swarm optimization to solve large-scale optimal reactive power dispatch. *Applied Soft Computing Journal* 53. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.01.012>
- Nguyen, T.T., Vo, D.N., 2020. Improved social spider optimization algorithm for optimal reactive power dispatch problem with different objectives. *Neural Comput. Appl.* 32. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04073-4>
- Quintana, V.H., Santos-Nieto, M., 1989. Reactive-power dispatch by successive quadratic programming. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 4. <https://doi.org/10.1109/60.43245>
- Saadat, H., 2011. *Power System Analysis: Third Edition. Systems, Controls, Embedded Systems, Energy, and Machines.*

- Saddique, M.S., Habib, S., Haroon, S.S., Bhatti, A.R., Amin, S., Ahmed, E.M., 2022. Optimal Solution of Reactive Power Dispatch in Transmission System to Minimize Power Losses Using Sine-Cosine Algorithm. IEEE Access 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3152153>
- Shaheen, A.M., El-Sehiemy, R.A., Farrag, S.M., 2018. Integrated Strategies of Backtracking Search Optimizer for Solving Reactive Power Dispatch Problem. IEEE Syst. J. 12. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2016.2573799>
- Tudose, A.M., Picioroaga, I.I., Sidea, D.O., Bulac, C., 2021. Solving single-and multi-objective optimal reactive power dispatch problems using an improved salp swarm algorithm. Energies (Basel). 14. <https://doi.org/10.3390/en14051222>
- Varadarajan, M., Swarup, K.S., 2008. Solving multi-objective optimal power flow using differential evolution. IET Generation, Transmission and Distribution 2. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20070457>
- Yoshida, H., Kawata, K., Fukuyama, Y., Takayama, S., Nakanishi, Y., 2000. A Particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment. IEEE Transactions on Power Systems 15. <https://doi.org/10.1109/59.898095>
- Zamzam, T., Shaban, K., Massoud, A., 2023. Optimal Reactive Power Dispatch in ADNs using DRL and the Impact of Its Various Settings and Environmental Changes. Sensors 23. <https://doi.org/10.3390/s23167216>