



## Optimal load flow via modified water cycle algorithm

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

Department of Computer Engineering, Inonu University, Malatya,44040, Turkey

### Highlights:

- Optimal power flow
- Modified water cycle algorithm
- Reducing the losses in power systems

### Keywords:

- Optimal load flow
- MWCA
- Efficiency in power systems
- Optimization

### Article Info:

Research Article  
Received:08.04.2019  
Accepted: 01.01.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.550770

### Graphical/Tabular Abstract

In this paper, Modified Water Cycle Algorithm (MWCA) has been applied to Optimal Power Flow (OPF) problem to ensure optimum load flow. The aim of study is to minimize the total fuel cost and active power losses. The optimization algorithm has been applied to the IEEE 30-bus test system and a section of the virtual model of the South Marmara transmission system for optimal load flow. The results with MWCA are compared with the other results in the literature. Table A shows that MWCA provides an effective solution than the compared results.

**Table A.** Comparison of the cost functions of different algorithms

Method	$P_{\text{total-fuel}} (\$/h)$	$P_{\text{loss}}(\text{MW})$	Method Name	Reference
MWCA	798.9021	3.0855	Modified water cycle algorithm	
MFPA	799.1592	-	Modified Flower pollination algorithm	[26]
ESDE	799.3881	3.0192	Enhanced self-adaptive differential evolution	[27]
FHSA	799.914	-	Fuzzy harmony search algorithm	[28]
SCA	800.102	2.9424	Sine-Cosine algorithm	[29]
ARCBBO	800.5159	3,1009	Adaptive real coded biogeography-based	[30]
MSA	800.509	3.1005	Moth swarm algorithm	[18]
AGSO	801.75	-	Adaptive group search optimization	[31]
IABC	799.321	3.0856	Improved artificial bee colony	[32]
GSO	799.06	-	Glowworm swarm optimization	[33]
WOA	798.9225	-	Whale optimization algorithm	[34]
MALA	799.1436	5.639	Modified ant lion algorithm	[35]

### Correspondence:

Author: Ozan Akdağ  
e-mail: ozanakdag@live.com  
phone: +90 422 377 4831

**Purpose:** The purpose of this paper is to minimize the total fuel cost and active power loss in the power system given using the MWCA algorithm.

### Theory and Methods:

The Solution problem aims to optimize a selected object function such as fuel cost, active power loss, etc. by adjusting the power system control variables while satisfying various equality and inequality constraints. Here, the effectiveness of the algorithm for solving the OPF problem was tested on the IEEE 30-bus test system and a cross-section of the South Marmara transmission system.

### Results:

The fuel cost and total active power losses are computed as 798.9021\$/h, and 3.0855 MW by MWCA, respectively. Optimum values obtained by MWCA have produced better results than most of the algorithms presented in the literature.

### Conclusion:

In this study, IEEE 30-bus test system and a cross-section of South Marmara Energy system have been used to present the minimization of active power losses and fuel cost via MWCA.



## İyileştirilmiş su çevrim algoritmasıyla optimal yük akışı

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

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

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Optimal Yük Akışı
- İyileştirilmiş Su Çevrim Algoritması
- Güç Sistemlerinde kayıpların azaltılması

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 08.04.2019  
Kabul: 01.01.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.550770

#### Anahtar Kelimeler:

Optimal yük akışı,  
iyileştirilmiş su çevrim  
algoritması,  
güç sistemlerinde verimlilik,  
optimizasyon

#### ÖZET

Güç sistemleri, üretim aşamasından tüketim aşamasına kadar karmaşık bir yapıdadır. Elektrik enerjisinin tüketiciye sürekli, güvenilir, kaliteli ve ekonomik olarak ulaştırılması üretim/iletim/dağıtım aşamalarında kesintisiz ve optimize edilmiş enerji akışının sağlanmasına bağlıdır. Optimum Yük Akışı (OYA) problemi jeneratörler/bara gerilimleri, kademe dönüştürücüleri aktif/reaktif gücü güvenli sınırlarında tutup, yakıt maliyeti ve aktif/reaktif güç kayıpları gibi parametrelerini optimize etmeyi hedefler. Bu nedenle güç sistemlerinde OYA probleminin etkili bir yöntemle optimize edilmesi önemlidir. Bu yayın, OYA problemini çözmek için yeni bir sezgisel algoritma olan İyileştirilmiş Su Çevrim Algoritması (İSÇA)'nı kullanmaktadır. Önerilen yöntem farklı amaç fonksiyonlarına sahip IEEE 30 bara güç sistemi üzerinde uygulanmıştır. Önerilen yöntemin etkinliği ve esnekliği literatürde yakın zamanda yayınlanmış diğer sezgisel yöntemlerin sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılarak tartışılmıştır. Bu çalışmada İSÇA yöntemiyle IEEE 30 bara güç sistemine ait önemli sonuçlarından biri olan yakıt maliyetinin sonucu 798.9021 \$/s hesaplanmıştır. Bu veri, çalışmada bildirilen güncel yöntemlere ait yakıt maliyeti sonuçlarından daha iyidir. Ayrıca bu yayında sunulan yöntem gerçek bir güç sistemi olan 154 kV Güney Marmara iletim sisteminin bir kesitinin sanal modeline uygulanarak, gerçek zamanlı bir sistemde aktif güç kayıplarının azaltılmasının sağlanabileceği gösterilmiştir.

## Optimal load flow via modified water cycle algorithm

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

- Optimal Load Flow
- Modified water cycle algorithm
- Reducing losses in power systems

#### Article Info

Research Article  
Received:08.04.2019  
Accepted: 01.01.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.550770

#### Keywords:

Optimal power flow,  
modified water cycle  
algorithm,  
efficiency in power systems,  
optimization

#### ABSTRACT

Power systems are getting more complex structure from production to consumption stages. The continuous, reliable, quality and economical delivery of electrical energy to the consumer depends on ensuring uninterrupted and optimized energy flow during the production/transmission/distribution stages. Optimum Power Flow (OPF) problem goals to optimize the parameters such as fuel cost, active/reactive power losses, etc by keeping the generators/ bus voltages, tap setting and active/reactive power within their secure limits. Therefore, it is important to optimize load flow in power systems with an effective method. This paper uses a recent heuristic algorithm, named as the Modified Water Cycle Algorithm (MWCA), for the OPF problem. For the purpose demonstrate the effectiveness of the recommended method, it has been analyzed on the IEEE 30 bus power system for varied object functions. The validity and flexibility of this algorithm are discussed by comparison with numerical conclusion of the many newly published heuristic methods in the literature. In this study, the result of the of fuel cost, which is important results of the IEEE 30 bus test system, is computed using MWCA as \$798.9021/s. This value is best the fuel cost results of various methods reported in the study. In addition, this method, has applied to a part of the virtual model of 154 kV South Marmara transmission system to show that the active power losses of transmission system could be reduced in a real-time system.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç sistemlerinde kullanılan ekipmanların istenilen işletme sınırları içinde kalarak, jeneratörler ve baraların birbirleri arasında uygun güç alışverişini sağlaması OYA olarak tanımlanır [1, 2]. OYA güç sistemlerinde optimum parametreleri seçerek, üretim/tüketim dengesini sağlar [3]. Güç sistemlerinde OYA, eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarıyla ilgili amaç fonksiyonunu çözmeyi hedefler. OYA problemlerinin çözümü literatürde çok geniş yer tutar. 1950'lerde büyük ölçekli güç sistemleri parçalanarak, bara admitans matrisi hesaplanırdı. Daha sonra parçalanmış bu güç sistemleri birleştirilerek yük akışı analizi yapılırdı [4]. OYA problemi 1950'lerin ortasına gelindiğinde kayıp formülü yaklaşım metodu ile çözülmeye çalışılmıştır [5, 6]. Sonra geçmiş çalışmaların alternatifi olacak daha az sayıda iterasyon ile çözüme yakınsayacak Newton Raphson yöntemi geliştirilmiştir [2]. Daha sonraki yıllarda birçok çözüm tekniği; doğrusal programlama [7], doğrusal olmayan programlama [8], kuadritik programlama [9], tamsayı programlama [10] OYA probleminin çözümü için sunulmuştur. Bu teknikler güç sistemlerinde uzun yıllar kullanılmıştır. Ancak yıllar geçtikçe gelişen teknolojiyle ortaya çıkan daha karmaşık güç sistemlerinin analiz edilmesi için literatürde daha verimli sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmaya başlanmıştır. Örnek olarak; IEEE 30 bara güç sisteminde farklı amaç fonksiyonlarının (yakıt maliyetinin minimize edilmesi, voltaj profilinin iyileştirilmesi ve voltaj kararlılığının geliştirilmesi... gibi) çözümü için parçacık sürü optimizasyon algoritması [11], tabu arama algoritması [12], genetik algoritma [13] gibi çok çeşitli sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Genetik algoritma ve parçacık sürüsü optimizasyon algoritmaları bir araya getirilerek oluşturulan hibrid algoritma örnek bir güç sisteminde OYA probleminin çözümü için kullanılmıştır [14]. Diğer bir çalışmada ise 16, 33 ve 69 bara güç sisteminde ağı yeniden yapılandırılması probleminde bakteriyel yiyecek arama algoritması kullanılmıştır [15]. Kaotik yapay arı koloni algoritması ile OYA problemine ek kısıtlamalar getirilerek, IEEE 30 bara güç ve yeni İngiltere 39 bara güç sistemine uygulanmıştır [16]. Geliştirilmiş çarpışma optimizasyon algoritması IEEE 30 ve 118 bara güç sisteminde yakıt maliyetinin minimize edilmesi probleminde uygulanmıştır [17]. Levy yaklaşımı güve sürüsü algoritması kısıtlı OYA probleminin çözümü için IEEE 30, 57, 110 bara güç sistemlerine uygulanmıştır [18]. Balina algoritması OYA probleminin çözümü için IEEE 14, 30 bara güç sistemi ve Cezayir elektrik şebekesinin bir bölümüne uygulanmıştır [19]. Yusufçuk algoritması ve parçacık sürüsü algoritması kullanılarak oluşturulan hibrid algoritma IEEE 30 ve 57 bara güç sistemlerinde OYA probleminin çözümü için uygulanmıştır [20].

Literatürde İŞÇA, güç sistemlerinde yönlü aşırı akım koordinasyon probleminde uygulanmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır [21]. Bu çalışmada ise farklı bir güç sistemi problemi olan OYA'ya ilk kez uygulanarak, literatüre katkı

sağlanmıştır. OYA probleminin çözümü için sunulan yöntemin etkinliğini ve performansını göstermek amacıyla bu yöntem IEEE 30 bara güç sisteminde farklı amaç fonksiyonlarının çözümüne uygulanmış, daha sonra literatürdeki diğer güncel teknikler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu algoritma 11 baralık 154 kV Güney Marmara iletim sisteminin sanal modelinde de deneyerek, sonuçlar yorumlanmıştır. Bu sanal model ile aktif güç kayıplarının azaltılmasının sağlanabileceği gösterilmiştir.

## 2. GÜÇ SİSTEMİ MODELİ (MODEL OF POWER SYSTEM)

Bu bölümde OYA analizi için yaygın olarak kullanılan bir güç sistemi modeli ve gerçek zamanlı çalışan güç sistemine ait modeller sunulmuştur.

### 2.1. IEEE 30 Baralı Güç Sistemi (IEEE 30 Bus power system)

Şekil 1'de IEEE 30 bara güç sistemi görülmektedir. Bu güç sistemine ait jeneratör maliyeti, yük, şönt kapasitör, iletim hatları ve sistem verileri [22]'den alınmıştır. Güç sistemlerinde hat, jeneratör, transformatör gibi elektriksel teçhizatlarının empedansları kendi anma gerilim ve güçleri cinsinden birim değer per-unit (pu) olarak ifade edilir. IEEE 30 bara güç sisteminde temel güç 100 MVA olarak alınmıştır [32]. Bu sistemdeki tüm analizler için bara gerilimleri 0,9 pu – 1.1 pu arasındadır [22]. Bu yayında IEEE 30 bara güç sisteminde Su Çevrim Algoritması (SÇA) ve İŞÇA ile OYA problemi çözülmüştür.

### 2.2. 154 kV Marmara İletim Sistemi Kesiti (A section of South Marmara 154 kV Transmission System)

11 baralı Güney Marmara iletim sisteminin tek hat şeması Şekil 2'de görülmektedir. Bu iletim sisteminin gerçek güç sisteminden alınan yaklaşık değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Baralara ait üretim/tüketim verileri (gerçek zamanlı çalışan güç sistemi verilerinin ortalama değerleri) ise Tablo 2'de verilmiştir. Bu güç sisteminde bara gerilimlerinin sınırları 0,95 pu- 1,05 pu arasındadır. 11 baralı Güney Marmara iletim sisteminin talep ettiği aktif güç 364 MW iken reaktif güç 23,1 MVAR'dır.

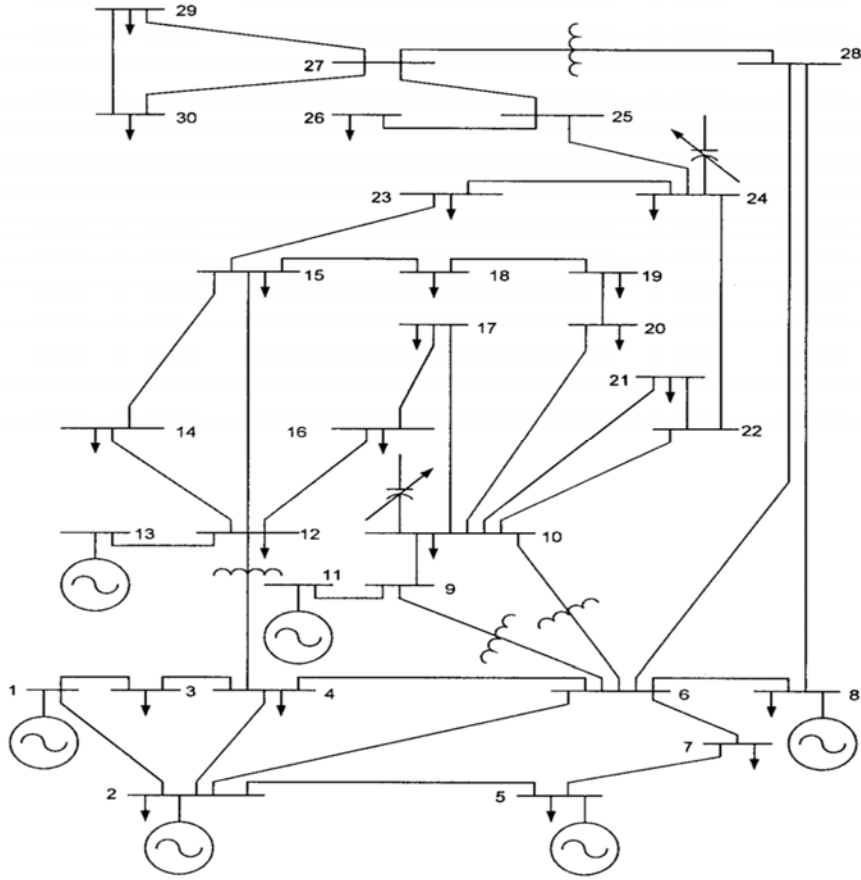
## 3. OPTİMAL YÜK AKIŞI TEORİK TEMELLERİ (THEORETICAL BASICS OF OPTIMAL POWER FLOW)

OYA problemi çoklu veya tekli amaç fonksiyonları ile optimal kontrol değişkenlerini belirleyerek, eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları altında çözüm arayan doğrusal olmayan konveks optimizasyon problemi olarak bilinir ve Eş. 1-Eş. 3 ile ifade edilir [3].

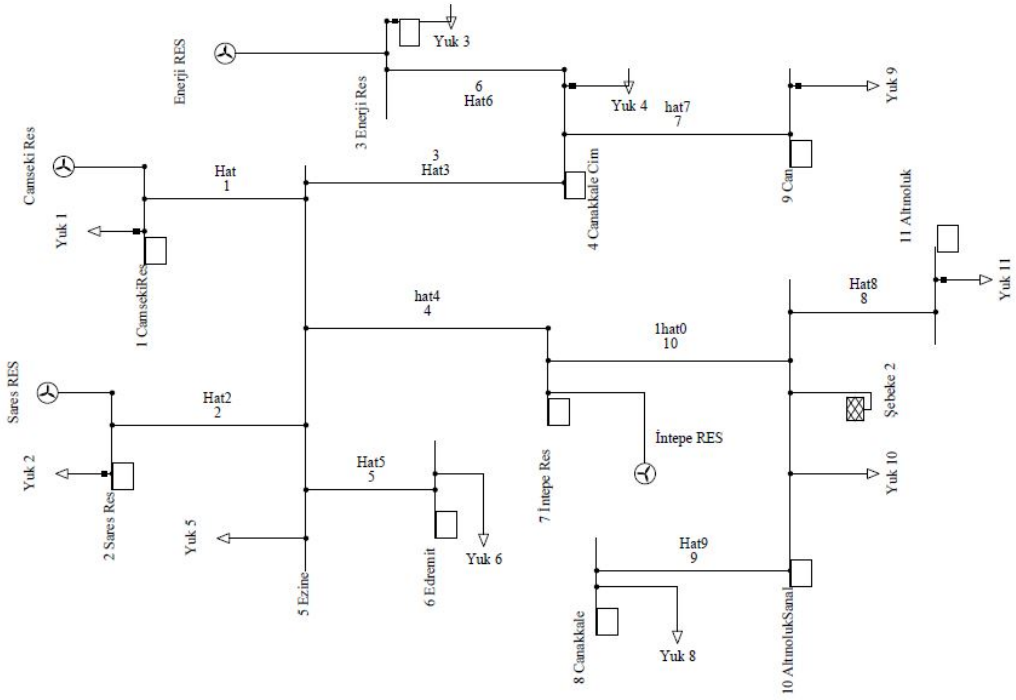
$$\min p(m, n) \quad (1)$$

$$r(m, n) = 0 \quad (2)$$

$$s(m, n) \leq 0 \quad (3)$$



Şekil 1. IEEE 30 bara güç sistemi (IEEE 30 bus power system) [22]



Şekil 2. 11 baralık 154 kV Güney Marmara iletim sisteminin tek hat şeması  
(Single line scheme of South Marmara transmission system)

**Tablo 1.** 154 kV Güney Marmara Güç Sistemine ait Bara değerleri  
(Data for 154 kV single line scheme of South Marmara transmission system)

Bara No	Yük		Jeneratör		Jeneratör		
	Bara kod	P (MW)	Q (MVAR)	Pmin (MW)	Pmak(MW)	Qmin(MVAR)	Qmak(MVAR)
1	2	4	0,5	15	60	-50	44
2	2	30	1	25	92	50	44
3	2	0	0	20	71	-50	44
4	0	45	2	0	0	0	0
5	2	90	10	0	0	0	0
6	0	30	4	0	0	0	0
7	2	15	2	10	82	-4	4
8	0	40	1,5	0	0	0	0
9	0	30	0,2	0	0	0	0
10	1	30	0,1	12	100	-50	30
11	0	20	1,8	0	0	0	0

\*BARA KOD 1= salınım barası, 2= üretim barası, 0= tüketim barası

**Tablo 2.** 154 kV Enerji iletim hattına ait veriler (Data for 154 kV transmission system)

Bara başlangıç	Bara bitiş	R (pu)	X (pu)	R <sub>0</sub> (pu)	X <sub>0</sub> (pu)
1	5	0,026098	0,197224	0,167742	0,598999
2	5	0,052174	0,43783	0,31532	1,121644
5	4	0,052195	0,394479	0,335483	1,197998
5	7	0,052195	0,394479	0,335483	1,197998
5	6	0,052195	0,394479	0,335483	1,197998
3	4	0,0822	0,38577	0,2936	1,312
4	9	0,06946	0,403469	0,355375	1,2057
10	11	0,134216	0,421587	0,423006	1,225262
8	10	0,134216	0,421587	0,423006	1,225262
7	10	0,052174	0,437832	0,315322	1,121644

Burada  $\min p(m, n)$  amaç fonksiyonu,  $r(m, n)$  (eşitlik kısıtları),  $s(m, n)$  ise (eşitsizlik kısıtları)'dır. OYA probleminde kontrol değişkenleri  $m$ , durum değişkenleri  $n$  ile gösterilmiştir. Bu değişkenler Eş. 4 ve Eş. 5'de verilmiştir [3].

$$n_T = [P_{G2} \dots P_{GNG}, V_{G1} \dots V_{GNG}, T_1 \dots T_{NT}, Q_{C1} \dots Q_{CNC}] \quad (4)$$

- $P_G$ : Üretim baralardaki aktif güç üretimini gösterir.
- $V_G$ : Güç sistemindeki jeneratör baralarının voltaj büyüklüğünü gösterir.
- $Q_C$ : Güç sistemindeki şönt kapasitörleri temsil eder.
- $T$ : transformatörlere ait kademe dönüştürücüleri temsil eder.

Burada  $NG, NC, NT$  sırasıyla jeneratörlerin sayısı, VAR kompensatörlerinin sayısı ve ayarlı (kademe dönüştürücü) transformatör sayısını temsil eder.

$$m_T = [P_{Gx}, V_{L1} \dots V_{LN PQ}, Q_{G1} \dots Q_{QNG}, S_{L1} \dots S_{LNL}] \quad (5)$$

$NPQ$  yük baralarını,  $NL$  hat sayısını,  $NG$  jeneratör sayısını ve  $Gx$  durum değişken vektörlerinden oluşan salınım barasını belirtir.

### 3.1. Amaç Fonksiyonu (Objective Function)

Bu çalışmada minimize edilecek amaç fonksiyonu 2 adet alt başlık altında toplanmıştır.

#### 3.1.1. Aktif güç kayıplarının minimizasyonu (Minimization of active power losses)

Güç sistemlerinde aktif güç kayıpları Eş. 6'da görüldüğü gibidir [3].

$$fkayıp = P_{GG} - P_D \quad (6)$$

Eş. 6'da  $fkayıp$  güç sisteminde aktif güç kayıplarını temsil eder. Burada  $P_{GG}$ , toplam aktif güç üretimi iken  $P_D$ , güç sisteminin toplam talep ettiği aktif güçtür.

#### 3.1.2. Yakıt maliyetinin minimizasyonu (Minimization of fuel cost)

OYA probleminde en yaygın olarak kullanılan amaç fonksiyonlarından biri de yakıt maliyetinin azaltılmasıdır. Bu amaç fonksiyonunda her bir jeneratörün kendi maliyetleri, aktif güç üretiminin bir fonksiyonu olarak

sunulur. Bu fonksiyon, gerilim kontrollü baraların ürettiği aktif gücün her birinin maliyet katsayılarıyla çarpılması ile bulunmaktadır. OYA problemi için minimize edilecek saatlik yakıt maliyeti Eş. 7’de görüldüğü gibidir [23];

$$\min F_{tot} = \min \sum_{n=0}^N F_n(P_{Gi}) \$/h \quad (7)$$

$$F_n(P_{Gi}) = a_n + b_n P_{Gi} + c_n P_{Gi}^2 \quad (8)$$

Burada  $F_n(P_{Gi})$  yakıt maliyet fonksiyonudur.  $P_{Gi}$ ,  $i$ . baranın aktif güç üretimidir.  $a_n$ ,  $b_n$ ,  $c_n$  ise  $n$ . üretim biriminin maliyet katsayısıdır.

### 3.2. Kısıtlar (Constraints)

OYA probleminin eşitlik kısıtları aktif ve reaktif gücü dengeleyecek biçimde 2 adettir. Bu kısıtlar Eş. 9 ve Eş. 10’da görüldüğü gibi ifade edilir [3];

$$P_{Gi} - P_{Di} - Vi \sum_{j=1}^{Nb} [Vj \left( g_{h(i,j)} \cdot \cos(\theta_{(i,j)}) + b_{h(i,j)} \cdot \sin(\theta_{(i,j)}) \right)] = 0 \quad (9)$$

$$Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Di} - Vi \sum_{j=1}^{Nb} [Vj \left( g_{h(i,j)} \cdot \sin(\theta_{(i,j)}) - b_{h(i,j)} \cdot \cos(\theta_{(i,j)}) \right)] = 0 \quad (10)$$

Burada  $Vi$   $i$ . baranın voltaj değerini,  $Vj$   $j$ . baranın voltaj değeri,  $P_{Gi}$  ve  $Q_{Gi}$  sırasıyla  $i$ . baranın aktif güç ve reaktif güç üretimini,  $P_{Di}$  ve  $Q_{Di}$  ise  $i$ . baranın aktif güç ve reaktif güç arzını belirtir.  $g_{h(i,j)}$  kondüktans,  $b_{h(i,j)}$  süseptans,  $\theta_{(i,j)}$  iletim hattına karşılık gelen baraların (gerilim) faz farkını belirtir.

Güç sistemlerinde, optimum yük akışının sağlanabilmesi için bazı değişkenlerin güç sistemi sınırları arasında olması istenilir. Bu eşitsizlik kısıtları Eş. 11-Eş. 16’de görüldüğü gibidir.

$$\text{Aktif Güç } P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, NG \quad (11)$$

$$\text{Reaktif Güç } Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, NG \quad (12)$$

$$\text{Bara voltajı } V_i^{min} \leq |V_i| \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, Nb \quad (13)$$

$$\text{Kademe değiştirici } T_k^{min} \leq |T_k| \leq T_k^{max} \quad k = 1, 2, \dots, NT \quad (14)$$

$$\text{Hat kapasite } S_{Li} \leq S_{Li}^{max} \quad L_i = 1, 2, \dots, NL \quad (15)$$

$$\text{Reaktif tüketim } Q_{ci}^{min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, NC \quad (16)$$

Burada,  $NG$  jeneratör sayısı,  $Q_{ci}$  şönt kapasitör,  $V_i$   $i$ . bara gerilimi,  $S_{Li}$   $i$ . iletim hattının kapasitesini,  $S_{Li}^{max}$  iletim hattının maksimum kapasitesini,  $NT$  transformatör sayısı,  $NC$  şönt kapasitör sayısı.  $T_k$  kademe değiştirici sayısını belirtir.

## 4. İYİLEŞTİRİLMİŞ SU ÇEVİRİM ALGORİTMASI (MODIFIED WATER CYCLE ALGORITHM)

Su çevrim Algoritması, 2012 yılında Eskander tarafından sunulan doğa temelli bir optimizasyon algoritmasıdır [24]. Su, yağan kar ve yağmurun etkisi ile yüksek dağ yamaçlarından ovaya akarak vadi zemininde zamanla dere ve nehri oluşturur. Bu nehir ve dereler her zaman yokuş aşağı akış gösterir. Bu yolculuk göl, baraj ve deniz ile sonlanır. Bu döngüye bitkilerin fotosentezi, nehir ve denizlerdeki buharlaşmada eklenince basit su çevrim döngüsü oluşur. Bu döngüde suların çoğu toprağa sızarak yer altı kanallarına ulaşır. Sonuç olarak bu döngü dereden nehre, nehirden denize akacak şekilde devam eder [24].

Popülasyon, yağmur yağması ile yağışın başladığı bir kurgu üzerine kurulur. En iyi birey denize, diğer en iyi bireyler nehre, diğerleri ise dereye akacak şekilde kurgulanır. Burada yağmur damlaları Eş.17’deki  $[1xNdeg]$  dizi ile gösterilir.

$$\text{Yagmurdamları} = [x1, x2, \dots, xn] \quad (17)$$

Optimizasyonda her bir yağmur damlası çözümü gösterir (Eş. 18).  $Npop$ , yağmur damlalarının sayısını belirtir.

$$\begin{bmatrix} \text{yagmurdamlası1} \\ \text{yagmurdamlası2} \\ \vdots \\ \text{yagmurdamlasıNpop} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & \dots & x_{Ndeg}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{Npop} & \dots & x_{Ndeg}^{Npop} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Bir yağmur damlasının maliyeti Eş. 19 ile bulunur.

$$\text{Cost}_i = f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_{Ndeg}^i) \quad i = 1, 2, \dots, Npop \quad (19)$$

Eş. 18’de oluşturulan matriste, en iyi bireylerin bir kısmı denize ve nehre akacak şekilde seçilir. Bu seçilen bireylerin içinde en küçük değere sahip olan, deniz olarak seçilir. Geriye kalanlar ise denize ya da nehre akacak dereleri temsil eder. Bu durum Eş. 20 ve Eş. 21’de gösterildiği gibidir.

$$Ndn = \text{Nehirtoplamsayısı} + 1(\text{deniz}) \quad (20)$$

$$\text{Nyagmurdamları} = Npop - Ndn \quad (21)$$

Sonrasında yağmur akış yoğunluğu Eş. 22 ile bulunur. Burada  $Ndn$  belli nehir ya da denize akacak derelerin numarasını belirtir.

$$Ndn = \text{yuvarla} \left\{ \frac{\text{Cost}_n}{\sum_{i=1}^{Ndn} \text{cost}_i} x \right\} \quad n = 1, 2, \dots, Ndn \quad (22)$$

Eş. 23’de verilen rastgele uzaklığı kullanılarak, derelerin nehre doğru akış göstermesi sağlanır.

$$X \in (0, c \times d), \quad c > 1 \quad (23)$$

Eş. 23’de  $c$  değeri 1 ile 2 arası rassal bir değerdir. Dere ve nehir arasındaki mevcut mesafe  $d$  olarak gösterilir.  $c$ ’nin 1

değerinden büyük olması, akarsuların nehirlere doğru farklı yönlerde akmasını sağlar. Geleneksel SÇA'da  $c$  değeri 2 olarak alınmaktadır [24]. İSÇA algoritmasında ise  $c$  değeri (1 ve 2 değerleri arasında) iterasyon sayısına göre değişecek şekilde hesaplanmıştır [21]. İSÇA'da  $c$  değeri Eş. 24'e göre seçilip, yeni pozisyonlar Eş. 25 ve Eş. 26 ile bulunur.

$$c^i = 2 - \left(1 - \frac{1}{\text{maksiterasyon}}\right)^2 \quad (24)$$

$$x_{dere}^{i+1} = x_{dere}^i + \text{rand} \times c^i \times (x_{Nehir}^i - x_{dere}^i) \quad (25)$$

$$x_{Nehir}^{i+1} = x_{Nehir}^i + \text{rand} \times c^i \times (x_{Deniz}^i - x_{Nehir}^i) \quad (26)$$

Rand sayısı 0-1 arasında orantılı dağıtılmış rastgele bir sayıdır. Bir dere tarafından bulunan çözüm onun bağlı olduğu nehirde daha iyi ise nehir ve dere yer değişir. Aynı ilişki nehir ve deniz arasında da geçerlidir. Buharlaşma adımı ise algoritmayı erken yakınsamadan korur. Buharlaşan su tekrar yağışların oluşmasına neden olur. Bu yağışlar yeni derelerin, nehirlerin ve denizlerin oluşmasına olanak sağlar. Bu döngüye su çevrimi denilir. Aşağıdaki sözde kod nehrin denize akıp akmayacağını, nasıl tespit edileceğini göstermektedir. Böylece daha hassas problemler için optimum sonuçların bulunmasını sağlar.

Sözde kod-1:

```
if  $|x_{deniz}^i - x_{nehir}^i| < dmaks$   $i = 1, 2, \dots, Ndn - 1$ 
  Buharlaşma ve yağış işlemi
end
```

Ayrıca, İSÇA'da buharlaşma koşulu denize ait dereleri kontrol etmek içinde kullanılır.

Sözde kod-2 :

```
if  $|x_{deniz}^i - x_{dere}^i| < dmaks$   $i = 1, 2, \dots, Ndn - 1$ 
  Buharlaşma ve yağış işlemi
end
```

Burada  $dmaks$  sifıra yakın bir değerdir.  $dmaks$  (Nehir ve deniz arasında mesafe) çok küçüldüğünde nehrin denize yaklaştığını ve buharlaşma işleminin başlayıp, yağmurun tekrar yağacağını gösterir.  $dmaks$  küçüldükçe denize yakın arama sağlar. Bu değer optimum çözümü temsil eder.  $dmaks$ 'ın değerinin, iterasyon sayısına göre azalması Eş. 27'de görüldüğü gibidir. Sonrasında buharlaşma adımının tamamlanmasıyla, yeni dere için yeni konum Eş. 28'de gösterildiği hesaplanır.

$$d_{maks}^{i+1} = d_{maks}^i - d_{maks}^i / \text{maksyineleme} \quad (27)$$

$$x_{dere}^{yeni} = LB + \text{rand} \times (UB - LB) \quad (28)$$

$LB$  alt sınır iken  $UB$  üst sınırdır.

Eğer bu çalışmada olduğu gibi kısıtlı bir mühendislik problemine bu algoritma uygulanacak ise hesaplama hızı ve

yakınsama oranı artırılmalıdır [24]. Bu durum için Eş. 29 kullanılarak, doğrudan denize akan derelerin oluşmasının teşvik edilmesi ile sağlanır.

$$x_{dere}^{yeni} = x_{deniz} + \sqrt{\mu} \times \text{rand}(1, Ndeg) \quad (29)$$

$\mu$  denize yakın arama bölgesinin aralığıdır. Bu değer bu çalışmada 0,1 alınmıştır. Burada  $\mu$  standart sapmadır. İSÇA kullanılarak, OYA probleminin genel çözüm süreci Şekil 3'de gösterilen akış şemasında özetlenmiştir.

## 5. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR (SIMULATION RESULTS AND DISCUSSIONS)

SÇA ve İSÇA sırasıyla IEEE 30 baralı güç sistemine ve 11 baralık Güney Marmara Enerji iletim sistemi sanal modeline uygulanmıştır. SÇA ve İSÇA'ya ait kodlar Matlab-R2013a ortamında, AMD A4-500 işlemcili 1,5 GHZ, 4 GB Ram'e sahip bir PC'de yazılmıştır.

### 5.1. IEEE 30 baralı güç sistemi Simülasyonu (Simulation of IEEE 30 bus power system)

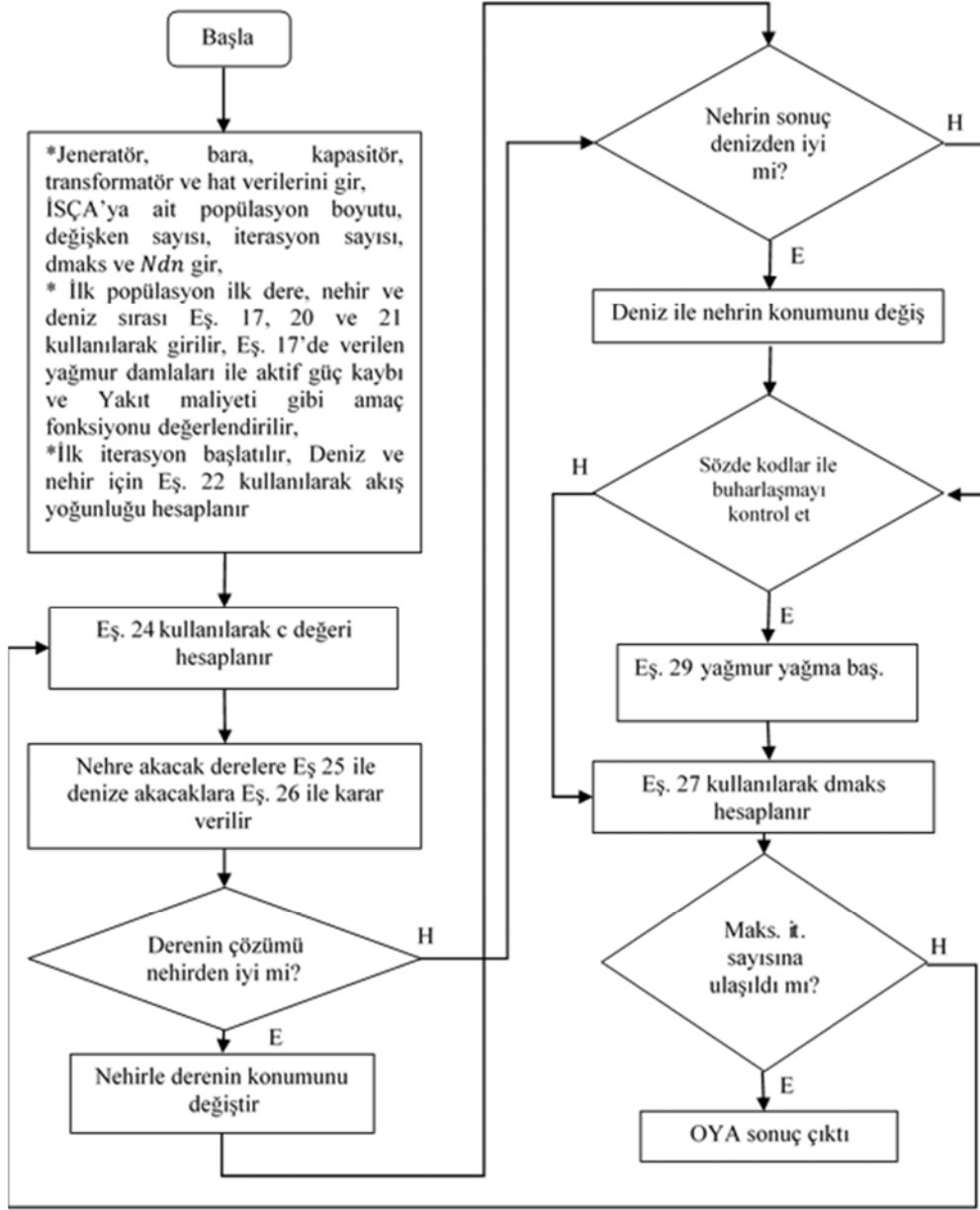
IEEE 30 baralı güç sistemi 41 iletim hattından oluşmaktadır. Bu güç sisteminin toplam talep ettiği güç 283,4 MW'dır. Güç sisteminde toplam 6 adet jeneratör ile bu güç talebi karşılanmaktadır. Bu jeneratörlerden 1.ncisi salınım barası olarak seçilmiştir [22]. İlgili güç sisteminde şönt dengeleme cihazları 10, 12, 15, 17, 20, 21, 23, 24 ve 29 nolu baralara reaktif güç kontrolü için eklenmiştir [25]. Çalışmada SÇA ve İSÇA güç sistemine uygulanarak, aktif güç kayıpları ve yakıt maliyetinin minimizasyonu sağlanmıştır. Algoritmada optimum kontrol parametreleri simülasyon sonucuna göre belirlenir. Popülasyon boyutu=50,  $Ndn=4$  (nehir + deniz sayısı), iterasyon sayısı=400 olarak seçilmiştir.

#### 5.1.1. Durum 1: Aktif güç kayıplarının minimizasyonu (Case 1: Minimization of active power losses)

IEEE 30 baralı güç sisteminde aktif güç kayıplarının minimize edilmesinde Eş. 6 kullanılarak İSÇA ve SÇA ile bulunan sonuçlar Tablo 3'de görüldüğü gibidir. İSÇA ile aktif güç kayıpları 3,0856 MW iken SÇA ile 3,313 MW olarak bulunmuştur. Aynı koşulları kullanarak (kontrol değişkenlerinin limitleri, başlangıç koşulları ve sistem verileri) literatürde diğer güncel yöntemlere ait sonuçların İSÇA ile karşılaştırılması, Tablo 4'de verilmiştir. Tablo 4'de İSÇA'nın ABCTA, GSA, İYAK ve KAA yöntemlerine göre aktif güç kayıplarının minimize edilmesinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. SKA ve GKUDG yöntemlerine ise yakın sonuçlar üretmiştir. Durum 1 için İSÇA ve SÇA yöntemlerinin yakınsama eğrileri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'de görülmektedir. Bu şekillerde İSÇA'nın SÇA'ya göre daha iyi yakınsadığı görülmektedir.

#### 5.1.2. Durum 2: Yakıt maliyetinin minimizasyonu (Case 2: Minimization of fuel cost)

Durum 2'de, Eş. 8 kullanılarak IEEE 30 baralı güç sisteminde yakıt maliyetinin minimizasyonu hedeflenmiştir.



Şekil 3. İSÇA ile OYA probleminin çözüm süreci (Solution process of OPF using MWCA)

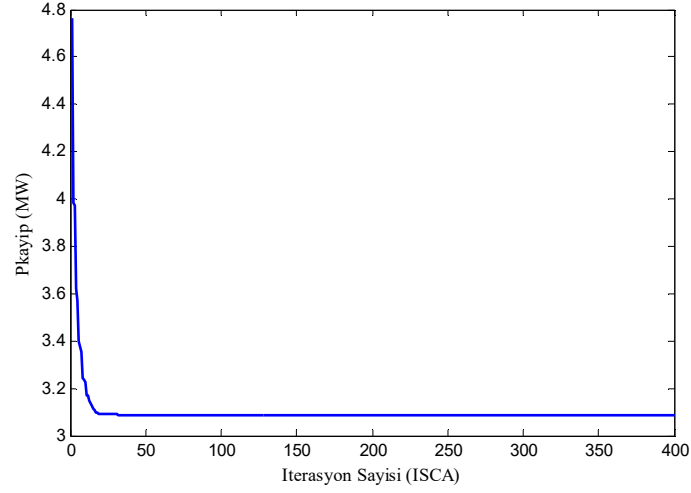
Durum 2'de İSÇA ve SÇA ile bulunan sonuçlar Tablo 3'de görüldüğü gibidir. İSÇA ile bulunan sonuç SÇA ve literatürdeki (İSÇA'daki aynı koşullar kullanılarak hesaplanan) diğer güncel yöntemlerle karşılaştırılmıştır. İSÇA ile hesaplanan yakıt maliyeti (798,9021 \$/h) sonucu Tablo 4'de verilen tüm yöntemlerden daha başarılı olduğu görülebilir. Şekil 6'da İSÇA'nın, Şekil 7'de SÇA'ya göre daha iyi yakınsadığı görülmektedir.

### 5.2. 154 kV Marmara İletim Sistemi Kesiti için aktif güç kayıplarının minimizasyonu (Minimization of active power losses for 154 kV Marmara Transmission System Section)

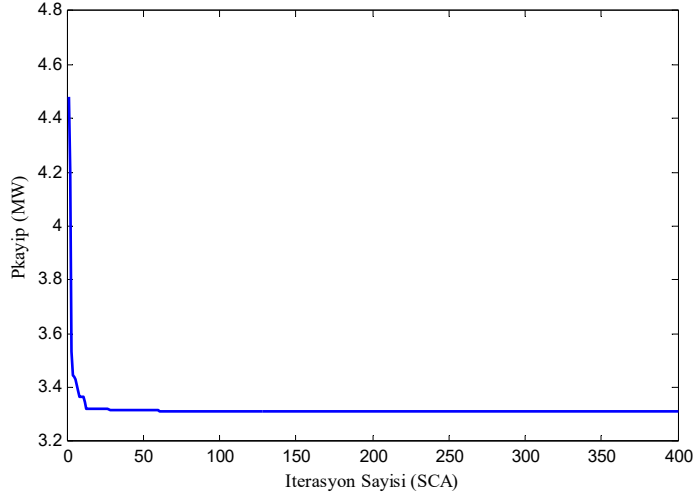
Sezgisel algoritmaların gerçek güç sistemlerinde etkinliğini görmek önemlidir [36]. Bu çalışmada İSÇA algoritmasının etkinliği 154 kV Marmara İletim Sisteminin bir kesitinin

sanal modeline uygulanarak test edilmiştir. Bu iletim sistemde 10 numaralı bara salınım barası iken 1, 2, 3 ve 7 numaralı baralar üretim barasıdır. Geriye kalan baralar ise tüketim (4, 5, 6, 8 ve 9) barasıdır. Üretim baralarında dâhil tüm baralarda gerilimler 0,95-1,1 pu arasında sınırlandırılmıştır. Bu güç sisteminde talep edilen toplam aktif güç 334 MW'dır. Burada İSÇA ile aktif güç kayıplarının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Burada genellikle gerçek güç sistemlerinde kullanılan Newton Raphson methodu ile İSÇA algoritması karşılaştırılmıştır. Çalışmada Newton Raphson metodu ve İSÇA ile bulunan sonuçlar Tablo 5'de verildiği gibidir. Gerçek zamanlı çalışan güç sisteminde aktif güç kayıpları 19,188 MW iken bu değer İSÇA'da 8,159 MW'a düşürülmüştür. İSÇA ile toplamda saatlik bazda 11,721 MW bir aktif güçten tasarruf sağlanmıştır. Bu yönü ile İSÇA, daha avantajlıdır.

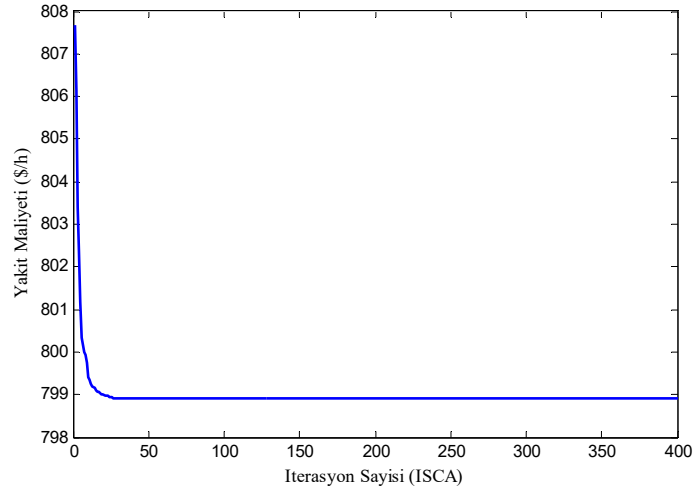




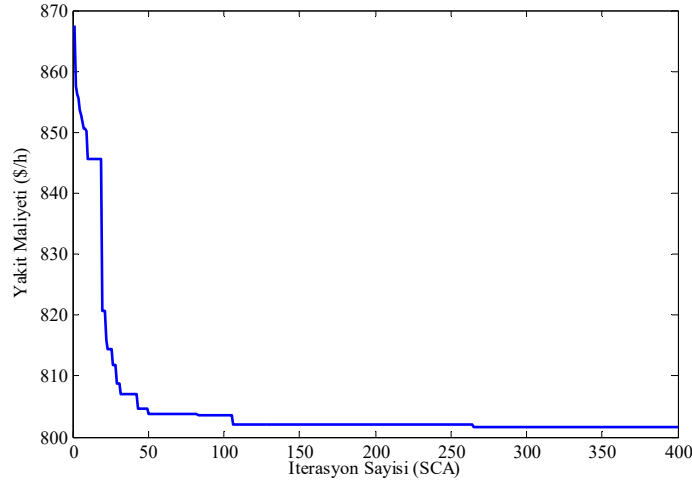
**Şekil 4.** IEEE 30 bara güç sistemi Durum 1 için İSÇA'nın yakınsama eğrisi  
(Convergence curves of MWCA for IEEE 30 Bus power system for case 1)



**Şekil 5.** IEEE 30 bara güç sistemi Durum 1 için SÇA'nın yakınsama eğrisi  
(Convergence curves of WCA for IEEE 30 Bus power system for case 1)



**Şekil 6.** IEEE 30 bara güç sistemi Durum 2 için İSÇA'nın yakınsama eğrisi  
(Convergence curves of MWCA for IEEE 30 Bus power system for case 2)



**Şekil 7.** IEEE 30 bara güç sistemi Durum 2 için İSÇA'nın yakınsama eğrisi  
(Convergence curves of WCA for IEEE 30 Bus power system for case 2)

**Tablo 3.** Durum 1 ve Durum 2 ile bulunan optimum kontrol değerleri (Optimal control values found with Case 1 and Case 2)

Kontrol Değişkenleri	Min	Maks	İSÇA Durum1	ŞÇA Durum1	İSÇA Durum2	ŞÇA Durum2
$P_{G1}$ (MW)	50	200	51,485	51,713	177,0594	179,341
$P_{G2}$ (MW)	20	80	80	80	48,575	47,002
$P_{G5}$ (MW)	15	50	49,99	49,98	21,275	21,594
$P_{G8}$ (MW)	10	35	34,99	35	21,0682	20,461
$P_{G11}$ (MW)	10	30	29,99	29,98	12,001	12,427
$P_{G13}$ (MW)	12	40	39,99	40	12	12
$V_1$ (PU)	0,95	1,1	1,0617	1,0516	1,1	1,1
$V_2$ (PU)	0,95	1,1	1,055	1,0455	1,0805	1,033
$V_5$ (PU)	0,95	1,1	1,0391	1,0192	1,0534	1,04
$V_8$ (PU)	0,95	1,1	1,0431	1,043	1,0628	1,01
$V_{11}$ (PU)	0,95	1,1	1,07	1,073	1,1	1,082
$V_{13}$ (PU)	0,95	1,1	1,057	1,002	1,031	1,071
$T_{11}$ (PU)	0,9	1,1	1,0877	1,0876	1,0231	0,978
$T_{12}$ (PU)	0,9	1,1	0,9031	0,9331	0,9202	0,969
$T_{15}$ (PU)	0,9	1,1	0,9968	0,9948	0,9664	0,932
$T_{36}$ (PU)	0,9	1,1	0,9714	1,02	0,9843	0,968
$Q_{C10}$ (MVAR)	0	5	4,99	4,399	4,9941	3,83
$Q_{C12}$ (MVAR)	0	5	1,767	4,767	4,9618	3,9
$Q_{C15}$ (MVAR)	0	5	4,229	4,228	4,9574	4,865
$Q_{C17}$ (MVAR)	0	5	5	5	4,9987	3,758
$Q_{C20}$ (MVAR)	0	5	3,957	4,357	4,3264	4,4
$Q_{C21}$ (MVAR)	0	5	5	5	4,9985	4,48
$Q_{C23}$ (MVAR)	0	5	3,013	3,313	2,6724	3,9
$Q_{C24}$ (MVAR)	0	5	5	5	4,9968	4,15
$Q_{C29}$ (MVAR)	0	5	2,327	3,326	2,3781	4,3
$P_{top,yakit}$ (\$/h)			-	-	798,9021	801,667
$P_{kayıp}$ (MW)			3,0856	3,313		

Tablo 5'deki Newton Raphson ve İSÇA ile yapılan yük akış sonuçlarına ait bara gerilimleri (0,95-1,1 pu arası) incelendiğinde ise tüm değerlerin güç sisteminde istenilen bara gerilim sınırlarında çalıştığı görülmektedir. Bu açıdan yük akışı ile güç sisteminin voltaj kararlılığı sağlanmıştır.

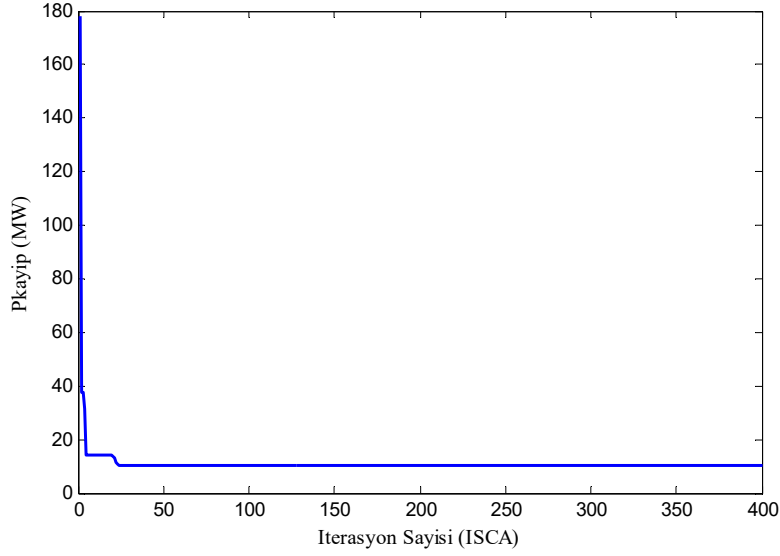
İSÇA'nın yakınsama eğrisi Şekil 8'de verilmiştir. Böylece bu çalışmada reel bir güç sistemi olan ve ülkemizde enerji yoğunluğunun en fazla olduğu bölgelerden biri olan Güney Marmara iletim sistemi modellenerek, bu sistemde İSÇA ile OYA problemine başarılı bir çözüm önerisi sunulmuştur.

**Tablo 4.** Amaç fonksiyonunun farklı algoritmalar ile karşılaştırılması (Comparison of object functions for different algorithms)

Metot	$P_{\text{top.yakit}} (\$/h)$	$P_{\text{kayıp}} (\text{MW})$	Metot Adı	Referans
İSÇA	798,9021	3,0855	İyileştirilmiş Su Çevrim Algoritması.	
SÇA	801,667	3,313	Su Çevrim Algoritması	
MÇTA	799,1592	-	Modifiye Çiçek Tozlaşma Algoritması.	[26]
GKUDG	799,3881	3,0192	Geliştirilmiş Kendinden Uyarlamalı Difereansiyel Gelişim Algoritması	[27]
BHA	799,914	-	Bulanık Harmoni Arama Algoritması	[28]
SKA	800,102	2,9424	Sinüs-Kosinüs Algoritması	[29]
ABCTA	800,5159	3,1009	A. Biocoğrafik Temelli Algoritma	[30]
GSA	800,509	3,1005	Güve Sürüsü Algoritması	[18]
AGAA	801,75	-	Adaptif Grup Arama Algoritması	[31]
İYAK	799,321	3,0856	İyileştirilmiş Yapay Arı Koloni Algoritması.[32]	
ABA	799,06	-	Ateş Böceği Algoritması	[33]
BOA	798,9225		Balina Optimizasyon Algoritması	[34]
KAAs	799,1436	5,639	Karınca Aslan Algoritması	[35]

**Tablo 5.** Newton Raphson ve İSÇA ile bulunan yük akış değerleri (Load flow values computed by Newton Raphson and MWCA)

Kontrol Değişkenleri	Min	Maks	İSÇA	Newton Raphson
$P_{G1}(\text{MW})$	15	60	20	20
$P_{G2}(\text{MW})$	25	92	91,99	92
$P_{G3}(\text{MW})$	20	71	70,99	71
$P_{G7}(\text{MW})$	10	82	59,189	70,88
$P_{G10}(\text{MW})$	12	100	99,99	100
$V_1(\text{PU})$	0,95	1,1	1,06	1,05
$V_2(\text{PU})$	0,95	1,1	1,025	1,043
$V_3(\text{PU})$	0,95	1,1	1,025	1,042
$V_4(\text{PU})$	0,95	1,1	1,024	1,0417
$V_5(\text{PU})$	0,95	1,1	1,027	1,042
$V_6(\text{PU})$	0,95	1,1	1,005	1,02
$V_7(\text{PU})$	0,95	1,1	1,01	1,049
$V_8(\text{PU})$	0,95	1,1	1,089	1,049
$V_9(\text{PU})$	0,95	1,1	1,015	1,0326
$V_{10}(\text{PU})$	0,95	1,1	1,09	1,05
$V_{11}(\text{PU})$	0,95	1,1	1,1	1,1
$P_{\text{Üretim}}(\text{MW})$			342,159	353,88
$P_{\text{Talep}}(\text{MW})$			334	334
$P_{\text{Kayıp}}(\text{MW})$			8,159	19,88



Şekil 8. İSÇA'nın yakınsama eğrisi (Convergence curve for MWCA)

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu yayında, çeşitli kısıtlamalar altında farklı OYA problemleri için İSÇA yöntemi başarıyla uygulanmıştır. Bu çalışmada 2 adet amaç fonksiyonunun minimize edilmesi hedeflenmiştir. İSÇA yönteminin OYA problemünde etkinliğini göstermek için standart IEEE 30 bara güç sistemi ve 11 baralılık Türkiye Güney Marmara Enerji iletim sistemi ele alınmıştır. Çalışmada IEEE 30 bara güç sisteminde İSÇA yönteminden elde edilen sonuçlar, daha önce literatürde bildirilen diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Bu yayında İSÇA ile yakıt maliyeti 798,9021 \$/h bulunmuştur. Bu değer Tablo 4'de bildirilen literatürdeki diğer yöntemlerden daha iyidir. 11 baralılık Türkiye Güney Marmara Enerji iletim sistemi kesitinde aktif güç kayıplarının minimize edilmesinde yöntemin etkinliğini göstermek ve gerçek zamanlı güç sistemi ile kıyaslama yapabilmek için Newton Raphson metoduna göre yük akışı yapılmıştır. Newton Raphson metodu ile 11 baralılık güç sisteminde aktif güç kayıpları 19,88 MW, İSÇA ile ise 8,159 MW hesaplanmıştır. Böylece bu güç sisteminde de daha optimum sonuçların bulunduğu gösterilmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ozturk A., Duman S., Determination of the conditions of optimal operation in power systems using genetic algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24 (3), 539-548 2009.
- Dommel H.W., Tinney W.F., Optimal power flow solutions, *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, 10, 1866–1876, 1968.
- Akdağ O., Okumuş F., Kocamaz A.F., Yeroğlu C., Fractional Order Darwinian PSO with Constraint Threshold for Load Flow Optimization of Energy Transmission System, *Gazi University Journal of Science*, 31 (3), 831-844, 2018.
- Kirchmayer L.K., Stagg G.W., Analysis of total and incremental losses in transmission systems, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 70 (2), 1197-1205, 1951.
- Squires R.B., Economic Dispatch of Generation Directly From Power System Voltages and Admittances, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 79 (3), 1235-1244, 1960.
- Calvert J.F., Sze T.W., A new approach to loss minimization in electric power systems, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III: Power Apparatus and Systems*, 76 (3), 1439-1446, 1957.
- Mota-Palomino R., Quintana, V.H., Sparse reactive power scheduling by a penalty function-linear programming technique, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1 (3), 31-39, 1986.
- Wei H., Sasaki H., Kubokawa J., Yokoyama R., An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure, *IEEE Transactions on Power Systems*, 13 (3), 870-877, 1998.
- Burchett R.C., Happ H.H., Vierath D.R., Quadratically convergent optimal power flow, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (11), 3267-3275, 1984.
- Adams R.N., Laughton M.A., Optimal planning of power networks using mixed-integer programming, Part 1: Static and time-phased network synthesis, *In Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121 (2), 39-147, 2007.
- Abido M.A., Optimal power flow using particle swarm optimization, *Electrical Power and Energy Systems*, 24, 563–571, 2002.
- Abido M.A., Optimal power flow using tabu search algorithm, *Electric Power Components and Systems*, 2002.
- Kahourzade S., Mahmoudi A., Mokhlis H.B., A comparative study of multi-objective optimal power

- flow based on particle swarm, evolutionary programming and genetic algorithm, *Electrical Engineering*, 97 (1), 1-12, 2015.
14. Awasthi A., Venkitesamy K., Padmanaban S., Selvamuthukumar R., Blaabjerg F., Singh A.K., Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm, *Energy*, 133, 70-78, 2017.
  15. Naveen S., Kumar K.S., Rajalakshmi K., Distribution system reconfiguration for loss minimization using modified bacterial foraging optimization algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 69, 90-97, 2015.
  16. Ayan K., Kılıç U., Baraklı B., Chaotic artificial bee colony algorithm based solution of security and transient stability constrained optimal power flow, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 136-147, 2015.
  17. Boucekara H.R., Chaib A.E., Abido M.A., El-Sehiemy R.A., Optimal power flow using an Improved Colliding Bodies Optimization algorithm, *Applied Soft Computing*, 42, 119-131, 2016.
  18. Mohamed A.A.A., Mohamed Y.S., El-Gaafary A.A., Hemeida, A.M., Optimal power flow using moth swarm algorithm, *Electric Power Systems Research*, 142, 190-206, 2017.
  19. Ben oualid Medani K., Sayah S., Bekrar, A., Whale optimization algorithm based optimal reactive power dispatch: A case study of the Algerian power system, *Electric Power Systems Research*, 163, 696-705, 2018.
  20. Khunkitti S., Siritaratiwat A., Premrudeepreechacharn S., Chatthaworn R., Watson N., A hybrid DA-PSO optimization algorithm for multiobjective optimal power flow problems, *Energies*, 11 (9), 2270, 2017.
  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. IEEE 30 baralı güç sistemi. Güç sistemi verileri. <https://tr.scribd.com/doc/282453109/IEEE-30-Bus-System-Data>. Yayın tarihi Temmuz 4, 20107. Erişim tarihi Kasım 11, 2019.
  23. El-Fergany A.A., Hasanien H.M., Tree-seed algorithm for solving optimal power flow problem in large-scale power systems incorporating validations and comparisons, *Applied Soft Computing*, 64, 307-316, 2018.
  24. Eskandar H., Sadollah A., Bahreininejad A., Hamdi M., Water cycle algorithm—A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems, *Computers & Structures*, 110, 151-166, 2012.
  25. Singh R.P., Mukherjee V., Ghoshal S.P., Particle swarm optimization with an aging leader and challengers algorithm for the solution of optimal power flow problem, *Applied Soft Computing*, 40, 161-177, 2016.
  26. Cuevas E., Espejo E.B., Enriquez A.C., Bio-inspired Optimization Algorithms for Solving the Optimal Power Flow Problem in Power Systems, In *Metaheuristics Algorithms in Power Systems*, 111-136, 2019.
  27. Pulluri H., Naresh R., Sharma V., An enhanced self-adaptive differential evolution based solution methodology for multiobjective optimal power flow, *Applied Soft Computing*, 54, 229-245, 2017.
  28. Pandiarajan K., Babulal C. K., Fuzzy harmony search algorithm based optimal power flow for power system security enhancement, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 72-79, 2016.
  29. Attia A.F., El Sehiemy R.A., Hasanien H.M., Optimal power flow solution in power systems using a novel Sine-Cosine algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 331-343, 2018.
  30. Kumar A.R., Premalatha L., Optimal power flow for a deregulated power system using adaptive real coded biogeography-based optimization, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 393-399, 2015.
  31. Daryani N., Hagh M.T., Teimourzadeh S., Adaptive group search optimization algorithm for multi-objective optimal power flow problem, *Applied Soft Computing*, 38, 1012-1024, 2016.
  32. Bai W., Ek, I., Lee K.Y., An improved artificial bee colony optimization algorithm based on orthogonal learning for optimal power flow problem, *Control Engineering Practice*, 61, 163-172, 2017.
  33. Reddy S.S., Rathnam C.S., Optimal power flow using glowworm swarm optimization, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 80, 128-139, 2016.
  34. Mahdad, B, Improvement optimal power flow solution under loading margin stability using new partitioning whale algorithm. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 14(1), 64-77, 2019.
  35. Tefek M.F., Uguz H., Solution of economic dispatch problem for wind-thermal power systems by a modified hybrid optimization method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 1871-1895, 2019.

