



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## FACTS Cihazlarını İçeren Reaktif Güç Planlama Probleminin Hibrit PSOGSA Algoritması Kullanarak Çözülmesi

Serhat DUMAN <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> *Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE*

\* *Sorumlu yazarın e-posta adresi: serhatduman@duzce.edu.tr*

### ÖZET

Optimal reaktif güç planlama problemi modern güç sistemlerinin en önemli problemlerinden biridir. Modern güç sistemlerinde reaktif güç planlamanın ana amacı, gerilim profilini iyileştirmek ve iletim hattının aktif güç kayıplarını azaltmaktır. Bu çalışmada, hibrit PSOĞSA algoritması kullanılarak FACTS cihazlarını içeren reaktif güç planlama probleminin çözülmesi amaçlanmıştır. Amaçlanan algoritma, tristör kontrollü seri kapasitör ve tristör kontrollü faz kaydırıcı FACTS cihazlı IEEE 30 bara test sistemine uygulanmıştır. Amaçlanan hibrit PSOĞSA yaklaşımından elde edilen sonuçlar girdap algoritması (VS), ateş böceği algoritması (FA) ve yerçekimsel arama algoritmasından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları amaçlanan yaklaşımın kullanılan diğer algoritmalara üstünlüğünü göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** *Optimal reaktif güç planlama, Güç Sistemleri, Hibrit PSOĞSA, Optimizasyon*

## Solution of Reactive Power Planning Problem Including FACTS Devices by using PSOĞSA Algorithm

### ABSTRACT

Optimal reactive power planning problem is one of the most important problems of the modern power systems. The main goal of the reactive power planning in modern power systems is to improve voltage profile and to reduce active power loss of the transmissions line. In this study, solution of the reactive power planning problem including FACTS devices is proposed by using hybrid PSOĞSA algorithm. The proposed algorithm was applied to IEEE 30 bus test system with FACTS devices, such as thyristor control series compensator and thyristor control phase shifter. The obtained results from the proposed PSOĞSA approach are compared to the obtained results from the vortex algorithm (VS), firefly algorithm (FA) and gravitational search algorithm (GSA). The comparison results demonstrate the superiority of the proposed approach to the other algorithms.

**Keywords:** *Optimal reactive power planning, power systems, Hybrid PSOĞSA, Optimization*

## I. GİRİŞ

Günümüzde, dünya nüfusunun artması, toplum ihtiyaçlarının değişmesi, buna nazaran gelişen teknoloji, artan sanayileşme ile birlikte enerjinin kullanımı ve kullanıma bağlı olarak enerjiye duyulan gereksinim giderek artmaktadır. Artan enerji talebine karşın, var olan ve yeni kurulan elektrik üretim tesislerinde, enerjinin üretimi minimum maliyette, minimum kayıpta, maksimum verimlilikte kullanıcıya iletilmesi enerjinin üretiminde ve iletiminde bir gereksinim haline dönüşmüştür. Bu gereksinim, modern güç sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Modern güç sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde en önemli planlama problemlerinden biri kayıpların minimize edilmesidir. Bu problem, güç sistemlerindeki generatör ve yük baralarının gerilim değerlerinin, transformatörlerin değiştirme oranlarının, sistemdeki kapasitör değerleri gibi güç sistemi dinamiklerinin yanı sıra aktif ve reaktif güç dengesi eşitliklerinin, iletim hattı yüklenme limitlerinin de dahil edilmeye çalışıldığı optimal reaktif güç dağıtımı (ORPD) olarak tanımlanmaktadır [1-8].

Problem ilk olarak araştırmacılar tarafından matematiksel yaklaşımlar [9-11] ile çözülmüş olup, problemin çözümünde bu yaklaşımların yerel minimuma takılma durumu bir dezavantaj olarak ortaya çıkmıştır. İlerleyen zamanlarda, doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin çözümünde bu dezavantajı ortadan kaldırmak için, sürü veya popülasyon tabanlı optimizasyon algoritmaları kullanılmaya başlanmıştır [12-14]. Naderi ve ark. bulanık mantığı parçacık sürü optimizasyonu ile birleştirerek algoritmanın performansını arttırmaya çalışmışlardır. Çalışmalarında, güç sistemlerinin önemli problemlerinden biri olan optimal reaktif güç dağıtımını ele almışlar, problemin çözümünde ise sistemin gerilim profilini iyileştirmek için gerilim salınımı ve aktif güç kaybı denklemlerini amaç fonksiyonu olarak kullanmışlardır. Önerdikleri algoritmayı IEEE 30 bara, IEEE 118 bara ve IEEE 354 baralı sistemlerinde test etmişler, benzetim çalışmalarından buldukları sonuçları literatürdeki diğer algoritmalarından bulunan sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Önerdikleri algoritmanın sistem performansını iyileştirmede etkili olduğunu belirtmişlerdir [15]. Ghasemi ve ark. imperyalist rekabetçi optimizasyon algoritmasının yerel minimuma yakınsama durumunu ortadan kaldırmak için invazyif ot optimizasyonu ile birleştirilmiş hibrit bir algoritma önermişlerdir. Önerdikleri hibrit algoritmayı, optimal reaktif güç dağıtım probleminde aktif güç kaybını minimize etmek için kullanmışlardır. Hibrit algoritmanın performansı IEEE 30 bara, 57 bara ve 118 bara test sistemlerinde denenmiş olup, elde edilen benzetim sonuçları literatürdeki diğer sonuçlarla karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlara sahip olduğu, global noktaya diğer algoritmalarından daha hızlı yakınsadığını ve global noktayı arama yeteneğinin geliştiği ifade edilmiştir [16]. Subbaraj ve Rajnarayan önerdikleri kendinden uyarlanabilir gerçek kodlu genetik algoritmayı, bu problemin çözümü için farklı test sistemlerinde algoritmanın performansını test etmişlerdir. Önerdikleri algoritmadan elde edilen benzetim sonuçlarına göre, önerilen yaklaşımın sonuçları literatürdeki diğer sezgisel algoritmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında global noktayı bulmada daha etkin olduğu yazarlar tarafından belirtilmiştir [17]. Ayrıca, bu problemin çözümünde farksal evrim algoritması (DE) [18], öğretim-öğrenmeye dayalı optimizasyon algoritması (TLBO) [19], benzer-karşıtlık diferansiyel fark algoritması (QODE) [20], uyarlanabilir genetik algoritma (AGA) [21] gibi literatüre sunulmuş optimizasyon algoritmaları da kullanılmıştır.

Güç sistemlerinin performansını iyileştirmek için kullanılan FACTS cihazları araştırmacılar tarafından probleme dahil edilerek, problem daha karmaşık bir yapıya dönüştürülmüştür. Roy ve ark. tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC) ve tristör kontrollü faz kaydırıcı (TCPS) cihazlarının katıldığı ORPD problemini biyocoğrafya tabanlı optimizasyon algoritması ile çözmüşlerdir [22]. Başka bir çalışmada

araştırmacılar, TCSC ve statik VAR kompanzatör (SVC) probleme dahil edilmiş [23], Prasad ve Mukherjee TCSC ve TCPS'li ORPD problemini simbiyotik organizmalar arama algoritması kullanarak çözmüşlerdir [24]. Dutta ve ark. [25] bir çalışmasında FACTS cihazlarından STATCOM'u ORPD problemine dahil ederek, problemin çözümünde kimyasal reaksiyon optimizasyonunu (CRO) kullanmışlar, diğer bir çalışmasında ise [26] SVC ve TCSC'li ORPD problemini benzer-karşıtlık kimyasal reaksiyon algoritmasını kullanarak çözmeyi amaçlamışlardır.

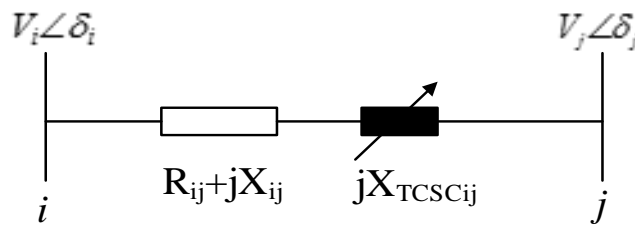
Bu çalışmada, 2010 yılında [27] Mirjalili ve Hashim tarafından literatüre sunulmuş popülasyon tabanlı hibrit PSO-GSA algoritmasının modern güç sistemlerinin optimizasyon problemlerinden biri olan ORPD problemine uygulanması sunulmuştur. Ayrıca, güç sistemlerinin performansını iyileştirmek için kullanılan TCSC ve TCPS'de probleme kontrol değişkeni olarak dahil edilmiş ve farklı benzetim çalışmaları koşullarında amaç fonksiyonlarının en uygun değerleri önerilen yaklaşımla elde edilmiştir. Benzetim sonuçları, girdap algoritması (VS) [28], ateş böceği algoritması (FA) [29] ve yerçekimsel arama algoritmasından (GSA) [30] elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bu makale, ikinci bölümde TCSC, TCPS cihazlarının modellenmesi ve ORPD probleminin tanımlanması, üçüncü bölüm PSO-GSA algoritması, dördüncü bölümde benzetim sonuçları, beşinci bölümde ise sonuçlar olacak şekilde düzenlenmiştir.

## II. PROBLEMİN TANIMLANMASI VE FACTS CİHAZLARININ MODELLENMESİ

### A. TCSC MATEMATİKSEL MODEL

Modern güç sistemlerinde iletim hattı boyunca güç akışını kontrol eden, ayarlanabilir reaktans Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) olarak adlandırılmaktadır. Güç sisteminde  $i$ . ve  $j$ . baralar arasında TCSC'nin yerleşimi Şekil 1'de gösterilmektedir [22,24].



TCSC'nin  $i$ . ve  $j$ . baralar arasındaki aktif ve reaktif güç akışı denklemleri Eş.1 ve Eş.2'de verilmiştir [22,24].

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - V_i V_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (1)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 B_{ij} - V_i V_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + V_i V_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (2)$$

Aynı şekilde, TCSC'nin  $j$ . ve  $i$ . baralar arasındaki aktif ve reaktif güç akışı denklemleri Eş.3 ve Eş.4'te verilmiştir [22,24].

$$P_{ji} = V_j^2 G_{ij} - V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + V_i V_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 B_{ij} + V_i V_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + V_i V_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (4)$$

TCSC'nin  $i$ . ve  $j$ . baralar arasına yerleşiminden sonra, bu baralar arasındaki kondüktans ve süseptans ifadesi Eş.5'de gösterilmektedir [22,24,26].

$$G_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{yeni}^2}, \quad B_{ij} = -\frac{X_{yeni}}{R_{ij}^2 + X_{yeni}^2} \quad (5)$$

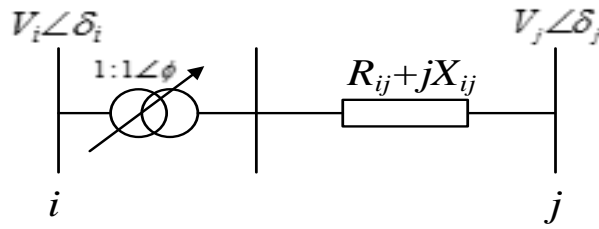
TCSC'nin değişken empedansı,  $i$ . ve  $j$ . baralar arasındaki reaktans Eş.6'da matematiksel olarak açıklanmıştır.

$$X_{yeni} = X_{ij} + X_{TCSC}, \quad X_{TCSC} = TCSC \times X_{ij} \quad (6)$$

Problemin çözümünde aşırı kompanzasyondan kaçınmak için, TCSC'nin çalışma aralığı  $0.7X_{ij}$  (kapasitif) ve  $0.2X_{ij}$  (endüktif) seçilmiştir.  $\delta_i$ ,  $\delta_j$ :  $i$ . ve  $j$ . baraların açılarını,  $V_i$ ,  $V_j$ :  $i$ . ve  $j$ . baraların gerilimlerini,  $P_{ij}$ ,  $Q_{ij}$ :  $i$ . ve  $j$ . baralar arasındaki aktif ve reaktif güç akışlarını,  $R_{ij}$ ,  $X_{ij}$ :  $i$ . ve  $j$ . baralar arasındaki iletim hattının direncini ve reaktansını,  $X_{yeni}$ :  $i$ . ve  $j$ . baralar arasına yerleştirilen TCSC'li iletim hattının reaktansını ifade eder.

## B. TCPS MATEMATİKSEL MODEL

Güç sistemlerinde Tristör Kontrollü Faz Kaydırıcı (TCPS), faz kaydırıcı transformatör olarak Şekil 2'deki gibi modellenir [22,24].



Şekil 2. TCPS devre modeli

TCPS'nin  $i$ . ve  $j$ . baralar arasındaki aktif ve reaktif güç akışı denklemleri Eş.7 ve Eş.8'deki gibi ifade edilir [22,24].

$$P_{ij} = \frac{V_i^2 G_{ij}}{\cos^2 \phi} - \frac{V_i V_j}{\cos \phi} (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j + \phi) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j + \phi)) \quad (7)$$

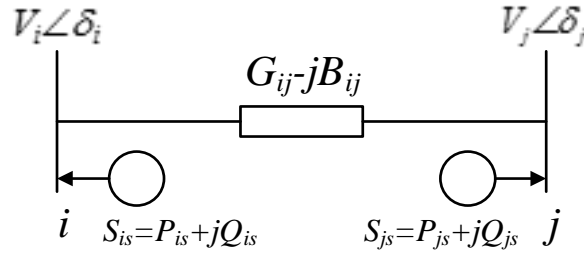
$$Q_{ij} = -\frac{V_i^2 B_{ij}}{\cos^2 \phi} - \frac{V_i V_j}{\cos \phi} (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j + \phi) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j + \phi)) \quad (8)$$

Aynı şekilde, TCPS'nin  $j$ . ve  $i$ . baralar arasındaki aktif ve reaktif güç akışı eşitlikleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir [22,24].

$$P_{ji} = V_j^2 G_{ij} - \frac{V_i V_j}{\cos \phi} (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j + \phi) - B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j + \phi)) \quad (9)$$

$$Q_{ji} = -V_j B_{ij} + \frac{V_i V_j}{\cos \phi} (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j + \phi) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j + \phi)) \quad (10)$$

Şekil 3'te TCPS'den sisteme verilen güç gösterilmekte olup, bu güce ait aktif ve reaktif güç eşitlikleri ise Eş.11 ve Eş.14 arasında gösterilmektedir.



Şekil 3. TCPS tarafından sisteme verilen güç

$$P_{is} = -V_i^2 G_{ij} \tan^2 \phi - V_i V_j \tan \phi (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (11)$$

$$Q_{is} = B_{ij} V_i^2 \tan^2 \phi + V_i V_j \tan \phi (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (12)$$

$$P_{js} = -V_j V_i \tan \phi (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (13)$$

$$Q_{js} = -V_j V_i \tan \phi (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (14)$$

### C. FACTS CİHAZLARI KULLANARAK OPTİMAL REAKTİF GÜÇ AKIŞI PROBLEMİNİN MODELLENMESİ

Optimal reaktif güç akışı (ORGA) problemi, modern güç sistemlerinde eşitlik ve eşitsizlik sınırları içerisinde aktif güç kaybının minimize edilmesi olarak tanımlanır. Problem, bir optimizasyon problemi olarak düşünüldüğünde bağımlı ve kontrol değişkenleri Eş.15 ve Eş.16'daki gibi modellenir [22,24].

$$\mathbf{x}^T = [P_{slack}, V_{L_1} \dots V_{L_{NL}}, Q_{G_1} \dots Q_{G_{NG}}, S_{I_1} \dots S_{I_{NTL}}] \quad (15)$$

$$\mathbf{u}^T = [V_{G_1} \dots V_{G_{NG}}, Q_{C_1} \dots Q_{C_{NC}}, T_1 \dots T_{NT}, TCSC_{1TCSC} \dots TCSC_{NTCSC}, \phi_{TCPS} \dots \phi_{NTCPS}] \quad (16)$$

$\mathbf{x}^T$ : bağımlı değişkenleri içeren vektörü,  $\mathbf{u}^T$ : ise kontrol değişkenlerini içeren vektörü temsil etmektedir.  $P_{slack}$ : salınım arasının aktif güç değeri,  $V_L$ : tüm yük baralarının gerilim değerleri,  $Q_G$ : generatörlerin reaktif güç değerlerini,  $NL$ : toplam yük barası sayısını,  $NG$ : toplam generatör sayısını,  $NTL$ : toplam

iletim hattı sayısını belirtmektedir.  $V_G$ : generatörlerin terminal gerilim değerini,  $Q_C$ : sistemdeki şönt kapasiteyi,  $T$ : transformatörlerin kademe değiştirme değerini,  $TCSC$ :  $TCSC$ 'nin çalışma aralığını,  $\Phi$ :  $TCPS$ 'nin faz kaydırma açısı değerini,  $NC$ : sistemdeki şönt kapasite sayısını,  $NT$ : kademe değiştirici transformatör sayısını,  $NTCSC$ : sistemdeki toplam  $TCSC$  sayısını,  $NTCPS$ : sistemdeki toplam  $TCPS$  sayısını tanımlamaktadır.

Bu çalışmada, en uygun kontrol değişkenlerinin belirlenmesi için ORGA probleminde kullanılmak üzere üç farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

#### ▪ Amaç Fonksiyonları

##### *Aktif Güç Kayıpları*

Güç sistemlerinde iletim hatlarının toplam aktif güç kaybı problemin birinci amaç fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Matematiksel olarak Eşit.17'deki gibi gösterilmektedir [22,24].

$$F_1 = \min \left\{ \sum_{k=1}^{NTL} g_k \left( V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \right) \right\} \quad (17)$$

Burada,  $g_k$ : k. iletim hattının kondüktansı olarak ifade edilmektedir.

##### *Gerilim Salınımı*

Güç sisteminin iyi bir gerilim performansına sahip olabilmesi için, her bir yük barasındaki gerilim salınıminin küçük değerde tutulması istenmektedir. Gerilim salınımi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [31].

$$F_2 = VD = \min \left\{ \left( \sum_{j=1}^{NL} |V_{L_j} - 1| \right) \right\} \quad (18)$$

##### *Gerilim Kararlılığı İndeksi*

Bu çalışmada, gerilim kararlılığı indeksi üçüncü amaç fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Güç sistemleri, uzun iletim hatları ve ağır yük koşullarına sahip karmaşık yapılar olarak ifade edilmektedir. Bu durum gerilim kararlılığı problemini ortaya çıkarmakta olup, gerilim kararlılığı nominal çalışma koşullarında her bir bara gerilim değerinin belirtilen sınır değerleri içerisinde tutulması olarak tanımlanmaktadır. Güç sistemlerinde her bir veri yolunun  $L$ -indeks değerleri, güç sistemi gerilim kararlılığının iyileştirilmesi ve tanımlanması için iyi bir gösterge olarak ifade edilmektedir.  $L$ -indeks değeri 0 ile 1 arasında değişen değerler olarak tanımlanmakta olup, 0 yükü olmayan güç sistemi, 1 değeri ise gerilim çökmesi olarak tanımlanır.  $L$ -indeks değeri Eşit.19'daki gibi hesaplanmaktadır [31].

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{NG} F_{ji} \frac{V_i}{V_j} \right|, \text{ where } j = 1, 2, \dots, NL \quad (19)$$

$$F_{ji} = -[Y_1]^{-1} [Y_2]$$

$Y_1$  ve  $Y_2$  bara admitans matrisinin alt matrisi olarak tanımlanmaktadır. Eş.20'de  $Y_1$  ve  $Y_2$  alt matrislerinin elde edilişi gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (20)$$

Tüm yük baraları için  $L$ -indeks değeri hesaplanmakta olup,  $L$ -indeks değerinin maksimum değeri, güç sisteminin kararlılığının istenilen sınır değerleri açısından kararlılık göstergesi olarak Eş.21'deki gibi ifade edilmektedir.

$$F_3 = L_{\max} = \max(L_j), \text{ where } j = 1, 2, \dots, NL \quad (21)$$

#### ▪ Sınırlar

##### Eşitlik Sınırları

Yük akışı eşitlikleri problemin eşitlik sınırları olarak ifade edilmektedir [22,24].

$$\sum_{i=1}^{NB} (P_{Gi} - P_{Li}) + \sum_{i=1}^{NTCPS} P_{is} = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^{NB} (Q_{Gi} - Q_{Li}) + \sum_{i=1}^{NTCPS} Q_{is} = - \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (23)$$

$P_{Li}$ ,  $Q_{Li}$ :  $i$ . baranın aktif ve reaktif güçlerini,  $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ :  $i$ . baraya ait generatör ünitesinin aktif ve reaktif güç değerlerini,  $P_{is}$ ,  $Q_{is}$ :  $i$ . baraya ait TCPS'nin aktif ve reaktif güçlerini, NB: güç sistemindeki toplam bara sayısını,  $Y_{ij}$ :  $i$ . ve  $j$ . bara arasındaki iletim hattının admitans değerini,  $\theta_{ij}$ :  $i$ . ve  $j$ . bara arasındaki iletim hattının admitans değerinin açısını göstermektedir.

##### Eşitsizlik Sınırları

Sistemin generatör değerlerine ait eşitsizlik sınırları Eş.24'de gösterilmektedir [22,24].

$$\begin{aligned} P_{Gi,\min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} & i = 1, 2, \dots, NG \\ Q_{Gi,\min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} & i = 1, 2, \dots, NG \\ V_{Gi,\min} &\leq V_{Gi} \leq V_{Gi,\max} & i = 1, 2, \dots, NG \end{aligned} \quad (24)$$

Kademe değiştirici transformatörün, iletim hatlarının maksimum yüklenebilirlik değerini ve yük baralarının eşitsizlik sınırlarını ifade eden denklemler Eş.25 ve Eş.27 arasında gösterilmektedir [22,24].

$$T_{i,\min} \leq T_i \leq T_{i,\max} \quad i = 1, 2, \dots, NT \quad (25)$$

$$S_{li} \leq S_{li,max} \quad i = 1,2,\dots,NL \quad (26)$$

$$V_{Li,min} \leq V_{Li} \leq V_{Li,max} \quad i = 1,2,\dots,NL \quad (27)$$

Sistemdeki şönt kapasitörlerin, TCSC'nin çalışma aralığının minimum ve maksimum değerleri aşağıda gösterilmektedir [22,24].

$$Q_{Ci,min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci,max} \quad i = 1,2,\dots,NC \quad (28)$$

$$TCSC_{i,min} \leq TCSC_i \leq TCSC_{i,max} \quad i = 1,2,\dots,NTCSC \quad (29)$$

TCPS'nin çalışma aralığı ve problemin uygunluk fonksiyonu Eş.30 ve Eş.31'deki denklemlerle ifade edilmektedir [22,24].

$$\phi_{iTCPS,min} \leq \phi_{iTCPS} \leq \phi_{iTCPS,max} \quad i = 1,2,\dots,NTCPS \quad (30)$$

$$J = F_{1,2,3} + \lambda_V \sum_{i=1}^{NL} (V_{Li} - V_{Li}^{lim})^2 + \lambda_Q \sum_{i=1}^{NG} (Q_{Gi} - Q_{Gi}^{lim})^2 + \lambda_S \sum_{i=1}^{NTL} (S_{li} - S_{li}^{lim})^2 \quad (31)$$

$\lambda_V$ ,  $\lambda_Q$ , ve  $\lambda_S$  uygunluk fonksiyonun penaltı katsayılarını gösterirken, bağımlı değişkenler sınır değerlerin dışına çıktığında uygulanacak ceza fonksiyonundaki limit değerleri Eş.32 ve Eş.34'deki gibi gösterilir.

$$V_{Li}^{lim} = \begin{cases} V_{Li,min} & \text{if } V_{Li} < V_{Li,min} \\ V_{Li,max} & \text{if } V_{Li} > V_{Li,max} \end{cases} \quad (32)$$

$$Q_{Gi}^{lim} = \begin{cases} Q_{Gi,min} & \text{if } Q_{Gi} < Q_{Gi,min} \\ Q_{Gi,max} & \text{if } Q_{Gi} > Q_{Gi,max} \end{cases} \quad (33)$$

$$S_{li}^{lim} = S_{li,max} \quad \text{if } S_{li} > S_{li,max} \quad (34)$$

### III. HİBRİT PARÇACIK SÜRÜ VE YERÇEKİMSSEL ARAMA ALGORİTMASI

#### A. YERÇEKİMSSEL ARAMA ALGORİTMASI

YAA, Newton'un hareket ve yerçekimi kanunlarından esinlenerek 2009 yılında Rashedi ve arkadaşları tarafından literatüre sunulan popülasyon temelli optimizasyon algoritmasıdır [30]. YAA, kolay uygulanabilmesi, kısa hesaplama zamanına, kararlı yakınsama eğrisine, küçük bir hafızaya ve lokal optimumdan kaçma yeteneğine sahip olması gibi özelliklerinden çok çeşitli doğrusal olmayan optimizasyon problemlerin çözümünde kullanılmıştır [32-33]. YAA'da her bir ajan veya parçacık bir



kütle olarak kabul edilmekte olup, yerçekimi kuvvetine maruz kaldıklarında arama uzayı içerisinde en iyi çözüme ulaşmak için hareket ederler. Başka bir deyişle, yerçekimi kuvveti kütleleri ağır olan kütleyle doğru götürmektedir. En iyi çözüme karşılık gelen kütle ağır kütle olarak ifade edilirken, arama uzayı içerisinde hafif olan diğer kütlelerden daha yavaş hareket etmekte olup, bu kütleleri kendine doğru çekmektedir. Böylece arama uzayı içerisindeki aday çözümler optimum çözüme doğru yakınsamaktadır. Algoritmada durdurma kriteri olarak iterasyon sayısı seçildiğinden, iterasyon sayısının bitiminde en iyi çözümü kütlesi ağır olan parçacık temsil edecektir. Algoritmanın başlangıcında, yerçekimi sabiti ( $G_0$ ) ve arama uzayının toplam parçacık sayısı değişkenlerin belirtilen sınır değerleri içerisinde aday çözüm olarak belirlenmektedir.  $N$  adet kütlelen oluşan arama uzayında  $i$ . kütlelen pozisyonu Eş.35'deki gibi ifade edilmektedir.

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n) \quad i=1,2,\dots,N \quad (35)$$

$x_i^d$ ,  $i$ . kütlelen  $d$ . boyuttaki konumu ve  $N$  arama uzayının boyutunu belirtirken, problem minimizasyon veya maksimizasyon problemi olması durumuna göre en iyi ve en kötü değerleri Eş.36 ve Eş.39 arasındaki denklemlerle ifade edilir.

Minimizasyon problemi:

$$best(t) = \min_{j \in \{1, \dots, M\}} fit_j(t) \quad (36)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1, \dots, M\}} fit_j(t) \quad (37)$$

Maksimizasyon problemi:

$$best(t) = \max_{j \in \{1, \dots, M\}} fit_j(t) \quad (38)$$

$$worst(t) = \min_{j \in \{1, \dots, M\}} fit_j(t) \quad (39)$$

Kullanıcı deneyimine bağlı olarak belirlenen yerçekimi sabitinin iterasyona bağlı olarak azalması ve arama hızının kontrol edilmesi Eş.40'a göre yapılmaktadır.

$$G(t) = G_0 e^{\left(-\alpha \frac{t}{T}\right)} \quad (40)$$

$G_0$ : yerçekimi sabitinin başlangıç değeri,  $\alpha$ : kullanıcı tarafından belirlenen sabit değer,  $t$ : şu anki iterasyon sayısı ve  $T$  maksimum iterasyon sayısı olarak ifade edilmektedir. Optimizasyon probleminin arama uzayındaki ajanlara ait uygunluk değerleri hesaplandıktan sonra  $t$ . iterasyondaki  $i$ . ajana ait kütle, kütlelen yerçekimsel ( $M_{ai}$ ), pasif yerçekimsel ( $M_{pi}$ ) ve eylemsizlik kütleleri ( $M_i$ ) göre sınıflandırılması göz önünde bulundurularak eşit kabul edilmesiyle Eş.41 ve Eş.43 arasındaki denklemlere göre hesaplanmaktadır.

$$M_{pi} = M_{ai} = M_{ii} = M_i \quad (41)$$

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (42)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^M m_j(t)} \quad (43)$$

Çözüm uzayında  $i$ . ajanın toplam kuvveti aşağıdaki denklemlere göre ifade edilmektedir.

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in kbestj \neq i} rand_j F_{ij}^d(t) \quad (44)$$

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_i(t) \times M_j(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (45)$$

$$R_{ij}(t) = \left( \|X_i(t), X_j(t)\|_2 \right) \quad (46)$$

$F_{ij}^d$ :  $t$ . iterasyonda  $d$ . boyuttaki  $i$  ve  $j$  kütleleri arasındaki kuvveti,  $M_j(t)$ :  $t$ . iterasyondaki  $j$ . kütlelerin aktif kütlelerini,  $R_{ij}(t)$ :  $i$ . ve  $j$ . kütleler arası öklit mesafesini,  $\varepsilon$ : kullanıcı tarafından belirlenen küçük sabit bir değeri,  $x_j^d(t)$ ,  $x_i^d(t)$ :  $i$ . ve  $j$ . kütlelerinin  $d$ . boyuttaki konumu belirtmektedir.

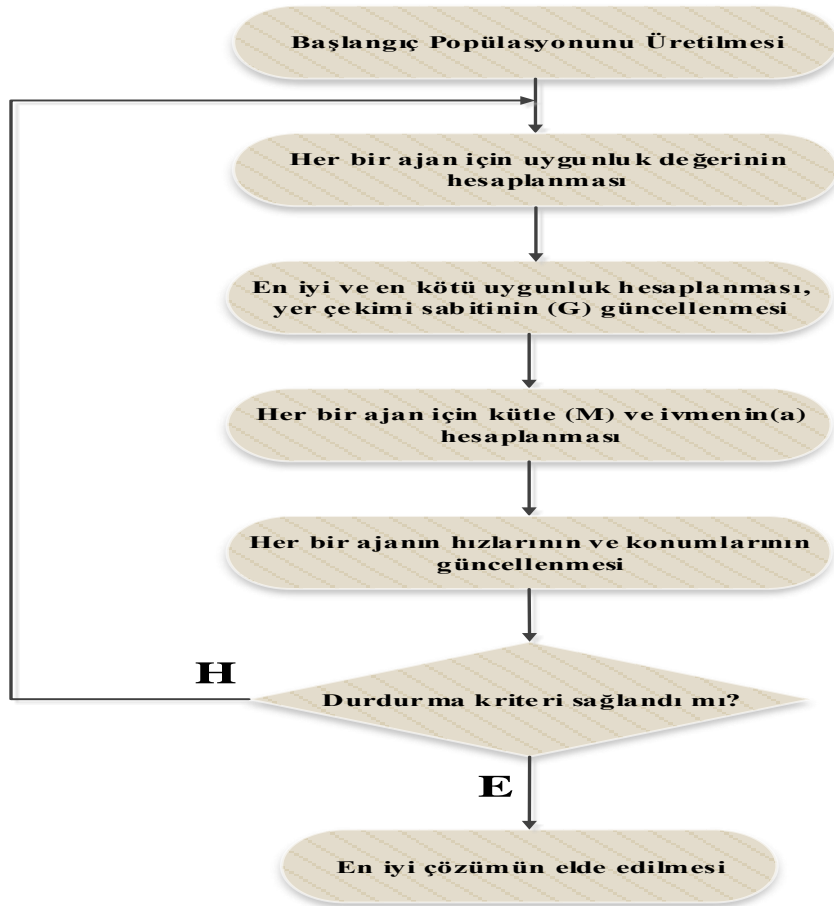
Hareket kanundan yararlanarak hesaplanan ivme değeri, ivmeye bağlı olarak bir sonraki iterasyonda değişen hız ve hıza bağlı olarak bir sonraki iterasyonda değişen konum değerleri Eş.47 ve Eş.49 arasında gösterilen denklemlere göre yapılmaktadır.

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} = \sum_{j \in kbestj \neq i} rand_j G(t) \frac{M_j(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (47)$$

$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (48)$$

$$x_i^d(t+1) = v_i^d(t+1) + x_i^d(t) \quad (49)$$

Algoritma istenilen durdurma kriteri sağlanıncaya kadar Şekil 4'teki akış diyagramına göre çalışmasına devam eder.



Şekil 4. YAA akış diyagramı

## B. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Uçan kuş sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenerek Kennedy ve Eberhart tarafından 1995 yılında [34] popülasyon temelli bir optimizasyon algoritması olarak literatüre sunulmuş olup, bir çok optimizasyon problemine araştırmacılar tarafından başarıyla uygulanmıştır. Algoritmada, çözüm uzayındaki parçacık olarak ifade edilen aday çözüm vasıtasıyla en iyi çözüm aranırken, bu parçacık bir sonraki iterasyondaki hız ve konumunu kendi tecrübesi ve sürü tecrübesini kullanarak ayarlayabilmektedir. Kendi tecrübesi ( $p_{best}$ ), her bir parçacığın o ana kadar bulduğu en iyi çözümün konumunu arama uzayında takip etmesi olarak ifade edilirken, sürü tecrübesi ( $g_{best}$ ) ise çözüm uzayındaki en iyi çözüme sahip parçacığın değeri olarak tanımlanmaktadır. Yerel en iyi ve küresel en iyi yapısında buldurması, algoritmayı diğer algoritmalarından ayıran en önemli özellikler olarak ifade edilmektedir. Algoritmadaki parçacığın arama uzayındaki hız ve konum değişimini ifade eden denklemler aşağıdaki gibidir.

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + c_1 \times rand \times (pbest_i - x_i(t)) + c_2 \times rand \times (gbest_i - x_i(t)) \quad (50)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (51)$$

## B. HİBRİT PSO-YAA OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

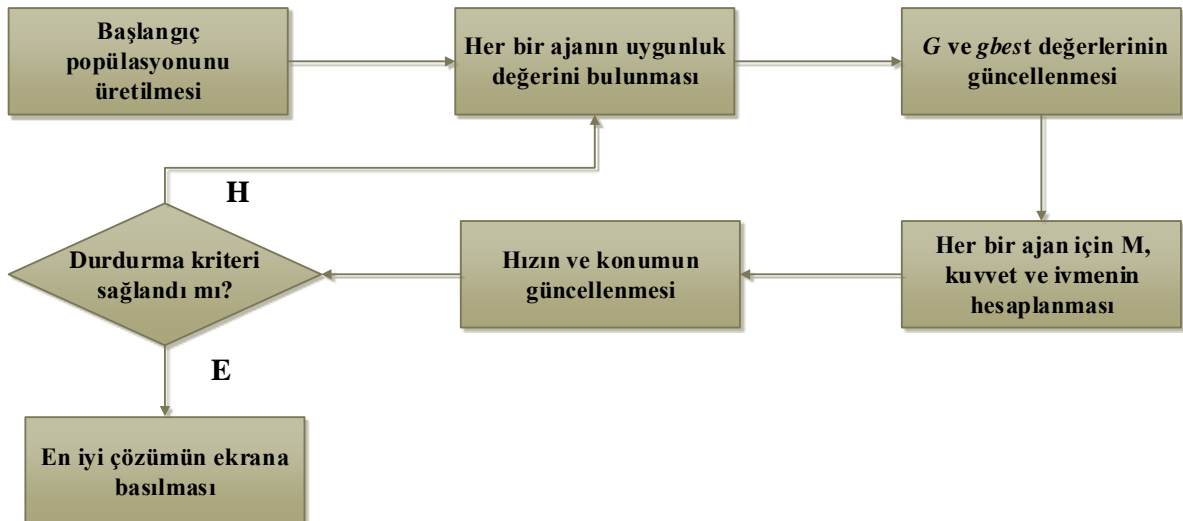
Sezgisel algoritmaların homojen veya heterojen olarak birlikte çalışabilme özellikleri kullanılarak, düşük veya yüksek seviyeli hibrit optimizasyon algoritmaları elde edilebilir. Bu özelliklerden yola çıkarak Mirjalili ve Hashim 2010 yılında YAA ile PSO algoritmalarını kullanarak hibrit PSO-YAA algoritmasını oluşturup, literatüre sunmuşlardır [27]. Önerilen yaklaşım her iki algoritmanın en çok kullanılan yönlerinin birleşimi ve biri diğerinden sonra kullanılmadığından birlikte ya da paralel olarak çalışabilen algoritma olarak tanımlanmaktadır. İki farklı optimizasyon algoritmasının birleşimi olduğu için heterojen yapıda olup, başka bir ifadeyle PSO'daki sosyal davranış yeteneği ile YAA'nın yerel arama yeteneğinin birleşimi olarak da ifade edilmektedir. Bu ifade Eş.52'de gösterilmektedir.

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + c_1' \times rand \times ac_i(t) + c_2' \times rand \times (g_{best} - x_i(t)) \quad (52)$$

Burada,  $v_i(t)$ :  $t$ . iterasyondaki  $i$ . ajanın hızını,  $w$ : ağırlık fonksiyonunu,  $c_1'$  ve  $c_2'$  ağırlık faktörlerini,  $rand$ : 0 ile 1 arasında rasgele üretilen bir sayıyı ve  $ac_i(t)$ :  $t$ . iterasyondaki  $i$ . ajanın ivmesini,  $g_{best}$ :  $o$  ana kadar ki en iyi çözümü ifade etmektedir. Bir sonraki iterasyonda ajanların konumları Eş.53'e göre bulunur.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (53)$$

Tüm ajanların belirtilen sınırlar içerisinde rasgele üretilmesiyle başlangıç popülasyonu oluşturularak, Hibrit PSO-YAA algoritmasındaki çözüm uzayı elde edilmiş olunur. Şekil 5'te akış diyagramı gösterilen PSO-YAA algoritmasındaki akış işlemine göre, popülasyondaki her bir ajan için uygunluk değeri hesaplanır. İterasyona bağlı olarak yerçekimi sabiti ve  $g_{best}$  değerlerinin güncellenmesi, her bir ajanın kütlelerinin, yerçekimi kuvvetinin ve ivmesinin hesaplanması, ve algoritmada en iyi çözümün güncellenmesi durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam etmektedir. Durdurma kriteri sağlandığında algoritma en iyi çözümü ekrana basmaktadır.



Şekil 4. Hibrit PSO-YAA algoritmasının akış diyagramı

## IV. BENZETİM SONUÇLARI

Bu çalışmada, FACTS cihazlarından TCSC ve TCPS'nin dahil edildiği IEEE 30 baralı test sisteminde ORGA problemi Girdap Algoritması (VS), hibrit PSO GSA, Ateş Böceği Algoritması (FA) ve GSA algoritmaları tarafından çözülmüştür. Test sistemi 41 iletim hattı, 6 generatör ve 24 adet yük barasını, 4 adet (6-9, 6-10, 4-12 ve 27-28) iletim hatlarına bağlı kademe değiştirici transformatör, 10 ve 24 baralara bağlı şönt kapasite içermektedir. Test sistemine ait hat ve yük parametreleri referans [35]'te verilmiş olup, sistemde 1 bara salınım barası, 2, 5, 8, 11 ve 13 numaralı baralar generatör barası olarak ifade edilmektedir. Tüm baralar için gerilim sınır değerleri (0.95 p.u. - 1.1 p.u.), kademe değiştirici transformatörlerin sınır değerleri (0.9 p.u. - 1.1 p.u.), kullanılan şönt kapasitelerin sınır değerleri (0MVar - 30MVar) olarak kullanılmıştır. Ayrıca sistemdeki diğer kontrol değişkenlerinden TCSC'nin sınır değerleri (-0.7 p.u., 0.2p.u.), TCPS'nin sınır değerleri ise (-0.075, 0.075) radyan olarak alınmıştır. Benzetim çalışmaları FACTS cihazları kullanılmadan, sadece TCSC kullanılarak, son olarak da TCSC ve TCPS birlikte kullanılarak, üç farklı amaç fonksiyonu için gerçekleştirilmiştir.

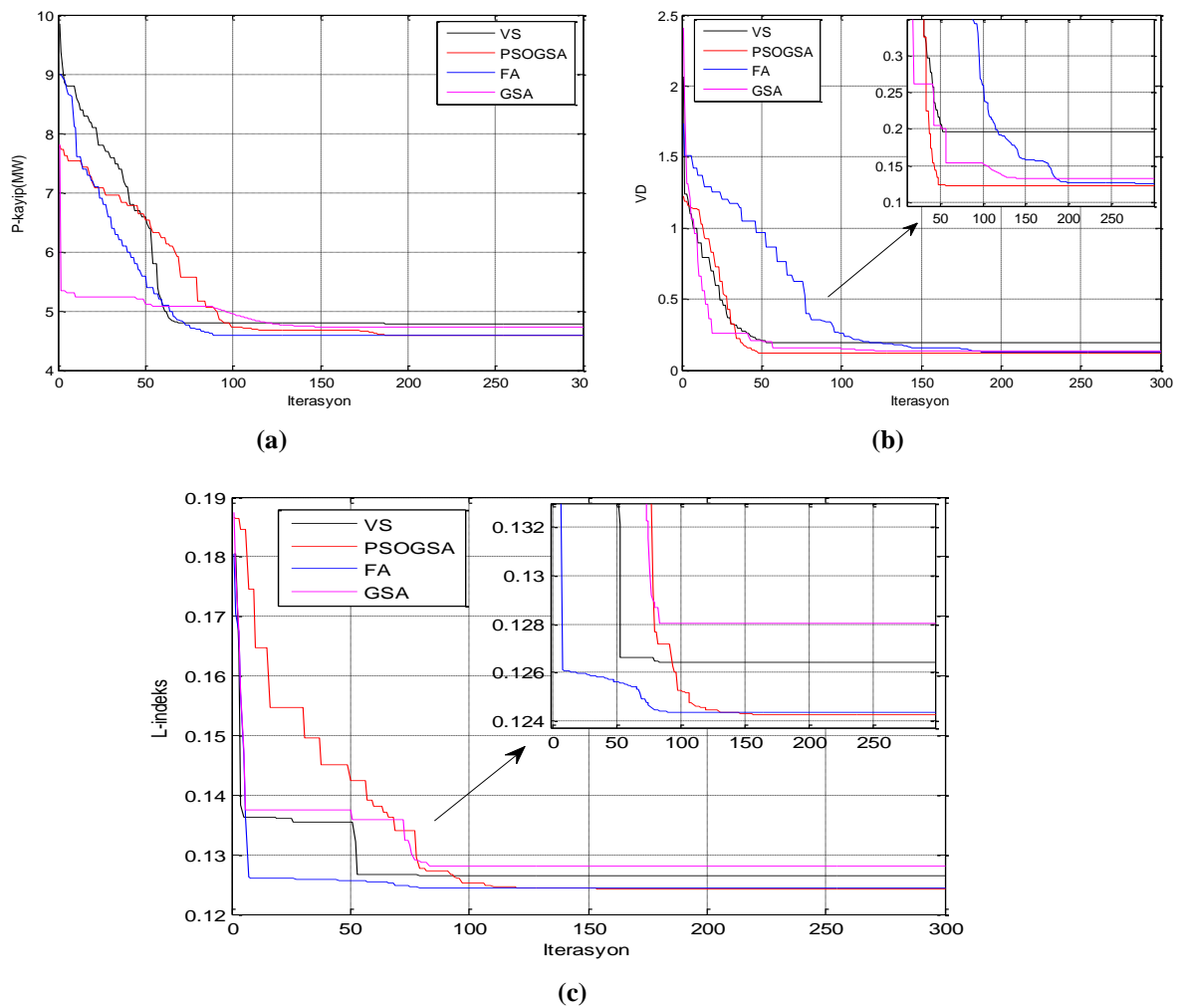
### *Benzetim Çalışması 1 (TCSC ve TCPS'siz Sistem):*

Bu benzetim çalışmasında, IEEE 30 baralı test sistemi için, TCSC ve TCPS kullanılmadan  $F_1$ ,  $F_2$  ve  $F_3$  amaç fonksiyonlarının minimum değerleri VS, PSO GSA, FA ve GSA algoritmaları tarafından bulunmuştur. Benzetim çalışmasında kullanılan optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1 detaylı bir şekilde incelendiğinde,  $F_1$  amaç fonksiyonu için 4.7839MW, 4.5950MW, 4.5953MW ve 4.7238MW sonuçları sırasıyla VS, PSO GSA, FA ve GSA algoritmalarından elde edilmiştir. PSO GSA algoritmasından elde edilen sonuç, diğer algoritmalarından elde edilen sonuçlara göre 3.94866%,  $6.5284 \times 10^{-3}\%$ , 2.7266% daha az değerdedir. Gerilim salınımı ve gerilim kararlılığı indeksi amaç fonksiyonları için Tablo 1'deki sonuçlar incelendiğinde minimum değer PSO GSA algoritmasından elde edildiği görülmektedir. PSO GSA'dan elde edilen sonuç, diğer algoritmalarından elde edilen sonuçlara göre gerilim salınımı açısından sistemi 37.23296%, 1.82975% ve 6.65658% iyileştirmiştir. Gerilim kararlılığı indeksi açısından incelendiğinde PSO GSA'dan 0.1242, VS'den 0.1264, FA'dan 0.1243 ve GSA'dan 0.1280 değerleri bulunduğu görülmektedir. Üç amaç fonksiyonu için optimizasyon algoritmalarından bulunan en uygun sonuçların yakınsama eğrileri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 6'da ise kontrol değişkenlerine göre sistemin bara gerilim profili gösterilmiştir. Üç amaç fonksiyonu için, optimizasyon algoritmalarından elde edilen kontrol değişkenleri sonuçlarına göre tüm bara gerilimleri belirtilen sınır değerleri içerisinde kaldığı Şekil 6'dan açıkça görülmektedir.

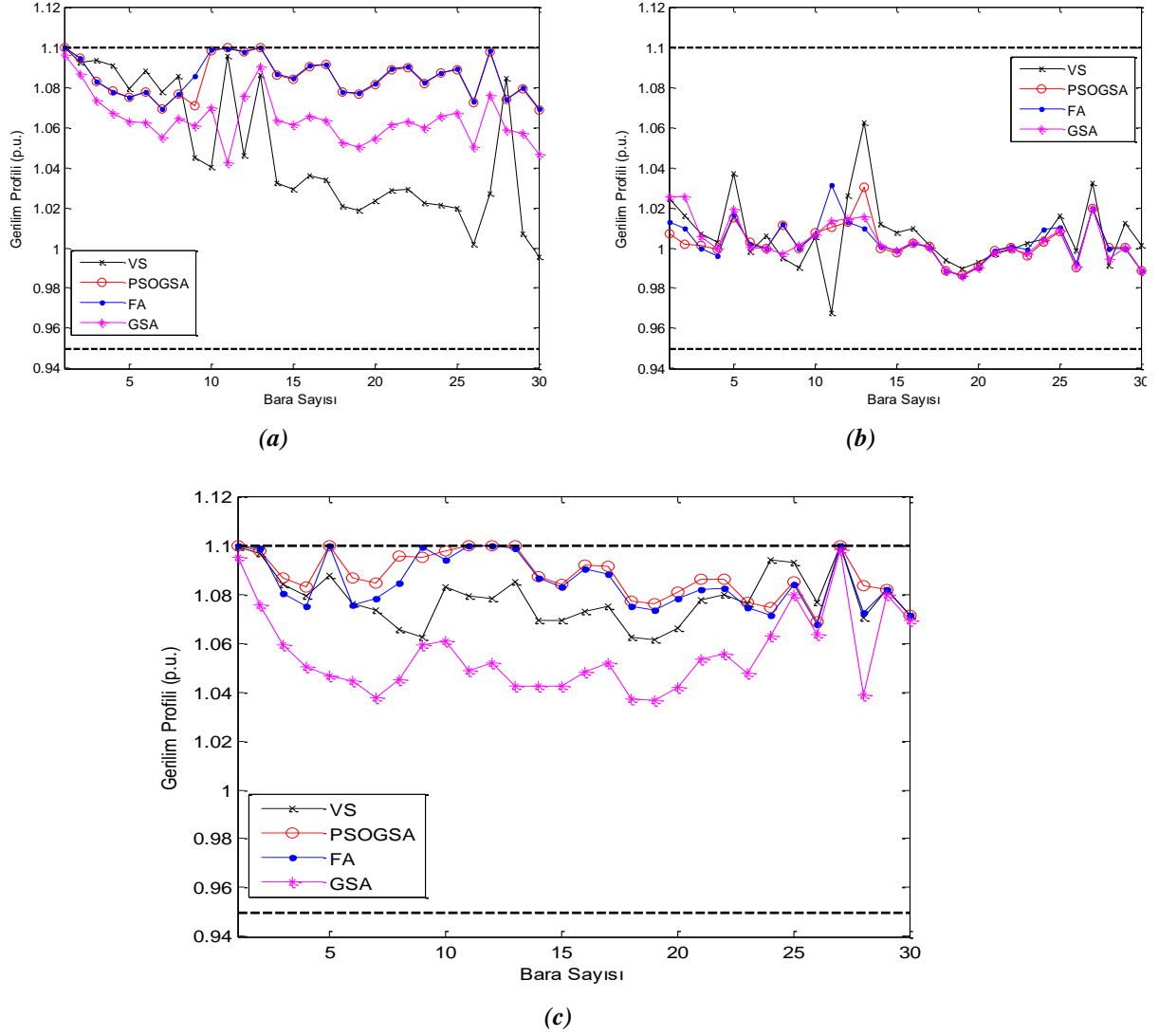
**Tablo 1.** Optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlar (TCSC ve TCPS'siz sistem)

Kontrol Değişkenleri	Amaç Fonksiyonları											
	F1				F2				F3			
	VS	PSOGSA	FA	GSA	VS	PSOGSA	FA	GSA	VS	PSOGSA	FA	GSA
$V_1$ (p.u.)	1.1000	1.1000	1.1000	1.0961	1.0247	1.0071	1.0127	1.0256	1.0993	1.1000	1.0999	1.0951
$V_2$ (p.u.)	1.0925	1.0943	1.0943	1.0864	1.0161	1.0018	1.0098	1.0253	1.0968	1.0974	1.0988	1.0756
$V_5$ (p.u.)	1.0795	1.0748	1.0749	1.0631	1.0369	1.0152	1.0166	1.0195	1.0874	1.1000	1.1000	1.0466
$V_8$ (p.u.)	1.0854	1.0765	1.0765	1.0644	0.9951	1.0111	1.0118	0.9971	1.0656	1.0954	1.0845	1.0449
$V_{11}$ (p.u.)	1.0956	1.1000	1.0993	1.0424	0.9676	1.0103	1.0312	1.0134	1.0790	1.1000	1.1000	1.0489
$V_{13}$ (p.u.)	1.0863	1.1000	1.1000	1.0901	1.0621	1.0301	1.0096	1.0157	1.0849	1.1000	1.0989	1.0424

$Q_{C10}$ (MVAR)	24.3367	26.6506	29.8082	15.0267	17.4452	21.0601	2.3966	19.8404	28.8117	16.0643	1.8484	16.7542
$Q_{C24}$ (MVAR)	7.4830	9.9695	9.8811	13.5757	12.1144	14.1858	19.5423	15.6565	23.6129	0.5620	0.0341	15.1413
$T_{6-9}$	1.0808	1.0869	1.0284	0.9990	1.0128	1.0263	1.0451	1.0176	1.0677	1.0003	0.9683	0.9776
$T_{6-10}$	1.0824	0.9000	0.9730	0.9454	0.9419	0.9671	0.9000	0.9834	0.9847	0.9354	0.9012	0.9656
$T_{4-12}$	1.0744	0.9610	0.9601	0.9834	0.9894	0.9821	0.9447	0.9516	0.9966	0.9521	0.9399	0.9670
$T_{27-28}$	1.0346	0.9584	0.9578	0.9639	0.9295	0.9542	0.9583	0.9501	0.9583	0.9559	0.9444	0.9149
VD	0.9215	1.9876	2.0107	1.4793	0.1966	<b>0.1234</b>	0.1257	0.1322	1.8322	2.0338	1.9635	1.3130
L-indeks	0.1411	0.1255	0.1254	0.1309	0.1440	0.1472	0.1472	0.1475	0.1264	<b>0.1242</b>	0.1243	0.1280
$P_{kayıp}$ (MW)	4.7893	<b>4.5950</b>	4.5953	4.7238	5.9845	5.9519	5.8876	5.5756	4.9668	4.9077	5.0190	5.1572



Şekil 5. Optimizasyon algoritmalarının yakınsama eğrileri



Şekil 6. Test sisteminin gerilim profili

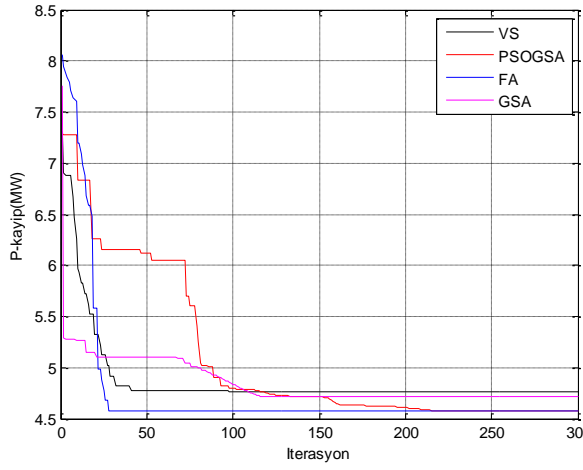
### Benzetim Çalışması 2 (TCSC'li Sistem):

IEEE 30 baralı test sistemi için, TCSC kullanılarak  $F_1$ ,  $F_2$  ve  $F_3$  amaç fonksiyonlarının minimum değerleri seçilen optimizasyon algoritmaları tarafından bulunmuştur. Benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.  $F_1$  amaç fonksiyonu için, minimum değer 4.5789MW olarak PSOGSA'dan elde edilmiştir. PSOGSA'dan elde edilen sonuç, VS'den 0.1813MW, FA'dan 0.003MW ve GSA'dan 0.1325MW daha azdır. İkinci ve üçüncü amaç fonksiyonları için Tablo 2'deki sonuçlar incelendiğinde, minimum değer PSOGSA algoritmasından elde edildiği görülmektedir. Gerilim salınımı açısından PSOGSA algoritması, sistemi 29.26267%, 0.5668% ve 6.61596% iyileştirmiştir. Gerilim kararlılığı indeksi açısından TCSC'li sistem incelendiğinde, optimizasyon algoritmalarından elde edilen minimum değerler 0.0999, 0.0863, 0.0867 ve 0.0968 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, optimizasyon algoritmaları içerisinde PSOGSA algoritması 0.0863 değeri ile minimum değere ulaştığı görülmektedir. Amaç fonksiyonları için optimizasyon algoritmalarından bulunan en uygun değerlerin yakınsama eğrileri Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 8'de ise kontrol değişkenlerine göre sistemin bara gerilim profili gösterilmiştir.

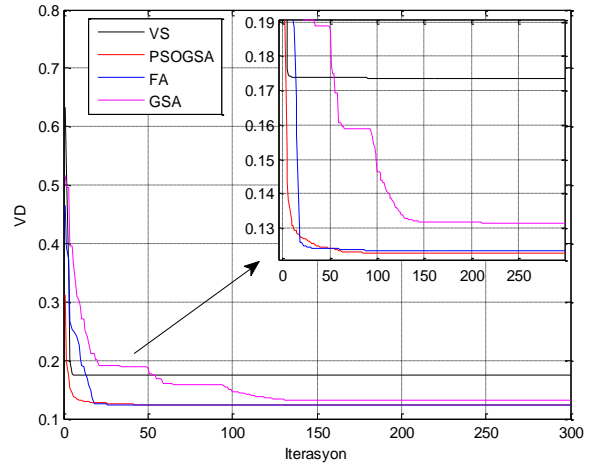
**Tablo 2.** Optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlar (TCSC'li sistem)

Kontrol Değişkenleri	Amaç Fonksiyonları											
	F1				F2				F3			
	VS	PSOGSA	FA	GSA	VS	PSOGSA	FA	GSA	VS	PSOGSA	FA	GSA
V <sub>1</sub> (p.u.)	1.1000	1.1000	1.1000	1.1000	1.0295	1.0082	1.0086	1.0215	1.0524	1.0999	1.1000	1.0304
V <sub>2</sub> (p.u.)	1.0968	1.0943	1.0942	1.0915	1.0174	1.0033	1.0042	1.0202	1.0490	1.0958	1.0993	1.0250
V <sub>5</sub> (p.u.)	1.0942	1.0748	1.0748	1.0684	1.0042	1.0160	1.0152	1.0194	1.0100	1.1000	1.1000	1.0068
V <sub>8</sub> (p.u.)	1.0786	1.0765	1.0765	1.0711	1.0085	1.0119	1.0116	1.0002	1.0242	1.1000	1.0859	1.0028
V <sub>11</sub> (p.u.)	1.0559	1.1000	1.0999	1.0522	0.9948	1.0374	1.0145	1.0089	1.0511	1.1000	1.1000	1.0474
V <sub>13</sub> (p.u.)	1.0880	1.1000	1.1000	1.0847	0.9891	1.0232	1.0202	1.0238	1.0568	1.1000	1.1000	1.0859
Q <sub>C10</sub> (MVAR)	27.2801	26.6341	29.5020	13.0919	28.0086	9.8861	22.2659	16.7846	19.6846	26.7448	0.4488	15.6411
Q <sub>C24</sub> (MVAR)	6.3853	9.9626	9.9417	16.4760	18.1715	11.8746	11.9006	15.0524	24.9132	0.0122	0.0004	17.6588
T <sub>6-9</sub>	1.0989	1.0857	1.0230	1.0265	0.9807	1.0565	1.0317	1.0130	0.9124	1.0194	0.9656	1.0243
T <sub>6-10</sub>	0.9717	0.9000	0.9785	0.9768	0.9953	0.9000	0.9630	0.9639	1.0408	0.9537	0.9000	0.9359
T <sub>4-12</sub>	1.0048	0.9560	0.9558	1.0036	0.9703	0.9609	0.9555	0.9665	1.0711	0.9734	0.9589	0.9924
T <sub>27-28</sub>	1.0083	0.9631	0.9629	0.9946	0.9559	0.9665	0.9582	0.9583	0.9542	0.9833	0.9686	0.9226
TCSC <sub>4-12</sub>	0.1306	0.2000	0.2000	-0.2421	-0.2449	0.1907	0.1898	-0.2204	-0.0732	-0.4619	-	-0.4719
TCSC <sub>27-28</sub>	-0.0108	-0.2227	-0.2176	-0.3561	-0.1371	-0.4049	-0.1527	-0.2497	-0.6752	-0.7000	-0.700	-0.6800
VD	1.2229	1.9976	2.0148	1.3149	0.1736	<b>0.1228</b>	0.1235	0.1315	0.8766	2.0657	1.9476	0.7580
L-indeks	0.1360	0.1149	0.1152	0.1147	0.1394	0.1233	0.1390	0.1333	0.0999	<b>0.0863</b>	0.0867	0.0968
P <sub>kayıp</sub> (MW)	4.7602	<b>4.5789</b>	4.5792	4.7114	5.5829	5.9219	5.8845	5.5921	5.5834	4.9735	5.0395	5.4422

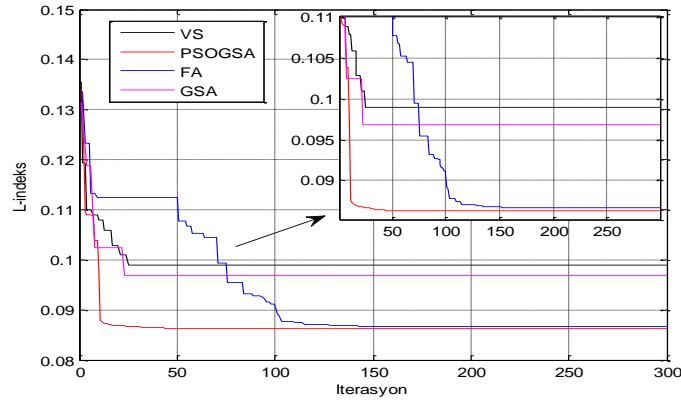




(a)

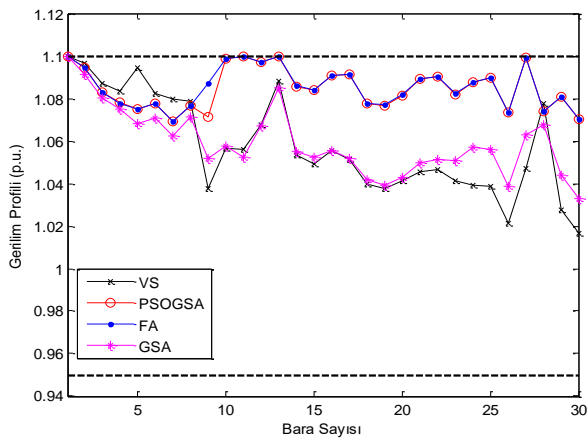


(b)

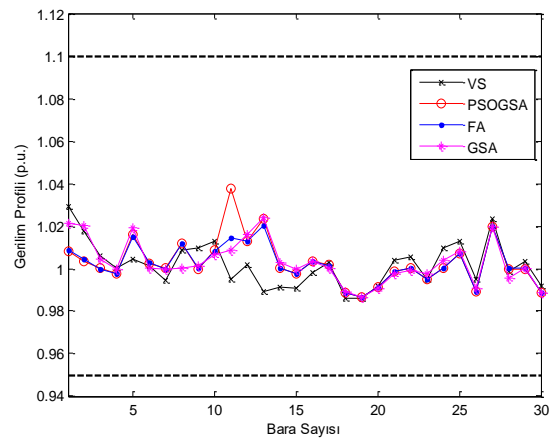


(c)

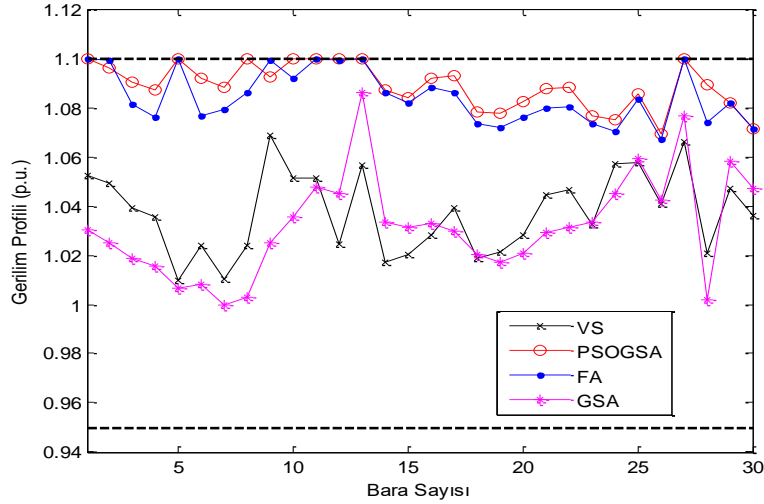
Şekil 7. Optimizasyon algoritmalarının yakınsama eğrileri (TCSC'li sistem)



(a)



(b)



(c)

Şekil 8. Test sisteminin gerilim profili (TCSC'li sistem)

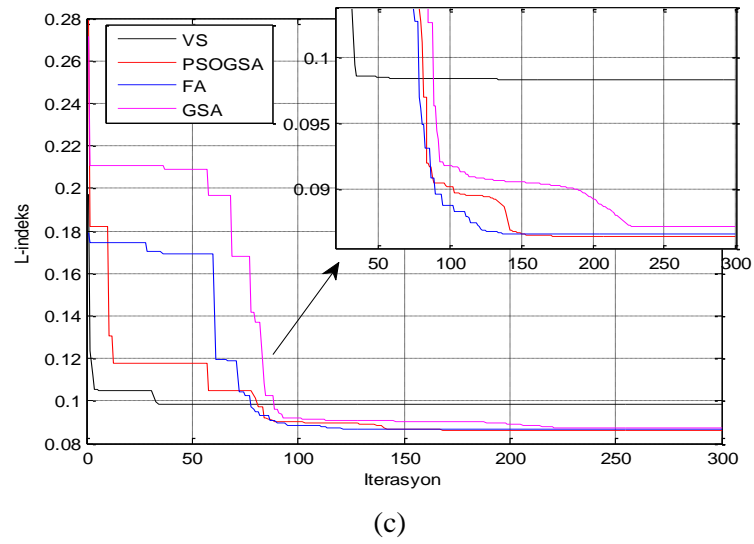
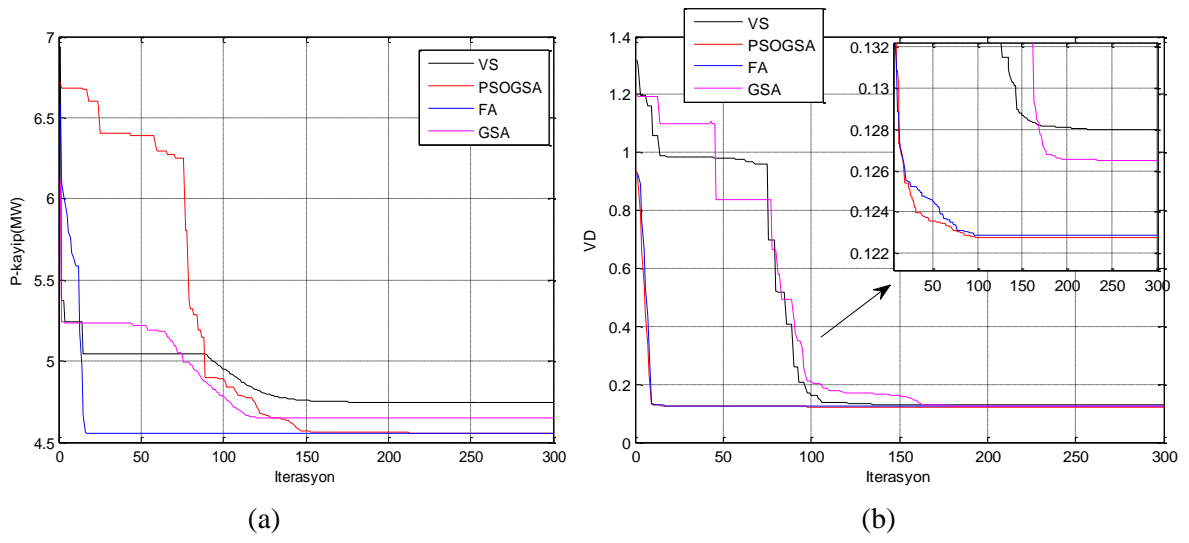
**Benzetim Çalışması 3 (TCSC ve TCPS'li Sistem):**

Test sistemi için, TCSC ve TCPS kullanılarak  $F_1$ ,  $F_2$  ve  $F_3$  amaç fonksiyonlarının minimum değerleri önerilen optimizasyon algoritmaları tarafından bulunmuştur. Benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlar Tablo 3'de gösterilmektedir.  $F_1$  amaç fonksiyonu için, minimum değerler 4.768MW, 4.5521MW, 4.5524MW ve 4.6506MW sonuçları sırasıyla VS, PSOGSA, FA ve GSA algoritmalarından elde edilmiştir. PSOGSA algoritmasından elde edilen sonuç, diğer algoritmalarından elde edilen sonuçlara göre 4.5281%,  $6.5899 \times 10^{-30}$ %, 2.188% daha az değerdedir. Gerilim salınımı açısından PSOGSA algoritması, sistemi 4.0656%, 0.16273% ve 2.92721% iyileştirmiştir. Gerilim kararlılığı indeksi açısından TCSC ve TCPS'li sistem incelendiğinde, optimizasyon algoritmalarından elde edilen minimum değerler 0.0983, 0.0863, 0.0865 ve 0.0871 olarak elde edilmiştir. Optimizasyon algoritmaları içerisinde PSOGSA algoritması 0.0863 değeri ile minimum değere sahiptir. Amaç fonksiyonları için optimizasyon algoritmalarından bulunan en uygun değerlerin yakınsama eğrileri Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 10'da ise kontrol değişkenlerine göre sistemin bara gerilim profili gösterilmiştir.

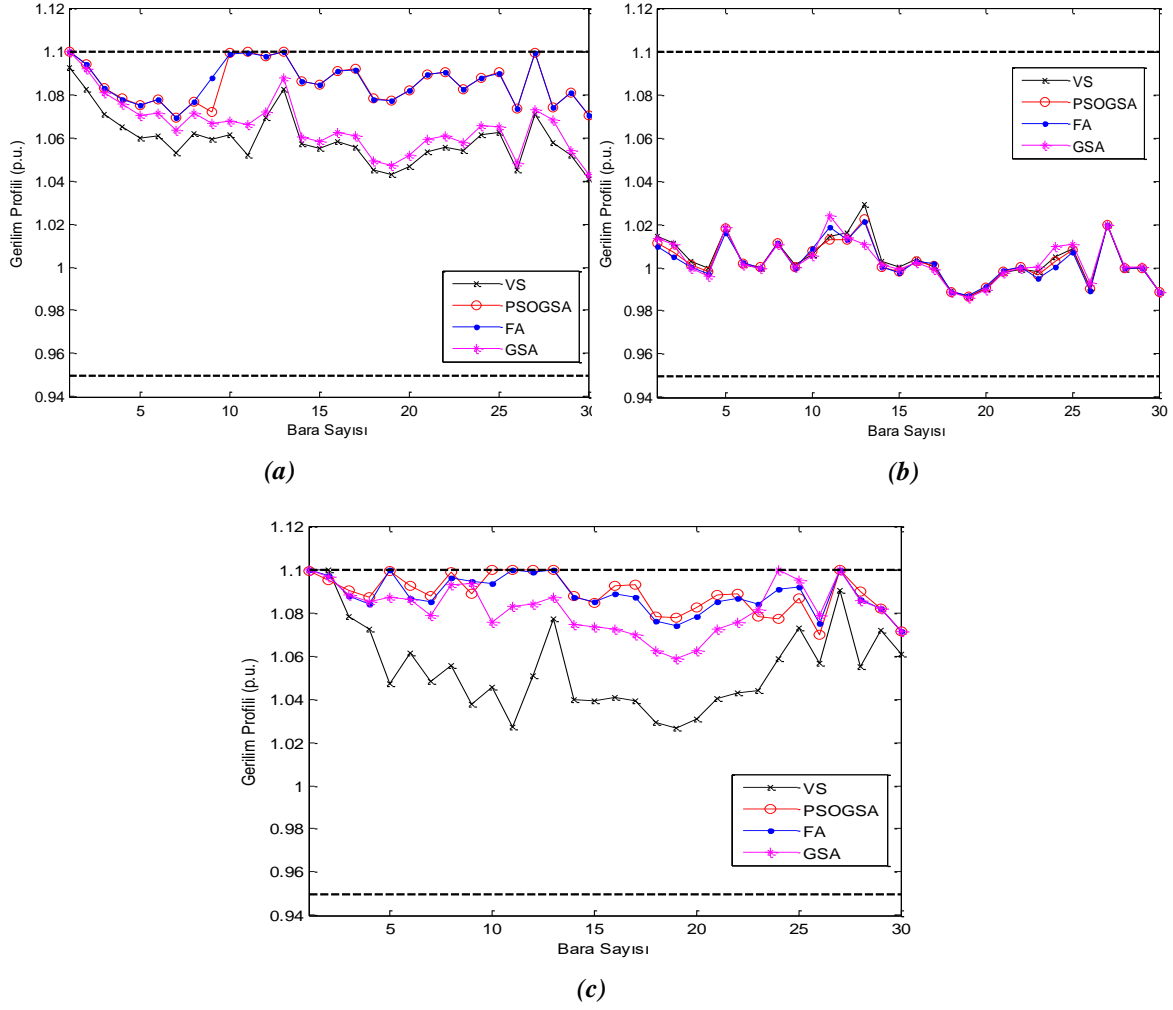
**Tablo 3. Optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlar (TCSC ve TCPS'li sistem)**

Kontrol Değişkenleri	Amaç Fonksiyonları											
	F1				F2				F3			
	VS	PSOGSA	FA	GSA	VS	PSOGSA	FA	GSA	VS	PSOGSA	FA	GSA
$V_1$ (p.u.)	1.0924	1.1000	1.1000	1.1000	1.0147	1.0113	1.0097	1.0136	1.1000	1.0994	1.1000	1.1000
$V_2$ (p.u.)	1.0824	1.0942	1.0942	1.0916	1.0113	1.0072	1.0049	1.0108	1.1000	1.0952	1.0970	1.0966

$V_5$ (p.u.)	1.0597	1.0753	1.0752	1.0701	1.0182	1.0182	1.0159	1.0186	1.0470	1.0993	1.1000	1.0873
$V_8$ (p.u.)	1.0617	1.0764	1.0763	1.0713	1.0113	1.0115	1.0115	1.0107	1.0557	1.0987	1.0961	1.0928
$V_{11}$ (p.u.)	1.0517	1.1000	1.0994	1.0659	1.0144	1.0130	1.0187	1.0241	1.0269	1.1000	1.1000	1.0829
$V_{13}$ (p.u.)	1.0823	1.1000	1.1000	1.0878	1.0294	1.0223	1.0215	1.0109	1.0770	1.0999	1.1000	1.0870
$Q_{C10}$ (MVAR)	16.0980	26.5778	29.6260	16.1827	0.2388	8.6243	16.7647	0.8483	14.1655	29.9212	2.0593	6.4246
$Q_{C24}$ (MVAR)	16.0011	9.9562	9.9257	15.6365	16.2286	14.4379	11.6906	20.3378	20.1934	1.5545	14.1153	29.8961
$T_{6-9}$	0.9965	1.0845	1.0188	1.0040	1.0201	1.0272	1.0364	1.0331	1.0244	1.0319	0.9940	0.9532
$T_{6-10}$	0.9920	0.9000	0.9834	0.9964	0.9000	0.9042	0.9236	0.9000	0.9927	0.9622	0.9226	1.1000
$T_{4-12}$	0.9888	0.9553	0.9550	1.0022	0.9640	0.9593	0.9650	0.9424	1.0393	0.9729	0.9732	0.9956
$T_{27-28}$	0.9768	0.9628	0.9630	0.9836	0.9488	0.9752	0.9742	0.9765	0.9583	0.9840	0.9834	0.9850
TCSC <sub>4-12</sub>	-0.2809	0.2000	0.2000	-0.1978	0.2000	0.1968	-0.0753	-0.0073	0.1233	-0.4550	-0.4550	-0.6549
TCSC <sub>27-28</sub>	-0.3475	-0.2172	-0.2147	-0.2581	0.1813	-0.7000	-0.6931	-0.6999	-0.5796	-0.7000	-0.7000	-0.7000
TCPS <sub>2-5</sub>	-0.0218	-0.0193	-0.0192	-0.0173	-0.0705	-0.0732	0.0727	-0.0741	0.0611	-0.0714	-0.0296	-0.0750
VD	1.3532	2.0035	2.0154	1.4801	0.1279	<b>0.1227</b>	0.1229	0.1264	1.2319	2.0721	2.0574	1.9045
L-indeks	0.1142	0.1151	0.1154	0.1184	0.1560	0.1060	0.1051	0.1052	0.0983	<b>0.0863</b>	0.0865	0.0871
$P_{\text{kayıp}}$ (MW)	4.7468	<b>4.5521</b>	4.5524	4.6506	5.8946	6.0076	6.4716	6.0256	5.6614	5.0838	4.8615	5.3946



Şekil 9. Optimizasyon algoritmalarının yakınsama eğrileri (TCSC ve TCPS'li sistem)



**Şekil 10.** Test sisteminin gerilim profili (TCSC ve TCPS'li sistem)

## V. SONUÇ

Bu çalışmada, modern güç sistemlerinin en önemli optimizasyon problemlerinden biri olan optimal reaktif güç planlaması problemi, araştırmacılar tarafından literatüre sunulan VS, PSOGSA, FA ve GSA algoritmaları ile çözülmüştür. Problemin temelinde, optimizasyon algoritmaları tarafından bulunacak kontrol değişkenlerinin belirlenmesi üç farklı amaç fonksiyonu için çalışılmıştır. Bu amaç fonksiyonları sistemin aktif güç kaybı, gerilim profili ve sistemin kararlılık indeksi olarak tanımlanmaktadır. Bu amaç fonksiyonlarındaki, kontrol değişkenlerinin en uygun değerleri önerilen optimizasyon algoritmaları tarafından bulunmuş olup, optimizasyon algoritmalarının bu problemi çözümedeki başarıları araştırılmıştır. Ayrıca, sistemde TCSC ve TCPS kullanılarak sistemin aktif güç kayıplarının azaltılması, gerilim profilinin ve kararlılığının iyileştirilmesi sağlanmıştır. Benzetim senaryolarından elde edilen sonuçlara göre, PSOGSA algoritmasının optimal reaktif güç planlama problemi için, kullanılan diğer optimizasyon algoritmalarına göre en uygun çözümü bulmada daha etkili ve başarılı olduğu görülmektedir.

## VI. KAYNAKLAR

- [1] K. Nuaekaw, P. Artrit, N. Pholdee, S. Bureerat, “Optimal reactive power dispatch problem using a two-archive multi-objective grey wolf optimizer,” *Expert Systems With Applications*, c. 87, ss. 79–89, 2017.
- [2] M. Basu, “Multi-objective optimal reactive power dispatch using multi-objective differential evolution,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 82, ss. 213–224, 2016.
- [3] M. Mehdinejad, B. Mohammadi-Ivatloo, R. Dadashzadeh-Bonab, K. Zare, “Solution of optimal reactive power dispatch of power systems using hybrid particle swarm optimization and imperialist competitive algorithms,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 83, ss. 104–116, 2016.
- [4] R. N. S. Mei, M. H. Sulaiman, Z. Mustaffa, H. Daniyal, “Optimal reactive power dispatch solution by loss minimization using moth-flame optimization technique,” *Applied Soft Computing*, c. 59, ss. 210–222, 2017.
- [5] A. A. Heidari, R. A. Abbaspour, A. R. Jordehi, “Gaussian bare-bones water cycle algorithm for optimal reactive power dispatch in electrical power systems,” *Applied Soft Computing*, c. 57, ss. 657–671, 2017.
- [6] M. H. Sulaiman, Z. Mustaffa, M. R. Mohamed, O. Aliman, “Using the gray wolf optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem,” *Applied Soft Computing*, c. 32, ss. 286–292, 2015.
- [7] A. Rajan, T. Malakar, “Exchange market algorithm based optimum reactive power dispatch,” *Applied Soft Computing*, c. 43, ss. 320–336, 2016.
- [8] A. H. Khazali, M. Kalantar, “Optimal reactive power dispatch based on harmony search algorithm,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 33, ss. 684–692, 2011.
- [9] K. Y. Lee, Y. M. Park, J. L. Ortiz, “A united approach to optimal real and reactive power dispatch,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. 104, s. 5, ss. 1147–1153, 1985.
- [10] N. Deeb, S. M. Shahidehpour, “Linear reactive power optimization in a large power network using the decomposition approach,” *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 5, s. 2, ss. 428–438, 1990.
- [11] S. Granville, “Optimal reactive dispatch through interior point methods,” *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 9, s. 1, ss. 136–146, 1994.
- [12] G. Chen, L. Liu, Z. Zhang, S. Huang, “Optimal reactive power dispatch by improved GSA based algorithm with the novel strategies to handle constraints,” *Applied Soft Computing*, c. 50, ss. 58–70, 2017.
- [13] B. Mandal, P. K. Roy, “Optimal reactive power dispatch using quasi-oppositional teaching

learning based optimization,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 53, ss. 123–134, 2013.

[14] R. P. Singh, V. Mukherjee, S. P. Ghoshal, “Optimal reactive power dispatch by particle swarm optimization with an aging leader and challengers,” *Applied Soft Computing*, c. 29, ss. 298–309, 2015.

[15] E. Naderi, H. Narimani, M. Fathi, M. R. Narimani, “A novel fuzzy adaptive configuration of particle swarm optimization to solve large-scale optimal reactive power dispatch,” *Applied Soft Computing*, c. 53, ss. 441–456, 2017.

[16] M. Ghasemi, S. Ghavidel, M. M. Ghanbarian, A. Habibi, “A new hybrid algorithm for optimal reactive power dispatch problem with discrete and continuous control variables,” *Applied Soft Computing*, c. 22, ss. 126–140, 2014.

[17] P. Subbaraj, P. N. Rajnarayanan, “Optimal reactive power dispatch using self-adaptive real coded genetic algorithm,” *Electric Power Systems Research*, c. 79, ss. 374–381, 2009.

[18] M. Varadarajan, K. S. Swarup, “Differential evolution approach for optimal reactive power dispatch,” *Applied Soft Computing*, c. 8, ss. 1549–1561, 2008.

[19] M. Ghasemi, M. Taghizadeh, S. Ghavidel, J. Aghaei, A. Abbasian, “Solving optimal reactive power dispatch problem using a novel teaching–learning-based optimization algorithm,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, c. 39, ss. 100–108, 2015.

[20] M. Basu, “Quasi-oppositional differential evolution for optimal reactive power dispatch,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 78, ss. 29–40, 2016.

[21] Q. H. Wu, Y. J. Cao, J. Y. Wen, “Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 20, s.8, ss. 563–569, 1998.

[22] P. K. Roy, S. P. Ghoshal, S. S. Thakur, “Optimal reactive power dispatch considering flexible AC transmission system devices using biogeography-based optimization,” *Electric Power Components and Systems*, c. 39, s.11, ss. 733–750, 2011.

[23] M. Sedighzadeh, H. Faramarzi, M. M. Mahmoodi, M. Sarvi, “Hybrid approach to FACTS devices allocation using multi-objective function with NSPSO and NSGA-II algorithms in Fuzzy framework,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 62, ss. 586–598, 2014.

[24] D. Prasad, M. Mukherjee, “Solution of optimal reactive power dispatch by symbiotic organism search algorithm incorporating FACTS devices,” *IETE Journal of Research*, c. 64, s.1, ss. 149–160, 2018.

[25] S. Dutta, P. K. Roy, D. Nandi, “Optimal location of STATCOM using chemical reaction optimization for reactive power dispatch problem,” *Ain Shams Engineering Journal*, c. 7, s. 1, ss. 233–247, 2016.

- [26] S. Dutta, S. Paul, P. K. Roy, “Optimal allocation of SVC and TCSC using quasi-oppositional chemical reaction optimization for solving multi-objective ORPD problem,” *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, c. 5, s. 1, ss. 83–98, 2018.
- [27] S. Mirjalili, S. Z. M. Hashim, “A new hybrid PSO-GSA algorithm for function optimization,” International Conference on Computer and Information Application (ICCIA 2010), Tianjin, China, 2010, ss. 374–377.
- [28] B. Doğan, T. Ölmez, “A new metaheuristic for numerical function optimization: Vortex Search algorithm,” *Information Sciences*, c. 293, ss. 125–145, 2015.
- [29] Yang X.S., “Firefly algorithms for multimodal optimization,” *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009, Lecture Notes in Computer Science*, c. 5792, ss.169–178, 2009.
- [30] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, S. Saryazdi, “GSA: A gravitational search algorithm,” *Information Sciences*, c. 179, s. 13, ss. 2232–2248, 2009.
- [31] S. Duman, U. Güvenç, Y. Sönmez, N. Yörükeren, “Optimal power flow using gravitational search algorithm,” *Energy Conversion and Management*, c. 59, ss. 86–95, 2012.
- [32] Y. Kumar, G. Sahoo, “A review on gravitational search algorithm and its applications to data clustering & classification,” *I.J. Intelligent Systems and Applications*, c. 06, ss. 79–93, 2014.
- [33] N. M. Sabri, M. Puteh, M. R. Mahmood, “An overview of gravitational search algorithm utilization in optimization problems,” 2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology, Shah Alam, Malaysia, 2013, ss. 61–66.
- [34] J. Kennedy, R. C. Eberhart, “Particle swarm optimization,” International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, Australia, 1995, ss. 1942–1948.
- [35] IEEE 30-bus test system data Access: [http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm)