

İyileştirilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritmasıyla Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Çalışması

Salih ERMİŞ^{1*}  Ramazan BAYINDIR²  Mehmet YEŞİLBUDAK³ 

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

³Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 12/04/2023
Revision: 21/07/2023
Accepted: 25/07/2023

Keywords

Power systems
Voltage stability
Power flow
Optimization

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/04/2023
Düzeltilme: 21/07/2023
Kabul: 25/07/2023

Anahtar Kelimeler

Güç sistemleri
Gerilim kararlılığı
Güç akışı
Optimizasyon

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Today, the demand for electrical energy is constantly increasing. Due to this increasing demand, instability problems occur in power systems. The instability problem has become an important problem that needs to be solved for the safe, efficient and effective operation of power systems. (Günümüzde elektrik enerjisine olan talep sürekli artmaktadır. Bu artan talepten dolayı güç sistemlerinde kararsızlık problemleri oluşmaktadır. Kararsızlık problemi, güç sistemlerinin güvenli, verimli ve etkili çalışabilmesi için çözülmesi gereken önemli bir sorun haline gelmiştir.)

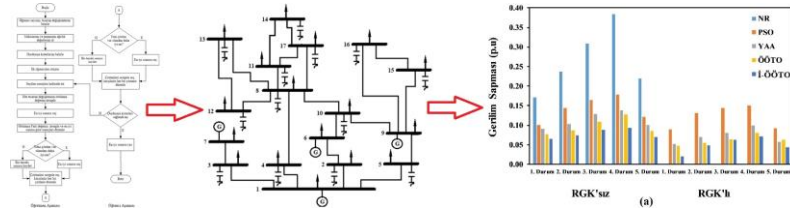


Figure A: The Block diagram of the developed algorithm, single line diagram and analysis result graphics. / **Şekil A:** Geliştirilen algoritmanın blok diyagramı, tek hat şeması ve analiz sonucu grafikleri.

Highlights (Önemli noktalar)

- I-TLBO algorithm has been proposed as a new solution method. / Yeni bir çözüm metodu olarak İ-ÖÖTO algoritması önerilmiştir.
- TLBO and I-TLBO algorithms have been tested on IEEE 14 bus power systems and 17 bus power systems created in Istanbul, Turkey. / ÖÖTO ve İ-ÖÖTO algoritmaları IEEE 14 baralı ve Türkiye, İstanbul bölgesinde oluşturulan 17 baralı güç sistemleri üzerinde test edilmiştir.
- The I-TLBO algorithm offers a better solution for voltage instability problems in power systems. / İ-ÖÖTO algoritması güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı problemlerinde daha iyi bir çözüm sunar.

Aim (Amaç): In order to minimize voltage instability in power systems, optimal power flow (OGA) has been realized with the I-TLBO algorithm. / Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığını minimuma indirmek için İ-ÖÖTO algoritmasıyla optimal güç akışı (OGA) gerçekleştirilmiştir.

Originality (Özgünlük): With this study, the voltage instability problem has been minimized by developing the original TLBO algorithm with I-TLBO algorithm. / Bu çalışma ile orjinal ÖÖTO algoritması geliştirilerek İ-ÖÖTO algoritmasıyla gerilim kararsızlığı problemi minimuma indirilmiştir.

Results (Bulgular): As a result of the analyzes made, the I-TLBO algorithm, which was developed, gave better results in solving the voltage instability problem compared to other algorithms used in the literature. / Yapılan analizler sonucunda geliştirilen İ-ÖÖTO algoritması literatürde kullanılan diğer algoritmalara göre gerilim kararsızlığı problemi çözümünde daha iyi sonuçlar vermiştir.

Conclusion (Sonuç): With the developed I-TLBO algorithm, it has presented a new and effective solution to the literature in solving the voltage instability problem in power systems. / Geliştirilen İ-ÖÖTO algoritması ile güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı probleminin çözümünde literature yeni ve etkili bir çözüm sunmuştur.



İyileştirilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritmasıyla Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Çalışması

Salih ERMİŞ^{1*} Ramazan BAYINDIR² Mehmet YEŞİLBUDAK³

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

³Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/04/2023
Düzeltilme: 21/07/2023
Kabul: 25/07/2023

Anahtar Kelimeler

Güç sistemleri
Gerilim kararlılığı
Güç akışı
Optimizasyon

Öz

Bu çalışmada, son yıllarda kullanılan öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması (ÖÖTO) üzerinde iyileştirmeler yapılmış ve güç sistemlerinde gerilim kararlılığı için yeni bir optimizasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. İyileştirilen öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (İ-ÖÖTO) algoritması, IEEE 14 baralı güç sistemi ve Türkiye, İstanbul Anadolu yakasında 17 baralı gerçek bir güç sistemi kullanılarak test edilmiştir. Bu güç sistemlerinde, beş farklı durum (temel durum, temel durumda talep edilen yükün %20, %40 ve %60 artışı ve hat kesintisi) oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Sonrasında, yük baralarına şönt reaktif güç kompanseörleri (RGK) bağlanarak gerilim kararlılığı açısından etkisi incelenmiştir. İ-ÖÖTO algoritmasının etkinliğini değerlendirmek amacıyla, elde edilen sonuçlar, orijinal ÖÖTO algoritması ve literatürde sıklıkla kullanılan yerçekimi arama algoritması (YAA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve Newton-Raphson güç akışı yönetimleriyle karşılaştırılmıştır. İ-ÖÖTO algoritması, tüm çalışma koşullarında diğer yöntemlere göre üstünlük sağlamıştır.

Voltage Stability Study In Power Systems With Improved Teaching-Learning Based Optimization Algorithm

Article Info

Research article
Received: 12/04/2023
Revision: 21/07/2023
Accepted: 25/07/2023

Keywords

Power systems
Voltage stability
Power flow
Optimization

Abstract

In this study, improvements have been made on the teaching-learning-based optimization (TLBO) algorithm, which has been used in recent years, and a new optimization application has been carried out for the voltage stability in power systems. The improved teaching-learning based optimization (I-TLBO) algorithm has been tested using an IEEE 14 bus power system and a real 17 bus power system on the Anatolian side of Istanbul, Turkey. In these power systems, five different conditions (base case, 20%, 40% and 60% increase of the demanded load in the base case and line outage) were created and analyzed. Afterwards, shunt reactive power compensators (RGK) are connected to the load buses and their effect in terms of voltage stability is examined. In order to evaluate the effectiveness of the I-TLBO algorithm, the obtained results were compared with the original TLBO algorithm and the gravity search algorithm (GSA), particle swarm optimization (PSO) and Newton-Raphson power flow methods, which are frequently used in the literature. The I-TLBO algorithm outperformed other methods in all operating conditions.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç sistemleri, elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımını içine alan çok geniş yapılardır. Teknolojideki gelişmeler, endüstriyel talep ve nüfus artışı gibi nedenlerden dolayı elektrik enerjisine talep gün ve gün artmaktadır. Güç sistemlerindeki bu genişleme ve talep artışı, sistemler üzerinde

kararsızlık durumlarına neden olmaktadır. Kararsızlık problemi, güç sistemlerinin güvenli, verimli ve etkili çalışabilmesi için bir önceki yüzyılım başlarından itibaren çözülmesi gereken önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu problemlerin en başında da gerilim kararsızlığı gelmektedir [1-4].

Gerilim kararsızlığı, güç sistemlerinde elektrik kesintilerine neden olmakta ve buna bağlı olarak büyük yük kayıplarına yol açmaktadır [5]. Her geçen gün genişleyen güç sistemlerindeki yük talepleri, sistemlerin etkin ve verimli çalışmasında büyük sorunlar oluşturmaktadır.

Güç sistemlerinin etkili, verimli ve güvenilir olmasının en önemli unsuru; sistemdeki kararsızlık probleminin olmamasına bağlıdır. Kararsızlık probleminin ortadan kaldırılması, güç sistemlerinde birçok sorunu ortadan kaldıracaktır [6]. Bu nedenle, kararsızlık nedenlerinin ve çözümlerinin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Güç sistemlerinde kararsızlığın sınıflandırılması, problem çözümleri için daha hızlı sonuçlar verebilir. Kararsızlık türünün belirlenmesi ve uygun analitik çözümlerin geliştirilmesi kararsızlık problemini ortadan kaldırmaya veya minimize etmeye yardımcı olur. Bu bağlamda, kararsızlık problemi güç sistemlerinde üç ana başlık altında ifade edilmektedir [4]. Bunlar; rotor açısı kararlılığı, frekans kararlılığı ve gerilim kararlılığı olarak tanımlanır.

Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı, elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımının her kademesinde verimli, kaliteli ve sürekliliğin sağlanabilmesi için çözülmesi gereken bir problemdir. Bu sorunu çözmek için kararsızlığa neden olan olguların tespit, analiz ve çözümlemesi en iyi bir şekilde yapılmalıdır.

Literatürde gerilim kararlılığı ile ilgili pek çok tanım mevcuttur. Örneğin; güç sistemlerinde gerilim kararlılığı, sistemde oluşan bozucu bir etki sonrasında nominal çalışma koşullarını sağlaması olarak tanımlanabilir. Gerilim kararlılığı problemi, yükün, üretim talebini sağlayıp sağlayamamasına bağlı olarak ortaya çıkan bir durumdur. Gerilim kararlılığı, en anlaşılabilir tanımıyla, bara gerilimlerini belirlenen sınırlar içinde tutabilme yeteneği olarak ifade edilebilir. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı, aktif ve reaktif güç dengesini, yük ile üretime bağlı olarak sağlayabilme kabiliyetine dayanır. Aktif ve reaktif güç arasındaki dengesizlik, bara gerilimlerinde artışlara veya düşüslere neden olabilir. Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı; sistem üzerinde elektrik kesintilerinden, yük kaybı ve hat açılmasına, koruyucu ekipmanların devre dışı kalmasından, generatör senkronizasyon kaybına kadar birtakım sonuçlara neden olabilir [7].

Araştırmacılar tarafından güç sistemlerinde gerilim kararlılığı konusunda çok sayıda çalışma

önerilmiştir. *Onksakul ve Jirapong* evrimsel algoritmayla FACTS cihaz lokasyonu, yük baralarında aktif güç ve bara gerilimleri optimizasyonunu sunmuşlardır [8]. *Ravi ve Duraiswamy*, güç sistemi kararlılığı için genetik algoritma ve yapay arı kolonisi algoritması ile yeni bir çözüm önermişlerdir [9]. *Deepa ve Rizwana*, modifiye parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanarak güç sistemlerinde aktif ve reaktif güç kayıplarını azaltma çözümü önermişlerdir [10]. *Akachukwu ve ark.*, genetik algoritma kullanarak güç sistem optimizasyonu için bir çalışma yapmışlardır [11]. *Chen ve ark.*, çok amaçlı gelişmiş parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanarak aktif güç kaybı ve gerilim sapması değerini en aza indirme çalışması gerçekleştirmişlerdir [12]. *Singh ve Srivastava*, optimal reaktif güç kontrolü için hibrit bir PSO algoritması önermişlerdir [13]. *Amrane ve ark.*, iki evrimsel arama algoritması ile hibrit yöntem geliştirerek gerilim kararlılığını ve iletim güç kayıplarının kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [14]. *Li ve ark.*, diferansiyel evrim algoritmasını kullanarak güç sistemlerinde toplam yakıt maliyeti, emisyon, toplam aktif güç kaybı, gerilim kararlılığı vb. değerleri incelemişlerdir [15].

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı, enerjinin üretimden son kullanıcıya kadar kaliteli, sürekli ve güvenli bir şekilde verilebilmesi için çalışılması gereken en etkili alanlardan biridir [14]. Bu çalışmada, güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı problemini çözmek ve optimizasyonunu gerçekleştirmek için çeşitli yöntemler, metasezgisel algoritmalar ve uygulamalar ele alınmıştır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)'tan elde edilen veriler kapsamında Türkiye, İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı gerçek bir güç sistemi [16] tasarlanmıştır. Gerilim kararlılığı optimizasyonu için tasarlanan bu 17 baralı güç sistemi ve standart IEEE 14 baralı güç sistemi, literatürdeki PSO, YAA ve orijinal ÖÖTO algoritmaları ile bu çalışmada üzerinde düzenlemeler yapılmış İ-ÖÖTO algoritması aracılığıyla analiz edilmiştir. İ-ÖÖTO algoritmasının, gerilim kararlılığı optimizasyonu bakımından literatürde kullanılan diğer yöntemlerden daha etkin olduğu gösterilmiştir.

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde ele alınmaktadır: İkinci bölümde, problemin formülasyonu ve problemin açıklanması sunulmuştur. Üçüncü bölümde, gerilim kararlılığı optimizasyon algoritmaları, orijinal ÖÖTO'nun formülasyonu ve önerilen strateji açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde, simülasyon sonuçları ve karşılaştırmaları ele alınmaktadır. Son olarak, makaleye dair sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Problem Formülasyonu (Problem Formulation)

Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı problem çözümlerindeki temel amaç; optimal güç akışı (OGA) yöntemiyle güç sistemi kontrol parametrelerini en iyi şekilde belirleyerek bazı eşitsizlik ve eşitlik kısıtlamalarına maruz kalan belirli hedefleri azaltmaktır [17, 18]. OGA probleminin genel matematiksel formu şu şekilde elde edilebilir:

$$\min F(x, u) \quad (1)$$

$$g(x, u) = 0 \quad (2)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (3)$$

$$u \in U \quad (4)$$

Burada, F amaç fonksiyonu, x bağımlı değişken vektörü ve u kontrol değişkeni vektörüdür.

x , bağımlı değişkeni Eş. 5'e göre ifade edilebilir.

$$x^T = [P_{G1}, V_{L1} \dots V_{LNL}, Q_{G1} \dots Q_{GNG}, S_{11} \dots S_{INTL}] \quad (5)$$

Burada, NL yük baraları numarası, NG generatörlerin numarası, NTL iletim hat numarası, P_{G1} salınım barası aktif güç çıkışı, V_L yük barası gerilimleri, Q_G generatör reaktif güç çıkışı ve S_l iletim hattı yükleri olarak ifade edilmektedir.

u , kontrol değişkeni Eş. 6'ya göre ifade edilebilir.

$$u^T = [P_{G2} \dots P_{GNG}, V_{G1} \dots V_{GNG}, Q_{C1} \dots Q_{CNC}, T_1 \dots T_{NT}] \quad (6)$$

Burada, NT transformatör numarası, NC şönt reaktif güç kompensatör numarası, V_G generatör barası gerilimleri, P_G salınım barası (P_{G1}) dışındaki generatör güç çıkış değerleri, Q_c şönt reaktif güç kompensatör değerleri ve T transformatör kademe ayarları olarak ifade edilmektedir.

Eşitlik kısıtlamaları

Güç sistemlerinde, aktif ve reaktif güçlerin üretim, tüketim ve kayıp güç toplamı 0 (sıfır) olmak zorundadır ve bu zorunluluk aşağıda Eş. 7 ve Eş. 8 şeklinde ifade edilmiştir.

$$P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0, \quad i \in N \quad (7)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0, \quad i \in N_L \quad (8)$$

Burada, N_i , bara hat sayısı, N_L yük bara sayısı, P_{Gi} i . generatör aktif gücü, Q_{Gi} i . generatör reaktif gücü P_{Li} i . yük bara aktif gücü, Q_{Li} i . yük bara reaktif gücü, G_{ij} Y-bara matrisi reel değeri ve B_{ij} Y-bara matrisi imajiner değerini ifade eder.

Eşitsizlik kısıtlamaları

Eşitsizlik kısıtlamaları, güç sistemlerindeki generatör, transformatör ve güvenlik sınırlamaları olarak isimlendirilir.

Generatör kısıtlamaları, gerilim, aktif ve reaktif güç sınırlarından oluşmaktadır.

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}, \quad 1 \leq i \leq N_G \quad (9)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, \quad 1 \leq i \leq N_G \quad (10)$$

Transformatör kademe sınırları Eş. 11'de verilmiştir.

$$T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max}, \quad 1 \leq i \leq N_T \quad (11)$$

Yük bara gerilim genlikleri Eş. 12 ile tanımlanmıştır.

$$V_{Li}^{min} \leq V_{Li} \leq V_{Li}^{max}, \quad 1 \leq i \leq N_L \quad (12)$$

2.2. Problemin Açıklanması (Description of the Problem)

Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı problemini çözmek için iki hedef tanımlanmıştır. Birincisi, aktif güç kayıplarının minimizasyonu, ikincisi ise, gerilim sapma değerinin minimizasyonu olarak belirlenmiştir.

Aktif güç kayıplarının minimizasyonu ($P_{Kayıp}$) verilmiştir.

Aktif güç kayıplarının minimizasyonu Eş. 13'de ifade edilmiştir.

$$\min f_1 = \min P_{Kayıp} = \sum_{k \in N_L} g_k (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{ij}), \quad k \in N_L \quad (13)$$

Burada $P_{Kayıp}$, toplam aktif güç kaybı, g_k k . hat iletkenliği, δ_{ij} bara gerilim açısı farkı ve V_i ve V_j sırasıyla i . ve j . bara gerilim değerlerini tanımlar.

Gerilim sapmasının minimizasyonu (V_d)

Yük baralarındaki toplam gerilim sapması Eş. 14'de belirtilmiştir.

$$\min f_2 = \min V_d = \sum_{y=1}^{N_y} |V_y - 1| \quad (14)$$

Burada, V_d toplam gerilim sapması, V_y y . yük bara gerilimini ifade eder.

2.3. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon

Algoritması (ÖÖTO) (Teaching-Learning Based Optimization Algorithm (ÖÖTO))

ÖÖTO algoritması, son zamanlarda *Rao ve ark.* tarafından önerilen çok ilginç bir popülasyona dayalı optimizasyon yaklaşımıdır [19, 20]. Önerilen algoritma öğretme-öğrenme sürecine dayanmaktadır. Önerilen algoritmada, her bir aday çözüm, farklı konulardaki notlardan oluşan, bir öğrencinin sonuçlarını temsil eden bir dizi değişkenle karakterize edilir. Öğrenciler, öğretmenlerden bilgi alarak sonuçlarını iyileştirmeye çalışırlar ve bu süreç, ÖÖTO algoritmasında öğretmen aşaması olarak adlandırılır. Aynı zamanda diğer öğrencilerle karşılıklı etkileşim kurarak performanslarını da geliştirirler. Bu öğrenci aşaması olarak adlandırılır. ÖÖTO algoritmasının bu iki temel işleminin kısa bir açıklaması aşağıda yapılmıştır.

X_i^g , g . nesildeki i . parametre Eş. 15'de verilmiştir.

$$X_i^g = [x_{i,1}^g, x_{i,2}^g, x_{i,3}^g, \dots, x_{i,j}^g, \dots, x_{i,D}^g] \quad (15)$$

Başlangıçta, arama alanı içinde rastgele oluşturulmuş N satır ve D sütundan oluşan bir matrisi ifade eder. Burada, N sınıf kapasitesini ve D ders sayısını gösterir. $X_{i,j}$ değeri Eş. 16'da

$$X_{i,j} = X_j^{min} + ri(X_j^{max} - X_j^{min}) \quad (16)$$

Burada, ri (0,1) aralığında rastgele değişkeni temsil eder.

Öğretmen Aşaması

M^g , her konu için sınıftaki öğrencilerin ortalamasını içeren ortalama parametre Eş. 17'de verilmiştir.

$$M^g = [M_1^g, M_2^g, M_3^g, \dots, M_j^g, \dots, M_D^g] \quad (17)$$

$X_{\text{öğretmen}}^g$, sınıftaki minimum amaç fonksiyonuna sahip en iyi bilen öğrenci, o iterasyon için öğretmen olarak atanır. Bu aşamada algoritma, öğrencilerin ortalamasını öğretmene doğru yönlendirerek iletir. Mevcut ortalama ve istenen ortalama vektörlerden rastgele ağırlıklandırılmış bir diferansiyel vektör oluşturulur ve yeni bir geliştirilmiş öğrenci seti elde etmek için mevcut öğrenen popülasyonuna eklenir [20].

$$X_{\text{yeni},l}^g = X_i^g + ri(X_{\text{öğretmen}}^g - T_F M^g) \quad (18)$$

T_F , her yinelemede 1 veya 2 olmak üzere rastgele alınan bir öğretim faktörüdür. T_F , Eş. 19'da tanımlanmıştır.

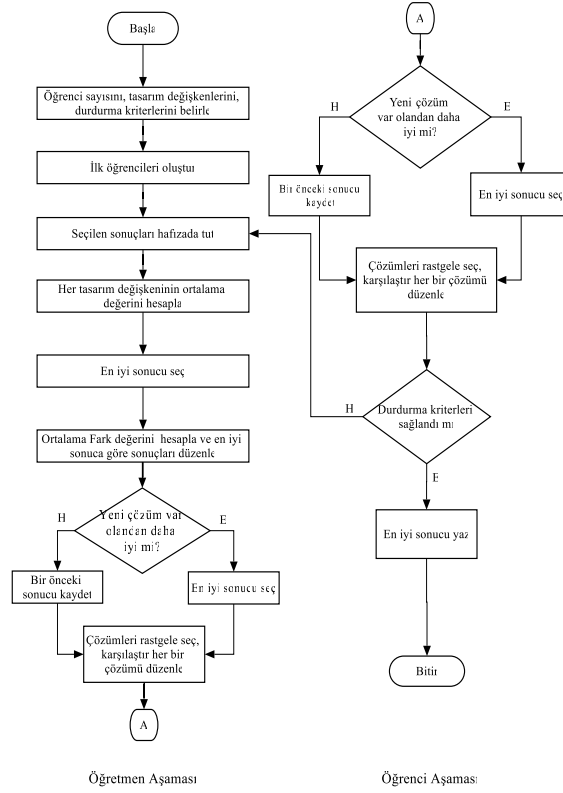
$$T_F = \text{round}[1 + ri(0,1)\{1,2\}] \quad (19)$$

Öğrenci Aşaması

Bu aşama, öğrencilerin birbirleriyle etkileşiminden oluşur. Karşılıklı etkileşim süreci öğrencinin bilgisini artırma eğilimindedir. Her öğrenci, diğer öğrencilerle rastgele etkileşime girer ve bu nedenle bilgi paylaşımını kolaylaştırır [20]. Eş. 20'de öğrenci aşamasındaki $X_{\text{yeni},i}^g$ matrisinin i . parametere değeri verilmiştir.

$$X_{\text{yeni},i}^g = \begin{cases} X_i^g + ri(X_i^g - X_r^g) \\ \text{eğer } f(X_i^g) < f(X_r^g) \\ X_i^g + ri(X_r^g - X_i^g) \end{cases} \quad (20)$$

Burada, belirli bir öğrenci X_i^g için diğer bir öğrenen X_r^g rastlantısal seçilir ($i \neq r$). ÖÖTO algoritmasının akış diyagramı Şekil 1'deki gibidir.



Şekil 1. ÖÖTO algoritmasının akış şeması. (Flow chart of the TLBO algorithm.)

2.4. İyileştirilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (İ-ÖÖTO)

(Improved teaching-learning based optimization (I-TLBO) algorithm)

Bu çalışmada, ÖÖTO'daki Eş. 18 ve Eş. 20'e "ağırlık faktörü" olarak belirlenen w parametresi eklenmiştir. Klasik ÖÖTO'da bir önceki öğrenci değerine göre yeni öğrenci değeri alınırken, düzenlenen İ-ÖÖTO algoritmasında önceki değerin ağırlık vektörü tarafından karar verilen bir değeri alınır.

ÖÖTO algoritmasıyla, bireylerin, iterasyonun ilk safhasında arama alanındaki belirli bölgelerin çözümlenmesi gerekmektedir. Daha sonraki aşamalarda optimizasyon sonuçlarının çok iyi bir biçimde belirlenmesi gerekmektedir. Böylece, hedeflenen optimumluğun bulunduğu dar bir bölgenin içinde çözümlenmeyi tamamlar. Bu hedefe ulaşmak için daha önceden tespit edilmiş w (ağırlık faktörü) değeri, maksimum değerden minimum değere lineer olarak azaltılır.

$$w = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{MAXIT} \right) \times i \quad (21)$$

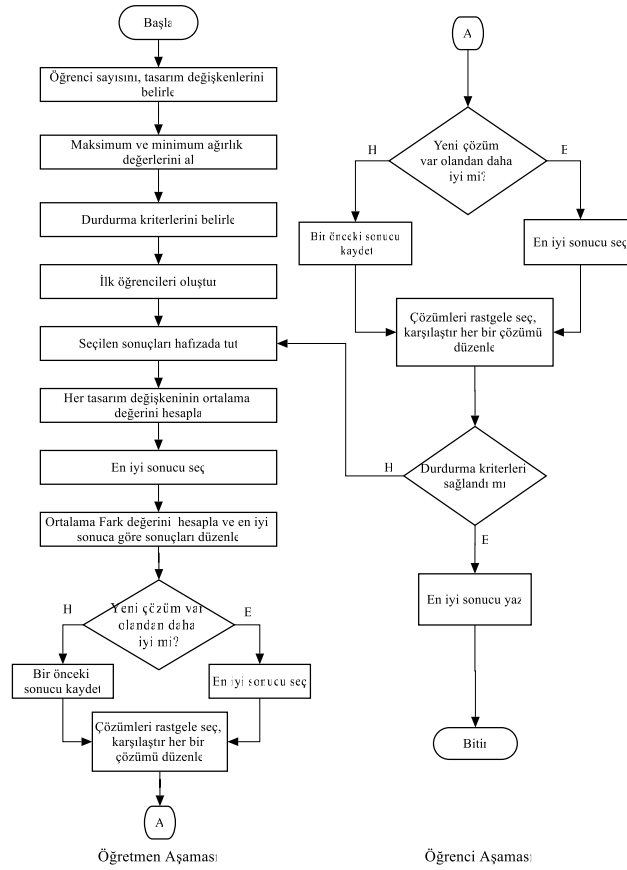
Burada, w_{max} ve w_{min} ağırlık faktörünün en yüksek ve en düşük değerleridir. i iterasyon değeridir, ağırlık faktörünün maksimum ve minimum değerleri 0 ile 1 aralığında değerler alırlar. Ağırlık faktörü değerleri, $w_{max} > w_{min}$

koşulunu sağlamak zorundadır. Ağırlık faktörü değeri, Eş. 18 ve Eş. 20'deki denklemlere eklendiğinde Eş. 22 öğretmen aşamasında, Eş. 23 öğrenci aşamasında aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$X_{yeni,l}^g = w \times X_i^g + ri(X_{\text{öğretmen}}^g - T_F M^g) \quad (22)$$

$$X_{yeni,i}^g = \begin{cases} w \times X_i^g + ri(X_i^g - X_r^g) \\ \text{eğer } f(X_i^g) < f(X_r^g) \\ w \times X_i^g + ri(X_r^g - X_i^g) \end{cases} \quad (23)$$

Orjinal ÖÖTO algoritması, öğretmen ve öğrencileri rastgele belirlemektedir. İterasyon arttıkça çözüm değerlerine göre ağırlık katsayılarıyla öğretmen ve öğrenci değerleri değişiklik arz etmektedir. Düzenlenen İ-ÖÖTO algoritmasında bu değerleri önceden tespit ederek ÖÖTO algoritmasına göre optimum sonuçlara, daha az iterasyonla ve en iyi çözümlere ulaşması için yeni bir yöntemle gerçekleştirilmiştir. Öğrenci sayısının az ya da çok olması ÖÖTO algoritmasında çalışma zamanını da olumsuz etkilemektedir. Öğrenci sayısı azaldıkça iterasyon süresi artmakta, öğrenci sayısı arttıkça iterasyon süresi azalmaktadır. Bu durumda da bazı çözümlerde hedeflenen en iyi sonuçlar elde edilememektedir. Bu çalışmada, yapılan analizler sonucunda öğrenci sayısı 25 olarak belirlenmiştir. İ-ÖÖTO algoritmasının akış diyagramı Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. İ-ÖÖTO algoritmasının akış diyagramı (Flow diagram of I-TLBO algorithm)

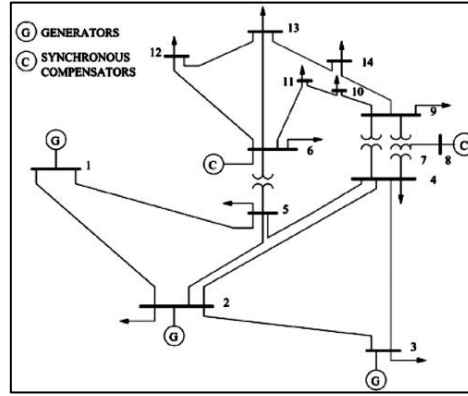
3. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Bu çalışmada, algoritma çözümlerine referans almak amacıyla IEEE 14 baralı ve Türkiye, İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı güç sistemleri kullanılarak klasik Newton-Raphson (NR) yöntemiyle OGA çözümleri gerçekleştirilmiştir. Yeşilbudak ve ark. [21], klasik metotlar içerisinde Newton-Raphson yönteminin OGA çözümlerinde en iyi sonuçları sağladığını belirtmişlerdir. Ek olarak, PSO, YAA ve ÖÖTO algoritmaları da kullanılarak OGA çözümleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, güç sistemlerindeki bara gerilimleri, generatör üretim güçleri ve hatların aktif güç kayıpları bulunmuştur. Son olarak, tasarlanan İ-ÖÖTO algoritması belirlenen güç sistemleri için kullanılarak OGA çözümleri gerçekleştirilmiştir. NR yöntemi ve diğer algoritma sonuçları karşılaştırılmış, optimum sonuçlar, tasarlanan İ-ÖÖTO algoritmasıyla elde edilmiştir. Tüm analizler, Intel Core(TM) i7-2620 2.7GHz ve 8.00 (64 bit) Gb Ram özelliklerine sahip PC kullanılarak Matlab R2017b programında çözümlenmiştir. Her

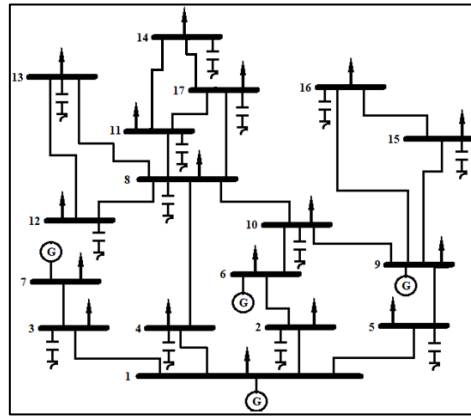
algoritma 100 iterasyon ve 30'ar kez çalıştırılmıştır. Bu çalışmada amaç; gerilim kararlılığını, aktif güç kaybını ve yük bara gerilim sapmasını minimize ederek sağlayabilmektir. Bu amaca, generatör üretim değerleri optimize edilerek ulaşılmıştır. Sunulan algoritmalar güç sistemleri üzerinde aşağıda belirtilen çeşitli senaryolar oluşturularak çalıştırılmıştır.

- Durum 1: Temel Durum
- Durum 2: Bara yük değerinde %20 artış
- Durum 3: Bara yük değerinde %40 artış
- Durum 4: Bara yük değerinde %60 artış
- Durum 5: 1-5 nolu hat devre dışı kalırsa

Yapılan analizlerde, güç sistemlerinde gerilim kararlılığını sağlamak için iki farklı yöntem izlenmiştir. İlk yöntem, güç sisteminde talep edilen reaktif gücün generatörler tarafından karşılanması (RGK'sız durum) ve ikinci yöntem, generatör reaktif gücüyle birlikte yük baralarına şönt reaktif güç kompensatörleri bağlanarak (RGK'lı durum) reaktif güç desteği sağlanmasıdır.



Şekil 3. IEEE 14 baralı güç sisteminin tek hat şeması [22] (Single line diagram of IEEE 14 bus power system)



Şekil 4. İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı güç sisteminin tek hat şeması [16] (Single line diagram of 17 bus power system of Istanbul-Anatolian side)

3.1 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of Simulation Results)

IEEE 14 ve İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı güç sistemleri için tüm senaryo durumlarında RGK bağlanmadan ve RGK bağlandıktan sonra algoritmaların gerilim sapması değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Burada amaç, gerilim sapması değerini 0 (Sıfır) en yakın değer elde ederek bara gerilim değerlerini nominal değerde tutmaktır. Gerilim

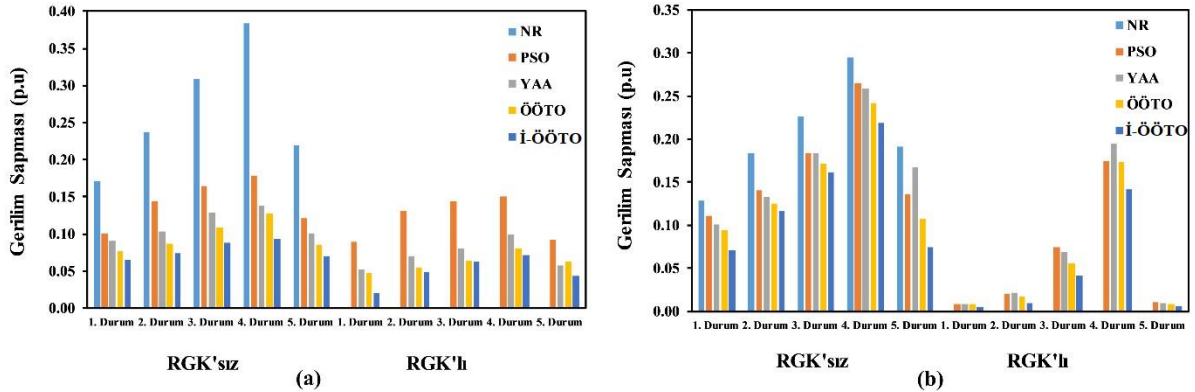
sapması değeri, RGK'lı durumda, RGK'sız durumu göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. RGK'sız durumda, generatörler tarafından üretilen reaktif güç, yük tarafından talep edilen reaktif gücü karşılayamamıştır. RGK'lı durumda paralel bağlanan kompensatörler generatörlere ek olarak reaktif güç desteği vererek yük baralarındaki gerilim değerini nominal değerlerde tutmayı sağlamıştır.

Tablo 1. Çalışma durumlarına göre algoritmaların gerilim sapması değerleri. (Voltage deviation values of algorithms according to operating conditions.)

| | | IEEE 14 Bara | | | | | İstanbul-Anadolu Yakası 17 Bara | | | | |
|----------|----------|--------------|-------|-------|-------|--------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| | | NR | PSO | YAA | ÖÖTO | İ-ÖÖTO | NR | PSO | YAA | ÖÖTO | İ-ÖÖTO |
| RGK' sız | 1. Durum | 0,171 | 0,101 | 0,091 | 0,076 | 0,065 | 0,128 | 0,111 | 0,101 | 0,094 | 0,071 |
| | 2. Durum | 0,237 | 0,144 | 0,103 | 0,087 | 0,074 | 0,183 | 0,140 | 0,133 | 0,125 | 0,116 |
| | 3. Durum | 0,308 | 0,164 | 0,129 | 0,109 | 0,088 | 0,227 | 0,183 | 0,183 | 0,171 | 0,161 |
| | 4. Durum | 0,384 | 0,178 | 0,138 | 0,128 | 0,093 | 0,295 | 0,265 | 0,258 | 0,242 | 0,219 |
| | 5. Durum | 0,220 | 0,121 | 0,101 | 0,085 | 0,070 | 0,191 | 0,136 | 0,167 | 0,107 | 0,075 |
| RGK' lı | 1. Durum | | 0,090 | 0,053 | 0,047 | 0,020 | | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,005 |
| | 2. Durum | | 0,132 | 0,070 | 0,055 | 0,049 | | 0,021 | 0,022 | 0,017 | 0,010 |
| | 3. Durum | | 0,144 | 0,081 | 0,064 | 0,062 | | 0,074 | 0,069 | 0,056 | 0,041 |
| | 4. Durum | | 0,151 | 0,100 | 0,081 | 0,071 | | 0,175 | 0,194 | 0,174 | 0,142 |
| | 5. Durum | | 0,092 | 0,058 | 0,062 | 0,044 | | 0,011 | 0,009 | 0,008 | 0,006 |

Şekil 5-a-b’de görüleceği üzere tüm senaryo durumları analizlerinde toplam gerilim sapması sıfıra en yakın algoritma İ-ÖÖTO algoritmasıyla gerçekleşmiştir. NR, PSO, YAA ve ÖÖTO

algoritmaları, gerilim sapması değerleri açısından, tasarlanan İ-ÖÖTO’ya göre daha yüksek değerler vermiştir.



Şekil 5. Tüm durumlar için algoritmaların toplam gerilim sapması değerlerinin karşılaştırılması. a- IEEE 14 baralı, b- İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı. (Comparison of the total voltage deviation values of the algorithms for all cases. a- IEEE 14 bus, b- Istanbul-Anatolian side 17 bus).

Yapılan analizlerin temel durum sonuçlarına göre, toplam gerilim sapması, IEEE 14 baralı sistemde, RGK'sız durumda, İ-ÖÖTO algoritması NR'ye göre %61,98, PSO'ya göre %35,64, YAA'ya göre %28,57, ÖÖTO'ya göre %14,47 oranında az, RGK'lı durumda, İ-ÖÖTO algoritması PSO'ya göre %77,77, YAA'ya göre %62,26, ÖÖTO'ya göre %57,44 oranında az olduğu görülmüştür. Türkiye, İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı sistemde, İ-ÖÖTO algoritması RGK'sız durumda NR'ye göre %44,5, PSO'ya göre %36,03, YAA'ya göre %29,7,

ÖÖTO'ya göre %24,46 oranında az, RGK'lı durumda PSO, YAA ve ÖÖTO'ya göre %37,5 oranında az değer göstermiştir. Tüm sonuçlara göre İ-ÖÖTO algoritmasının, klasik yöntem ve diğer optimizasyon algoritmalarına göre optimum sonucu verdiği görülmektedir.

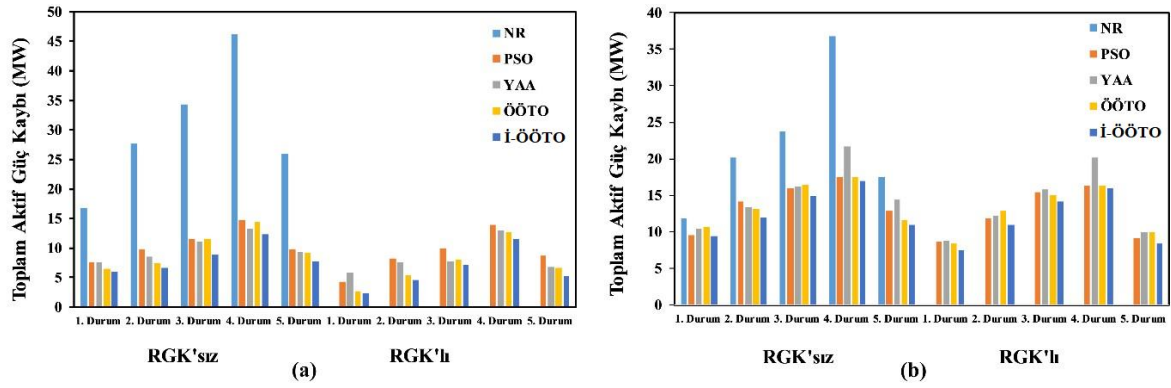
Yük artışı ve hat kesinti durumlarında gerilim sapması değerinin arttığı görülmektedir. Hat kesintisi oluştuğunda gerilim sapması değeri sıfırdan uzaklaşmaktadır.

Tablo 2. Çalışma durumlarına göre algoritmaların toplam aktif güç kayıp değerleri (Total active power loss values of algorithms according to operating conditions)

| | | IEEE 14 Bara | | | | | İstanbul-Anadolu yakası 17 Bara | | | | |
|----------|----------|--------------|--------|--------|--------|--------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| | | NR | PSO | YAA | ÖÖTO | İ-ÖÖTO | NR | PSO | YAA | ÖÖTO | İ-ÖÖTO |
| RGK' sız | 1. Durum | 16,738 | 7,507 | 7,650 | 6,434 | 5,997 | 11,81 | 9,548 | 10,43 | 10,72 | 9,404 |
| | 2. Durum | 27,729 | 9,755 | 8,495 | 7,443 | 6,684 | 20,09 | 14,11 | 13,34 | 13,18 | 11,94 |
| | 3. Durum | 34,357 | 11,510 | 11,051 | 11,500 | 8,882 | 23,76 | 15,88 | 16,25 | 16,43 | 14,93 |
| | 4. Durum | 46,119 | 14,762 | 13,338 | 14,429 | 12,327 | 36,71 | 17,51 | 21,72 | 17,51 | 16,91 |
| | 5. Durum | 25,954 | 9,823 | 9,379 | 9,109 | 7,725 | 17,44 | 12,92 | 14,4 | 11,62 | 10,97 |
| RGK' ılı | 1. Durum | | 4,286 | 5,787 | 2,730 | 2,295 | | 8,605 | 8,729 | 8,345 | 7,484 |
| | 2. Durum | | 8,203 | 7,577 | 5,356 | 4,609 | | 11,87 | 12,19 | 12,9 | 10,94 |
| | 3. Durum | | 9,900 | 7,747 | 8,038 | 7,150 | | 15,4 | 15,81 | 14,99 | 14,11 |
| | 4. Durum | | 13,884 | 12,890 | 12,603 | 11,577 | | 16,27 | 20,19 | 16,28 | 15,91 |
| | 5. Durum | | 8,745 | 6,847 | 6,634 | 5,198 | | 9,151 | 9,98 | 9,865 | 8,423 |

Toplam aktif güç kayıpları sonuçları Tablo 2’de ve grafik değerleri Şekil 6-a-b’de verilmiştir. Tüm analiz sonuçlarına göre, İ-ÖÖTO algoritması diğer çözüm yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha az

aktif güç kaybına sahip olduğu görülmektedir. Temel duruma göre, yük artışı ve hat kesintileri aktif güç kayıplarını da arttırmaktadır.



Şekil 6. Tüm durumlar için toplam aktif güç kayıplarının karşılaştırılması. a-IEEE 14 baralı, b-İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı (Comparison of total active power losses for all cases. a-IEEE 14 bus, b-Istanbul-Anatolian side 17 bus.)

Yapılan analizlerin temel durum sonuçlarına göre, aktif güç kayıpları, IEEE 14 baralı sistemde, RGK'sız durumda, İ-ÖÖTO algoritmasında NR'ye göre %3,90 oranında azalmıştır. İ-ÖÖTO algoritması RGK'sız ve RGK'lı durumda sırasıyla PSO'ya göre %0,57 ve %0,76, YAA'ya göre %0,62 ve %1,32, ÖÖTO'ya göre %0,16 ve %0,17 oranında düşük olduğu hesaplanmıştır. İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı sistemde, RGK'sız durumda, İ-ÖÖTO algoritması NR'ye göre %0,28 oranında azalmıştır. İ-ÖÖTO algoritması, RGK'sız ve RGK'lı durumda sırasıyla PSO'ya göre %0,02 ve %0,13, YAA'ya göre %0,12 ve %0,14, ÖÖTO'ya

göre %0,15 ve %0,10 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Oranlardan da anlaşılacağı gibi, İ-ÖÖTO algoritması diğer tüm algoritmalara göre aktif güç kaybı minimizasyonu açısından üstünlüğünü göstermiştir.

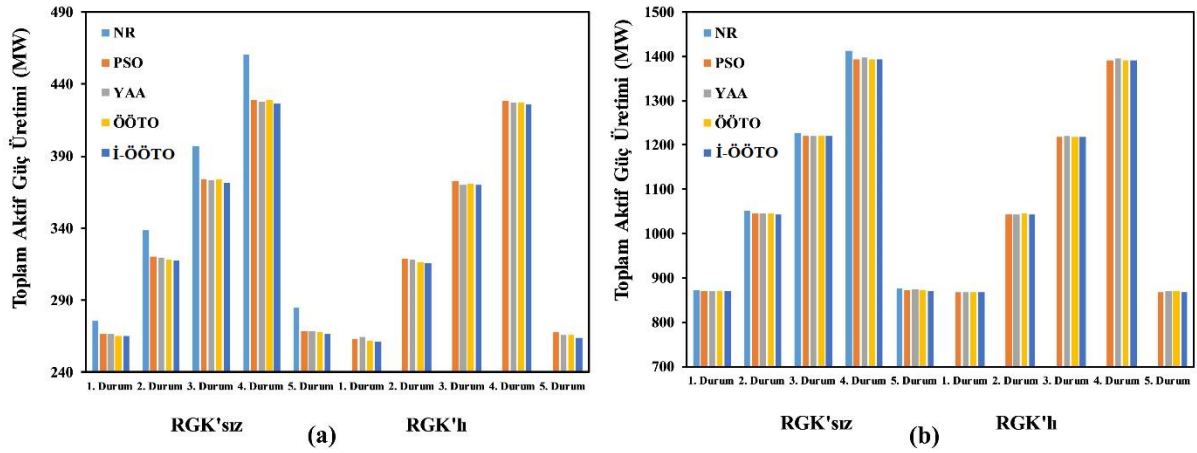
Çalışma durumlarına göre generatörlerin toplam aktif güç üretim değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Şekil 7-a-b'ye göre karşılaştırıldığında, güç sistemlerinde talep edilen yük değeri arttıkça, generatör aktif güç üretim değerinin de arttığı görülmektedir. Hat kesinti durumlarında da aktif güç üretim değeri artmaktadır.

Tablo 2. Çalışma durumlarına göre algoritmaların generatörlerin toplam aktif güç üretim değerleri (The total active power generation values of the generators of the algorithms according to the operating conditions.)

| | | IEEE 14 Bara | | | | | İstanbul-Anadolu Yakası17 Bara | | | | |
|---------|----------|--------------|---------|---------|---------|---------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | NR | PSO | YAA | ÖÖTO | İ-ÖÖTO | NR | PSO | YAA | ÖÖTO | İ-ÖÖTO |
| RGK'sız | 1. Durum | 275,738 | 266,507 | 266,65 | 265,434 | 264,997 | 871,407 | 869,145 | 870,024 | 870,314 | 869,002 |
| | 2. Durum | 338,529 | 320,555 | 319,295 | 318,243 | 317,484 | 1051,604 | 1045,626 | 1044,858 | 1044,696 | 1043,459 |
| | 3. Durum | 396,957 | 374,11 | 373,651 | 374,1 | 371,482 | 1227,192 | 1220,78 | 1220,839 | 1220,862 | 1219,737 |
| | 4. Durum | 460,519 | 429,162 | 427,738 | 428,829 | 426,727 | 1412,069 | 1392,864 | 1397,077 | 1392,864 | 1392,264 |
| | 5. Durum | 284,954 | 268,823 | 268,379 | 268,109 | 266,725 | 877,033 | 872,519 | 873,998 | 871,212 | 870,566 |
| RGK'lı | 1. Durum | | 263,286 | 264,787 | 261,73 | 261,295 | | 868,202 | 868,326 | 867,942 | 867,081 |
| | 2. Durum | | 319,003 | 318,377 | 316,156 | 315,409 | | 1043,384 | 1043,704 | 1044,414 | 1042,456 |
| | 3. Durum | | 372,5 | 370,347 | 370,638 | 369,75 | | 1218,833 | 1219,246 | 1218,422 | 1217,545 |
| | 4. Durum | | 428,284 | 427,29 | 427,003 | 425,977 | | 1391,621 | 1395,549 | 1391,636 | 1391,266 |
| | 5. Durum | | 267,745 | 265,847 | 265,634 | 264,198 | | 868,749 | 869,577 | 869,463 | 868,02 |

Temel durum analiz sonuçlarına göre, güç sistemlerinde generatörlerin toplam aktif güç üretim değerleri, IEEE 14 baralı sistemde İ-ÖÖTO algoritması RGK'sız, NR'ye, PSO'ya, YAA'ya ve ÖÖTO'ya göre sırasıyla, %64,17, %20,11, %21,60 ve %6,79 oranında, RGK'lı, PSO'ya, YAA'ya ve ÖÖTO'ya göre sırasıyla, %46,45, %60,34 ve %15,95 oranında az olduğu tespit edilmiştir. İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı sistemde, İ-

ÖÖTO algoritması RGK'sız, NR'ye, PSO'ya, YAA'ya ve ÖÖTO'ya göre sırasıyla, %20,37, %1,5, %9,81 ve %12,25 oranında, RGK'lı, PSO'ya, YAA'ya ve ÖÖTO'ya göre sırasıyla, %13,02, %14,26 ve %10,31 oranında azaldığı görülmüştür. Generatörlerin toplam aktif güç üretim değerleri açısından da İ-ÖÖTO algoritmasının, tüm çalışma durumlarında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 7. Tüm durumlar için generatörlerin toplam aktif güç üretim değerleri. a-IEEE 14 baralı, b-İstanbul-Anadolu yakası 17 baralı (Total active power generation values of generators for all situations. a-IEEE 14 bus, b-Istanbul-Anatolian side 17 bus.)

Tüm çözüm sonuçları incelendiğinde, İ-ÖÖTO algoritmasının, güç sistemlerinde gerilim kararlılığı açısından diğer algoritmalara göre optimum değerleri verdiği görülmüştür.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, son yıllarda kullanılan sosyal tabanlı ÖÖTO algoritması ve bu algoritma üzerinde düzenlemeler yaparak İ-ÖÖTO algoritması geliştirilmiştir. Bunlara ek olarak, literatürdeki çalışmalarda kullanılan PSO ve YAA algoritmalarıyla birlikte klasik çözüm yöntemlerinden NR, IEEE 14 baralı ve Türkiye, İstanbul bölgesinde oluşturulan 17 baralı güç sistemleri üzerinde gerilim kararsızlığını gidermek için optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon algoritmalarıyla yapılan analizler sonucunda, tasarlanan İ-ÖÖTO algoritmasının, diğer algoritmalara göre gerilim kararlılığı açısından en başarılı sonuçları verdiği görülmüştür.

Analizleri gerçekleştirmek için seçilen güç sistemleri üzerinde 5 farklı durum tasarlanmıştır. Ayrıca, bu beş durum iki güç sistemi üzerinde de, RGK bağlı olmadan ve bağlandıktan sonraki optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Analizler sonucunda, güç sistemlerdeki güç artışı ve hat kesintilerinin, gerilim kararlılığını olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Bu durumda, generatörlerin, maksimum değerlerde çalışmaya zorlandığı tespit edilmiştir.

Tüm analiz sonuçlarına göre, tüm meta-sezgisel algoritmalar klasik NR yöntemine göre üstünlüğünü göstermiştir. Bu algoritmalar kendi aralarında karşılaştırıldığında, İ-ÖÖTO algoritması, orijinal ÖÖTO, PSO ve YAA'ya göre gerilim kararlılığı

açısından en optimum sonuçları verdiği gözlenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Bu çalışmada tüm yazarlar eşit katkı sağlamıştır.

All authors contributed equally to this study.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Steinmetz, C.P. (1920). Power Control and Stability of Electric Generating Stations. American Institute of Electrical Engineers Transmission, 39(2), 1215-1287.
- [2] AIEE Subcommittee on Interconnections and Stability Factors (1937). First Report of Power System Stability. American Institute of Electrical Engineers Transmission, 56(2), 261-282.
- [3] Evans, R. and Bergvall, R. (1924). Experimental Analysis of Stability and Power Limitations. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, XLIII, 39-58.

- [4] Farmer, R. (2001). Power System Dynamics and Stability. The Electric Power Engineering Handbook, Arizona State University, Ed.LL. Grigsby, 30-97.
- [5] Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Cutsem, R. and Vittal, V. (2004). Definition and Classification of Power System Stability. IEEE Transaction on Power Systems, 19(2), 1387-1401.
- [6] Vassel, G.S. (1991). Northcast Blacout of 1965. IEEE Power Engineering Review, 11(1), 4-8.
- [7] Van Cutsem, T. and Vournas, C. (1998). Voltage Stability of Electric Power Systems. Norwell, MA: Kluwer, 213-264.
- [8] Onksakul, W. and Jirapong, P. (2005). Optimal Allocation of FACTS Devices to Enhance Total Transfer Capability Using Evolutionary Programming. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Kobe, Japan.
- [9] Ravi, V. and Duraiswamy, K. (2012). Effective Optimization Technique for Power System Stabilization using Artificial Bee Colony. International Conference on Computer Communication and Informatics, Coimbatore, India.
- [10] Deepa, S.N. and Rizwana, J. (2013). Power System Stability by Reducing Power Losses using Optimization Techniques. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, Enathi, India.
- [11] Akachukwu, C.M., Aibinu, A.M., Nwohu M.N. and Salau, H.B. (2014). A Decade Survey of Engineering Applications of Genetic Algorithm in Power System Optimization. International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, Langkawi, Malaysia.
- [12] Chen, G., Liu, L., Guo, Y. and Huang, S. (2015). Multi-Objective Enhanced PSO Algorithm for Optimizing Power Losses and Voltage Deviation in Power Systems. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 35(1), 350-372.
- [13] Singh, H. and Srivastava, L. (2016). Optimal VAR Control for Real Power Loss Minimization and Voltage Stability Improvement Using Hybrid Multi-Swarm PSO. IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, Nagercoil, India.
- [14] Amrane, Y., Elmaouhab, A., Boudour, M. and Ladjici, A.A. (2017). Voltage Stability Analysis Based on Multi-Objective Optimal Reactive Power Dispatch Under Various Contingency. International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 9(3), 521-541.
- [15] Li, S., Gong, W., Hu, C., Yan, X., Wang, L. and Gu, Q. (2021). Adaptive Constraint Differential Evolution For Optimal Power Flow. Energy, 235, 121362.
- [16] Ermiş, S. (2018). Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Optimizasyonunda Yeni Bir Akıllı Yöntem Geliştirilmesi ve Uygulaması”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [17] Abou El Ela, A.A., Abido, M.A. and Spea, S.R. (2010). Optimal Power Flow Using Differential Evolution Algorithm. Electric Power Systems Research, 80(7), 878-885.
- [18] Abido, M.A. and Bakhshwain, J.M. (2005). Optimal VAR Dispatch Using a Multiobjective Evolutionary Algorithm. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 27(1), 13-20.
- [19] Rao, V.R. and Patel, V. (2012). An Elitist Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm For Solving Complex Constrained Optimization Problems. International Journal of Industrial Engineering Computations, 3(4), 535-560.
- [20] Rao, R.V., Savsani, V.J. and Vakharia, D.P. (2011). Teaching-Learning-Based Optimization: A Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems. Computer Aided Design, 43(3), 303-315.
- [21] Yeşilbudak, M., Ermiş, S. and Bayındır, R. (2017). Farklı Baralara Sahip Güç Sistemlerinde Yük Akışı Analiz Metotlarının Karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5(3), 237-246.
- [22] İnternet: IEEE 14 Bus Power Flow Test Case (2008). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Flabs.ece.uw.edu%2Fpstca%2Fpf14%2Fpg_tca14Bara.htm+&date=2018-11-20 adresinden 15.04.2017.