

Yasak İşletim Bölgesi Ekonomik Güç Dağıtım Problemlerine Geliştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu Yaklaşımı

Serdar Özyön^{1,*}, Celal Yaşar¹, Hasan Temurtaş² ve Doğan Aydın²

¹Dumlupınar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

²Dumlupınar Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

*Corresponding author: serdarozyon@dpu.edu.tr

Özet. Bu çalışmada, mevcut güç kısıtları yanında generatörlerin artırma/azaltma sınırlarını da dikkate alan yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım problemi geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu (GPSO) algoritması ile çözülmüştür. Problemin çözümünde iletim hatlarının kayıpları B -kayıp matrisi ile hesaplanmıştır. GPSO metodu literatürdeki 6 ve 15 generatörden oluşan iki farklı test sistemine uygulanmıştır. Elde edilen optimal çözüm değerleri, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler. Ekonomik güç dağıtım, yasak işletim bölgeleri, artırma/azaltma sınırları, geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu.

Abstract. In this study, prohibited operating zone economic power dispatch problem which considers ramp rate limit, has been solved by improved particle swarm optimization algorithm (GPSO). The transmission line losses used in the solution of the problem have been computed by B -loss matrix. GPSO method has been applied to two different test systems in literature which consist of 6 and 15 generators. The attained optimum solution values have been compared with the optimum results in literature and have been discussed.

Keywords. Economic power dispatch, prohibited operating zones, ramp rate limits, improved particle swarm optimization.

1. Giriş

Günümüzde elektrik enerjisine olan ihtiyacın giderek artmasıyla ekonomik güç dağıtım problemi, güç sistemlerinin işletimlerinde en önemli konulardan biri haline gelmiştir. Ekonomik güç dağıtım problemi, sistemdeki mevcut yükün sistemin kısıtları altında toplam yakıt maliyeti minimum olacak şekilde üretim birimleri tarafından karşılanabilmesi olarak bilinmektedir. Bu tür problemlerin çözümünde generatörlere ait artırma/azaltma sınırları ve yasak işletim bölgeleri gibi bazı kısıtlar

Received November 17, 2011; accepted February 4, 2013.

ihmal edilerek problemlerin çözülmesi kolaylaştırılmaktadır. Bu tür problemler basitleştirilmiş ekonomik güç dağıtım problemleri olarak bilinmekte olup gerçek problemlerin taşıdığı özellikleri kısmen taşımaktadırlar. Bu nedenle söz konusu kısıtların ilave edilmesiyle ekonomik güç dağıtım problemleri daha fazla gerçek problemlere yaklaşmaktadır. Bu şekilde ilave kısıtları içeren optimizasyon problemi daha fazla kısıtlı lineer olmayan optimizasyon problemine dönüşmektedir. Yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım problemi doğrusal olmayan karakteristiğe sahip ve optimal çözümünün bulunması oldukça zor olan bir problemdir. Literatürde bu tür çok sayıda kısıt ve karar değişkeni içeren doğrusal olmayan problemlerin optimal çözümünün bulunmasında doğrudan sezgisel yöntemler kullanılmıştır.

Literatürde yasak işletim bölgesi doğrusal olmayan ekonomik güç dağıtım problemleri parçacık sürü optimizasyon ve geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyon algoritmalarıyla [1-5], geliştirilmiş bal arısı çiftleşme algoritmasıyla [6], genetik ve geliştirilmiş genetik algoritmalarla [5,7], evrimsel algoritma ve hızlı hesaplamalı evrimsel algoritmayla [8,9,10], karışık tamsayı ikinci derece programlamayla [11], yapay bağışıklık sistemi optimizasyon algoritmasıyla [12], biyocoğrafya tabanlı optimizasyon algoritmasıyla [13], benzetim tavlama, tabu ve çoklu tabu arama algoritmalarıyla [14] ve gelişmiş doğrudan arama algoritmasıyla [15] çözülmüştür.

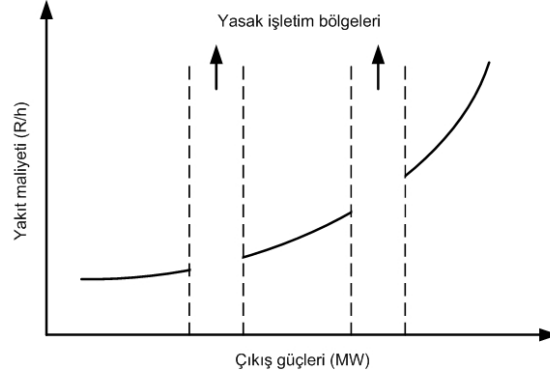
Bu çalışmada, yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım probleminin çözümü için geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu (GPSO) algoritması kullanılmıştır. GPSO, işleyiş açısından genetik algoritmaya dayanan popülasyon temelli sezgisel bir optimizasyon tekniğidir.

2. Problemin Formülasyonu

Yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım probleminin çözümü, sistem kısıtları altında toplam yakıt maliyeti minimize edilerek bulunur. Bu tür problemlerde, maliyet eğrisi Şekil 1’de görüldüğü gibi kesikli salınımlar şeklinde artmaktadır [1,2]. Sistemdeki üretim birimlerinin yakıt maliyet eğrisi aşağıdaki denklemde verildiği gibi her bir birim için aktif güç üretiminin 2. derece fonksiyonu olarak alınmıştır [1-8,10-16].

$$\min F_T = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) = \sum_{i=1}^n (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i), \quad (R/h) \quad (1)$$

Denklem (1)’de F_T toplam yakıt maliyetini göstermekte olup P_i ’de MW olarak alınmaktadır.



ŞEKİL 1. Yasak işletim bölgesi yakıt maliyet fonksiyonu.

Kayıplı sistemdeki güç eşitlik kısıtı denklem (2)'deki gibi alınmıştır.

$$\sum_{i=1}^n P_i - P_{yük} - P_{kayıp} = 0 \quad (2)$$

Termik üretim birimlerinin çalışma sınır değerleri denklem (3)'de verilmiştir.

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (3)$$

Sistemin iletim hatlarında meydana gelen güç kayıpları B kayıp matrisi ile denklem (4) kullanılarak hesaplanmaktadır [1-7,13-16].

$$P_{kayıp} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_{0i} P_i + B_{00} \quad (4)$$

İletim hattı güç kayıpları denkleminde yer alan B_{ij} ; iletim hattı kayıp katsayılar matrisi, B_{0i} ; P_i ile aynı uzunlukta vektör, B_{00} ; sabit sayıdır.

Generatörlerin çıkış güçlerinin ani olarak artırılması ve azaltılması belli sınırlar içerisinde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla üretim birimleri bu sınırlar dışındaki herhangi bir çalışma değerine ani olarak azaltılıp yükseltilemez. Bu nedenle sisteme bağlı tüm üretim birimlerinin çalışma değerleri arasındaki geçişler denklem (5)'te verilen artırma/azaltma sınırları tarafından kısıtlanır [2-4,9-14].

$$P_i^0 - P_i \leq DR_i \quad \text{ve} \quad P_i - P_i^0 \leq UR_i \quad (5)$$

Denklemdaki P_i^0 üretim biriminin bir önceki adımda ürettiği güç, DR azaltma ve UR artırma sınır değerlerini göstermektedirler. Üretim birimlerine ait artırma/azaltma

sınır değerleri denklem (3)'te verilen birimlerin çalışma sınır değerlerine uygulandığında denklem (3) aşağıdaki denkleme dönüşür.

$$\max(P_i^{\min}, P_i^0 - DR_i) \leq P_i \leq \min(P_i^{\max}, P_i^0 + UR_i) \quad (6)$$

Yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım problemlerinde Şekil 1'de gösterilen kesikli yakıt maliyet eğrileri kullanılmaktadır. Bu nedenle yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım probleminde denklem (3)'teki üretim birimlerinin çalışma sınır değerleri denklem (7)'de gösterildiği gibi kullanılmaktadır [1-15].

$$P_i \in \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i,1}^l \\ P_{i,j-1}^u \leq P_i \leq P_{i,j}^l \\ P_{i,pz_i}^u \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \quad j = 2, 3, \dots, pz_i \quad (7)$$

Denklemden $P_{i,j}^u$ ve $P_{i,j}^l$, i . üretim biriminin MW olarak yasak işletim bölgelerinin sırasıyla alt, üst sınırlarını ve pz_i , i . üretim biriminin yasak işletim bölge sayısını göstermektedir.

3. Geliştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması ve Algoritmanın Probleme Uygulanması

PSO yeni bir sezgisel metot olarak 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından ortaya atılmıştır. Metot kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışları gözlemlenerek geliştirilmiştir. PSO algoritması amaç fonksiyonunun değişimini elde etmek için matematiksel işlemlere ihtiyaç duymayan bir global optimizasyon algoritmasıdır. Metodun ilk orijinal versiyonu sadece lineer olmayan sürekli optimizasyon problemlerin çözümünde kullanılabilirken sonraları geliştirilerek daha karmaşık mühendislik problemlerinin global optimal çözümlerinde kullanılabilir hale gelmiştir. Algoritmada bir sürü birçok parçacıktan meydana gelmekte ve her bir parçacık bir potansiyel çözümü göstermektedir [17-24].

Kuş ve balık sürüleri yiyecek ya da barınak bulmak için belirli bir alanı taramaktadırlar. PSO algoritması, bu sürülerin sosyal davranışlarından oluşmaktadır. Bu davranışlardan ilki sürüdeki her bir parçanın geçmiş hatıraları içerisinden en iyi konuma gitme davranışdır. İkinci davranış sürü içerisindeki yiyeceğe en yakın parçacığı takip etme hareketidir. Son davranış ise parçacığın geniş alan taramasını sağlayan geçmiş hız değeridir. Bu davranışlar klasik PSO algoritmasının temelini oluşturmaktadır [23].

Klasik PSO algoritmasında başlangıçta parçacıklar uygun arama uzayında yayılmak için rastgele üretilirler. Parçacık kendine ait pozisyon ve uçuş hızına sahiptir. Optimizasyon işleminde her bir iterasyon boyunca parçacıklar sahip oldukları bu değerleri değişmeden sürdürürler. Bir sonraki iterasyonda ise her bir parçacığın konumunu belirlemek için denklemler güncellenir. Her bir iterasyonda parçacıklar optimal çözüme doğru hareket etmektedirler [17-24].

Klasik PSO algoritmasında, her bir parçacık ilk olarak rasgele konumlara yerleştirilir. Her bir parçacığın yeni hızı denklem (8) ve yeni konumu denklem (9) ile belirlenir.

$$v_i(k+1) = w v_i(k) + c_1 r_1(k)(X_{leniyi_i}(k) - x_i(k)) + c_2 r_2(k)(X_{geniyi_i}(k) - x_i(k)) \quad (8)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1), \quad v_i(0) = 0 \quad (9)$$

Denklemlerde k iterasyon sayısını, M her bir iterasyonda parçacık sayısını (sürü popülasyonu), $x_i(k)$, $i \in (1, 2, \dots, M)$ k . iterasyonda i . parçacığın konumunu, $v_i(k)$, $i \in (1, 2, \dots, M)$ k . iterasyonda i . parçacığın hızını, pozitif sayılar olan c_1 ve c_2 öğrenme faktörlerini (kavrama ve sosyal ivme sabitlerini), $r_1(k)$, $r_2(k) \sim U(0, 1)$ 0 ile 1 arasında düzgün dağılmış rassal sayıları, w eylemsizlik ağırlık faktörünü göstermektedir. Sürü içindeki herhangi bir bireyin kendi hatıralarındaki en iyi konumu $X_{leniyi_i}(k)$ değişkenine kaydedilmektedir. Ayrıca sürü içindeki bireylerden optimuma en yakın olanın konumu $X_{geniyi_i}(k)$ değişkeninde saklanmaktadır [17-24].

Doğrusal olarak azalan w eylemsizlik ağırlık faktörünü eski hız değerini kontrol eden bir değişken olup denklem (10)'dan hesaplanır.

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times \text{iter} \quad (10)$$

Denklemden w_{\min} ve w_{\max} sırasıyla başlangıç ve son eylemsizlik ağırlık faktörlerini, iter o anki iterasyon sayısını ve iter_{\max} maksimum iterasyon sayısını göstermektedir [17-24].

Klasik PSO algoritması, kendisinin ve sürünün en iyi konumuna göre hareket eden parçacıklara dayalı olmasından dolayı yakınsama oranı yüksek olan bir algoritmadır. Bu özellik bazı problemlerin çözümlerinde algoritmanın hızlı bir şekilde optimum noktalara ulaşmasını sağlamaktadır. Fakat bazı diğer problemlerin çözümlerinde ise tüm parçacıkların hızlı bir şekilde yerel optimum noktalarına veya parçacık konumlarının kısıtlara takılmalarına neden olmaktadır. Bu problemten kurtulmak için klasik PSO'nun yakınsama hızı üzerinde bazı iyileştirmeler yapılarak algoritma

geliştirilir ve problemin çözümünde karşılaşılan zorluklar bu şekilde aşılmış olur. Bu durumda algoritma geliştirilmiş PSO olarak isimlendirilir.

Bu çalışmada öncelikle yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım problemi klasik PSO algoritması ile çözülmeye çalışıldığında en iyi parçacığın kısıtlı bölgelere yakın konumlar alması sebebiyle tüm parçacıkların hızlı bir şekilde kısıtlı bölgelere doğru yönlendiği ve zamanla bu bölgelerden çıkamadıkları gözlenmiştir. Yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım problemlerinin çözümleri diğer ekonomik güç dağıtım problemlerine göre zor ve çok fazla sayıda kısıta sahip olan problemlerdir. Bu tür problemlerin çözümlerinde klasik PSO yerine algoritmanın yakınsama hızı üzerinde iyileştirme yapılarak oluşturulan geliştirilmiş PSO algoritması (GPSO) kullanılmıştır.

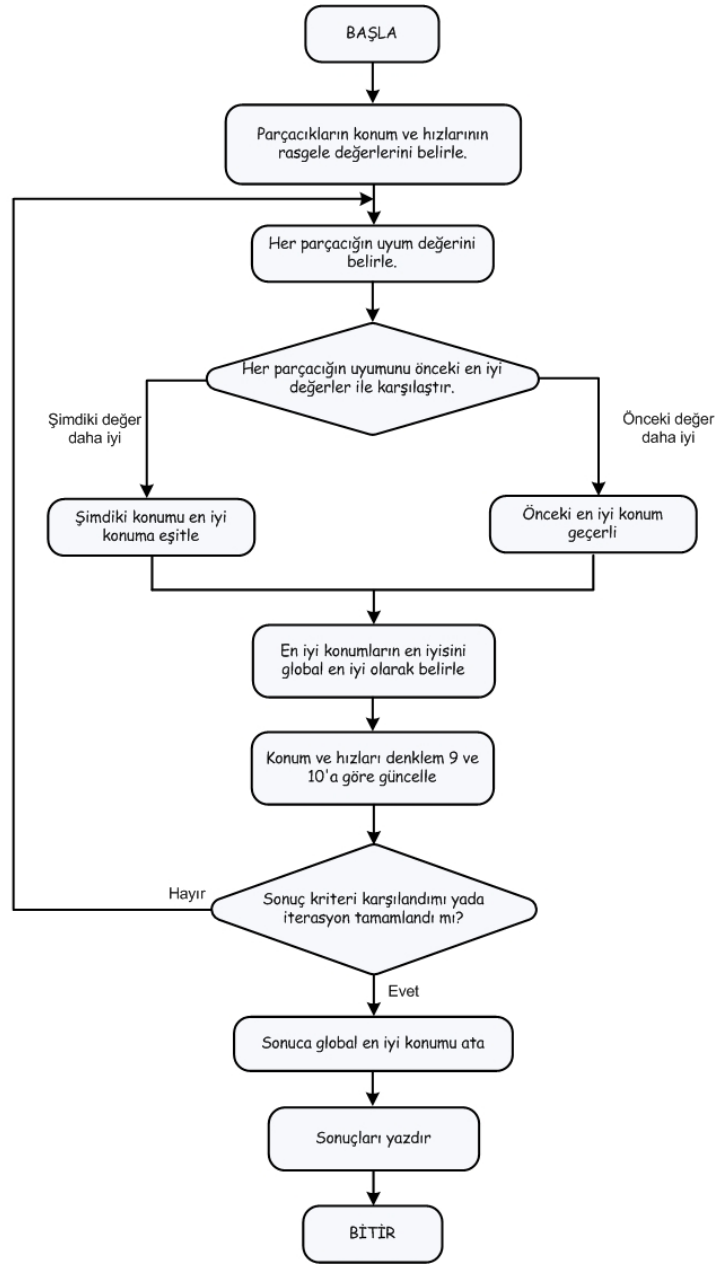
Geliştirmiş olduğumuz yeni GPSO algoritmasında denklem (8) yerine aşağıdaki denklem kullanılarak algoritmanın yakınsama hızının düşürülüp keşfetme hızı yükseltilerek yerel minimumlardan ve yasaklı bölgelerden kaçış sağlanmıştır.

$$\begin{aligned}
v_i(k+1) = & w v_i(k) + c_1 r_1(k)(X_{leniyi}(k) - x_i(k)) \\
& + c_2 r_2(k)(X_{geniyi}(k) - x_i(k)) \\
& + c_3 r_3(k)(x_m(k) - x_i(k))
\end{aligned} \tag{11}$$

Denklemden $x_m(k)$, $m \in (1, 2, \dots, M)$ k . iterasyonda her bir parçacık için rastgele seçilen m . parçacığın konumunu ve c_3 rassal komşuluk öğrenme katsayısını ifade etmektedir. Bu durumda parçacıklar eklenen rastgele seçilen komşu parçacıktan öğrenme yöntemi ile en iyi konumlara doğru yaklaşırken komşu parçacıkların konumlarını da dikkate almaktadırlar. Bu ilave özellik her defasında parçacıkların daha iyi sonuçlara doğru yönelmelerini ve keşfetme kabiliyetlerinin artmasını sağlamaktadır.

Ayrıca algoritmada parçacıkların konumunun yasaklı bir bölgede yer almasına izin verilmemektedir. Algoritma, parçacığın konumu yasaklı bir bölgede olması durumunda parçacık yasaksız bir bölge içinde kalana kadar farklı bir komşu parçacıkla tekrar tekrar çalışarak denklem (10)'u hesaplamaktadır. GPSO algoritmasının akış diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Aşağıda GPSO'nun yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım problemine uygulanması anlatılmıştır. Önce problem için verilen P_i^0 başlangıç, artırma/azaltma sınırları ve üretim birimlerinin minimum ve maksimum çıkış güç değerleri dikkate alınarak denklem (6)'ya ait algoritmadaki değerler güncellenir. Parçacık kümesi rastgele olarak yeni belirlenen minimum ve maksimum çıkış güç değerleri dikkate alınarak oluşturulur. Belirlenen parçacık sayısı (M) için P_i 'ler denklem (3)'te verilen



ŞEKİL 2. GPSO akış diyagramı.

eşitliği sağlayacak uygun değerlerle rastgele şekilde aşağıdaki denklem kullanılarak bulunur [25].

$$P_i = P_i^{\min, \text{güncel}} + \text{rand}[0, 1] \times (P_i^{\max, \text{güncel}} - P_i^{\min, \text{güncel}}) \quad (12)$$

Denklemden $P_i^{\max, \text{güncel}}$ ve $P_i^{\min, \text{güncel}}$, i . üretim biriminin denklem (6)'ya göre güncellenen sırasıyla minimum ve maksimum çıkış güç değerleridir.

Denklem (2)'de verilen aktif güç denge kısıtını sağlamak için bireylerin popülasyonunun oluşturulması çok önemlidir. Aktif güç eşitlik kısıtının sağlanması için üretim gücü $P_{i,l}$ olan l . bağımlı generatör rastgele olarak seçilir. Bağımlı generatör gücü $P_{i,l}^{\text{eski}}$ 'nin değeri başlangıç durumunda $P_{\text{kayıp}}^{\text{eski}} = P_{\text{kayıp}}^{\text{ilk}} = 0$ alınarak denklem (13)'ten hesaplanır [25].

$$P_{i,l}^{\text{eski}} = P_{\text{yük}} + P_{\text{kayıp}} - \sum_{i \in N_G, l \notin N_G} P_i \quad (13)$$

$P_{i,l}^{\text{eski}}$ 'nin bulunmasıyla denklem (4)'ten $P_{\text{kayıp}}^{\text{yeni}}$ hesaplanır. Buna göre $P_{i,l}^{\text{yeni}}$ 'nin değeri aşağıdaki eşitlikten tekrar hesaplanır.

$$P_{i,l}^{\text{yeni}} = P_{i,l}^{\text{eski}} + P_{\text{kayıp}}^{\text{yeni}} - P_{\text{kayıp}}^{\text{eski}} \quad (14)$$

Bu işlemin sonucu denklem (15)'ten kontrol edilir ve hata tolerans değerinin altında olduğunda denklem (3) eşitliği de sağlanmış olur.

$$\text{Hata} = \left| P_{\text{kayıp}}^{\text{yeni}} - P_{\text{kayıp}}^{\text{eski}} \right|, \quad \text{Hata} \leq \text{TOL}_{\text{hata}} \quad (15)$$

Bu durumda elde edilen $P_{i,l}^{\text{yeni}}$ değerinin denklem (6) kısıtını sağlayıp sağlamadığına bakılır. Eğer sağlıyorsa işleme devam edilir, sağlamıyorsa denklem (12) eşitliğine dönülerek rastgele atama işlemi yeniden yapılır. Bu durumda elde edilen $P_{G,l}^{\text{yeni}}$ değerinin denklem (5) kısıtını sağlayıp sağlamadığına bakılır. Eğer sağlıyorsa, parçacığın önerdiği bu çözüm değerleri kullanılarak denklem (1)'den amaç fonksiyonun değeri hesaplanır ve işleme devam edilir. Eğer sağlamıyorsa denklem (12) eşitliğine dönülerek rastgele atama işlemi yeniden gerçekleştirilir. Bu çalışmada denklem (1)'deki amaç fonksiyonu uygunluk fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde yapılan işlem ile üretilen parçacık bir çözümü içerdiğinden sürüye katılır. Bu işlem M parçacık (sürü popülasyonu) tamamlandıncaya kadar devam eder.

Üretilen bu bireylerin önerdiği güç değerleri, artırma/azaltma sınırlarına göre üretim birimlerinin minimum ve maksimum çıkış güç değerleri denklem (6)'ya göre tekrar güncellenir. Bu işlem her iterasyondan önce tekrarlanarak üretim birimlerinin artırma/azaltma sınırları dışında değişmesi engellenir. Denklem (7)'deki

eşitliği sağlamayan bireylerin herhangi elemanı aşağıdaki denkleme göre belirlenen sınır değerlere çekilir [25].

$$P_i = \begin{cases} P_i^{\min} & \text{eğer } P_i < P_i^{\min} \\ P_{i,j}^l & \text{eğer } P_{i,j}^l > P_i \ll P_{i,pz_i}^u \\ P_{i,pz_i}^u & \text{eğer } P_{i,j}^l \gg P_i < P_{i,pz_i}^u \\ P_i^{\max} & \text{eğer } P_i > P_i^{\max} \end{cases}, \quad j = 2, \dots, pz_i \quad (16)$$

Her bir iterasyonda $X_{geniyi}(k)$ içindeki parçacıkların uygunluk değeri en iyi olanı seçilir. İçlerinde en uygun fonksiyon değerine sahip çözüm en uygun çözüm olarak alınır [25]. Durma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı belirlendiğinden kriter sağlandığında en son elde edilen çözümün önerdiği güç üretim değerleri optimal çözüm değerleri olarak alınır ve iterasyon durdurulur.

Bu çalışmada yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım problemi için kullanılan GPSO ile MATLAB R2010a'da programı geliştirilmiş ve program AMD 64 X2 Dual Core 2.1 GHz işlemcili ve 4 GB RAM bellekli bilgisayarda çalıştırılmıştır.

4. Örnek Problem Çözümleri

GPSO, 6 generatörlü test sistemine 1263 MW ve 15 generatörlü test sistemine 2630 MW yük talepleri için uygulanmıştır. Yapılan çalışmada GPSO parametreleri parçacık sayısı (M) 25, $w_{max} = 0,9$, $w_{min} = 0,4$, $c_1 = c_2 = c_3 = 2,05$ ve denklem (14)'teki hata toleransı $TOL_{hata} = 1 \times 10^{-6}$ MW olarak alınmıştır.

Örnek test problemleri için karar değişkeni sayıları üretim birimleri sayısına eşittir. Bu problemlerin optimal çözümlerinde sağlanan kısıtlar; her bir üretim birimi için alt ve üst üretim sınırları, yasak işletim bölge sayıları, artırma/azaltma sınır değerleridir. Ayrıca her problem için denklem (2)'deki eşitlik kısıtı mutlaka sağlanmalıdır.

4.1. Test sistemi-I: 6 generatörlü sistem. GPSO ile 6 generatörlü test sistemi 1263 MW yük talebi için çözülmüştür. Problemin çözümü 100 iterasyonda tamamlanmıştır. Probleme kullanılan yakıt maliyet fonksiyonu katsayıları, artırma/azaltma ve aktif güç üretim sınırları Tablo 1'de, enerji iletim hatlarının kayıplarının hesaplanmasında kullanılan B kayıp matrisi değerleri Tablo 2'de ve yasak işletim bölgeleri Tablo 3'te verilmiştir [1,2,5,14].

TABLO 1. Üretim birimlerinin maliyet katsayıları, artırma/azaltma ve aktif güç üretim sınırları.

Bara No	a	b	c	UR (MW/h)	DR (MW/h)	P ⁰ (MW)	P ^{min} (MW)	P ^{max} (MW)
1	0,0070	7,0	240	80	120	440	100	500
2	0,0095	10,0	200	50	90	170	50	200
3	0,0090	8,5	220	65	100	200	80	300
4	0,0090	11,0	200	50	90	150	50	150
5	0,0080	10,5	220	50	90	190	50	200
6	0,0075	12,0	190	50	90	110	50	120

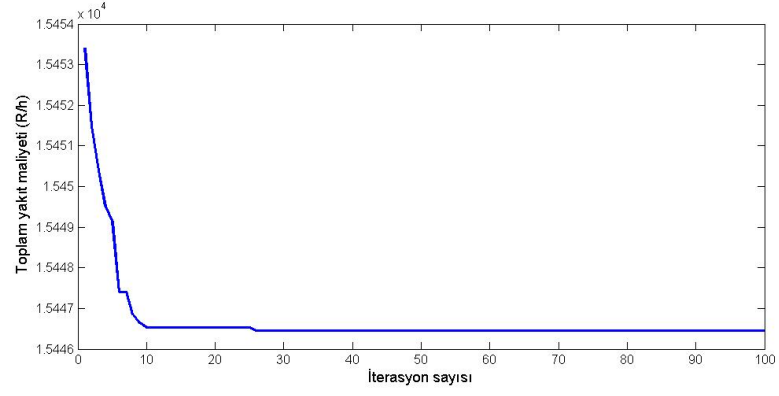
TABLO 2. B kayıp matrisi değerleri.

B-Katsayıları							
$[B] = 0,001 *$	1,7	1,2	0,7	-0,1	-0,5	-0,2	
	1,2	1,4	0,9	0,1	-0,6	-0,1	
	0,7	0,9	3,1	0,0	-0,1	-0,6	
	-0,1	0,1	0,0	2,4	-0,6	-0,8	
	-0,5	-0,6	-0,1	-0,6	12,9	-0,2	
	-0,2	-0,1	-0,6	-0,8	-0,2	15,0	
	$[B_0] = 0,001 *$	-0,3908	-0,1297	0,7047	0,0591	0,2161	-0,6635
$[B_{00}] = 0,0056$							

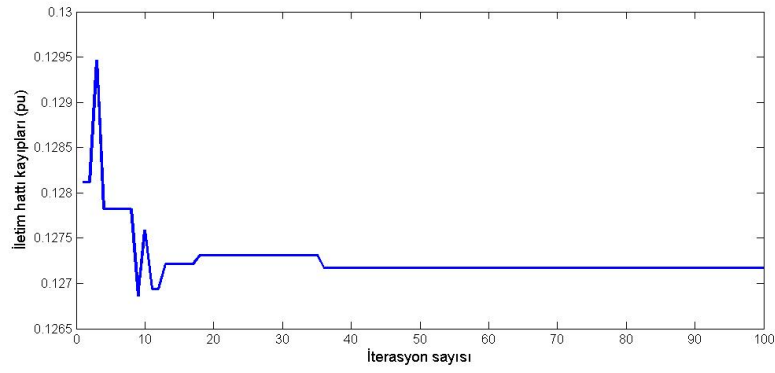
TABLO 3. Yasak işletim bölgeleri.

Bara No	Bölge-I	Bölge-II
1	[210,240]	[350,380]
2	[90,110]	[140,160]
3	[150,170]	[210,240]
4	[80,90]	[110,120]
5	[90,110]	[140,150]
6	[75,85]	[100,105]

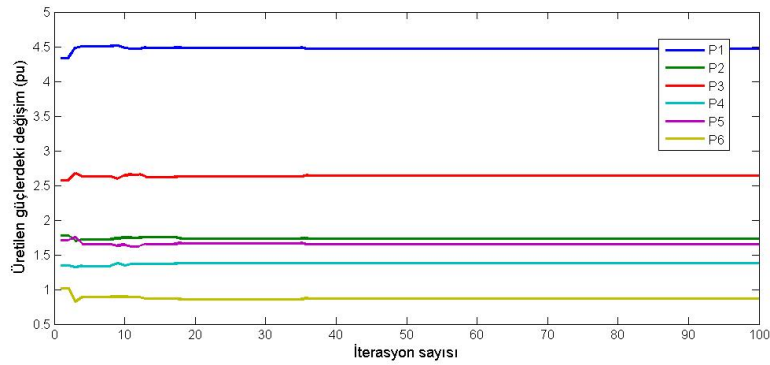
GPSO'nun 6 generatörlü test sistemine uygulanmasından elde edilen toplam yakıt maliyeti değerlerinin, iletim hattı kayıplarının ve generatörlerin çıkış güçlerinin iterasyonlara göre değişimini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 3, 4 ve 5'te verilmiştir.



ŞEKİL 3. Toplam yakıt maliyetinin iterasyonlara göre değişimi.



ŞEKİL 4. İletim hattı kayıplarının iterasyonlara göre değişimi.



ŞEKİL 5. Üretilen güçlerin iterasyonlara göre değişimi.

Şekil 3 incelendiğinde toplam yakıt maliyetinin yaklaşık 26. iterasyonda minimum değeri yakaladığı görülmektedir. Şekil 4'te verilen iletim hatlarındaki güç kaybının değişimi ise yaklaşık 36. iterasyondan sonra sabitlenmiştir. Şekil 5'te verilen generatör çıkış güçlerinin yaklaşık P_4 'nin 11., P_1 ve P_2 'nin 35., P_3 , P_5 ve P_6 'nın 36. iterasyonda optimal değeri yakaladığı görülmektedir. Bir başka ifadeyle optimal değerler yaklaşık 11. iterasyon ile 36. iterasyonlar arasında yakalanmıştır. Sistemin yaklaşık 36. iterasyondan sonra optimal değeri yakaladığı ve o değerlerde sabit kaldığı söylenebilir.

Test sistemi için elde edilen optimal çözümler koyu olarak Tablo 4'te literatürdeki sonuçlarla birlikte verilmiştir. GPSO ile 6 generatörlü test sistemin çözümü yaklaşık 0.348 sn sürmüştür.

TABLE 4. Test sistemi için literatürdeki sonuçlar ve GPSO ile elde edilen optimal çözüm değerleri.

Bara No	MPSO [2]	NAPSO [1]	PSO [5]	GA [5]	SA [14]	TS [14]	MTS [14]	GPSO
$P_1(MW)$	446,4869	446,4232	447,4970	474,8066	478,1258	459,0753	448,1287	447,1130
$P_2(MW)$	168,6612	172,6080	173,3221	178,6363	163,0249	185,0675	172,8082	173,0900
$P_3(MW)$	265,0000	262,6183	263,4745	262,2089	261,7143	264,2094	262,5932	262,0440
$P_4(MW)$	139,4927	142,7752	139,0594	134,2826	125,7665	138,122	136,9605	141,8220
$P_5(MW)$	164,0036	164,6650	165,4761	151,9039	153,7056	154,4716	168,2031	165,2370
$P_6(MW)$	91,7465	86,3230	87,1280	74,1812	93,7965	74,9900	87,3304	86,3411
$\sum P_i(MW)$	1275,3911	1275,4131	1276,0100	1276,0300	1276,1339	1275,9400	1276,0232	1275,6471
$P_{kayıp}(MW)$	12,3736	12,4131	12,9584	13,0217	13,1317	12,9422	13,0205	12,6476
$F_{toplam}(R/h)$	15443,092	15443,765	15450,000	15459,000	15461,100	15454,890	15450,060	15446,549

Tablo 4 incelendiğinde 6 generatörlü test sistemi için GPSO ile elde edilen toplam yakıt maliyetinin literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında genetik algoritma (GA), benzetim tavlama (SA), çoklu tabu arama (MTS), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve yeni parçacık sürü optimizasyonu (NPSO) ile elde edilen değerlerden daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca GPSO ile elde edilen toplam yakıt maliyetinin yeni adaptif parçacık sürü optimizasyonu (NAPSO) ve geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu (MPSO) elde edilen değerlerine ise yakınsadığı görülmektedir.

4.2. Test sistemi-II: 15 generatörlü sistem. GPSO ile 15 generatörlü test sistemi 2630 MW yük talebi için çözülmüştür. Problemin çözümü 300 iterasyonda

tamamlanmıştır. Problemden kullanılan yakıt maliyet fonksiyonu katsayıları, artırma /azaltma ve aktif güç üretim sınırları Tablo 5'te, enerji iletim hatlarının kayıplarının hesaplanmasında kullanılan B kayıp matrisi değerleri Tablo 6'da ve yasak işletim bölgeleri Tablo 7'de verilmiştir [1,2,5,14].

GPSO'nun 15 generatörlü test sistemine uygulanmasından elde edilen toplam yakıt maliyeti değerlerinin, iletim hattı kayıplarının ve generatörlerin çıkış güçlerinin iterasyonlara göre değişimini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 6, 7 ve 8'de verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde toplam yakıt maliyetinin yaklaşık 55. iterasyonda minimum değeri yakaladığı görülmektedir. Şekil 7'de verilen iletim hatlarındaki güç kaybının değişimi ise yaklaşık 119. iterasyondan sonra sabitlenmiştir.

TABLO 5. Üretim birimlerinin maliyet katsayıları, artırma/azaltma ve aktif güç üretim sınırları.

Bara No (i)	a	b	c	UR (MW/h)	DR (MW/h)	P ⁰ (MW)	P ^{min} (MW)	P ^{max} (MW)
1	0,000299	10,1	671	80	120	400	150	455
2	0,000183	10,2	574	80	120	300	150	455
3	0,001126	8,8	374	130	130	105	20	130
4	0,001126	8,8	374	130	130	100	20	130
5	0,000205	10,4	461	80	120	90	150	470
6	0,000301	10,1	630	80	120	400	135	460
7	0,000364	9,8	548	80	120	350	135	465
8	0,000338	11,2	227	65	100	95	60	300
9	0,000807	11,2	173	60	100	105	25	162
10	0,001203	10,7	175	60	100	110	25	160
11	0,003586	10,2	186	80	80	60	20	80
12	0,005513	9,9	230	80	80	40	20	80
13	0,000371	13,1	225	80	80	30	25	85
14	0,001929	12,1	309	55	55	20	15	55
15	0,004447	12,4	323	55	55	20	15	55

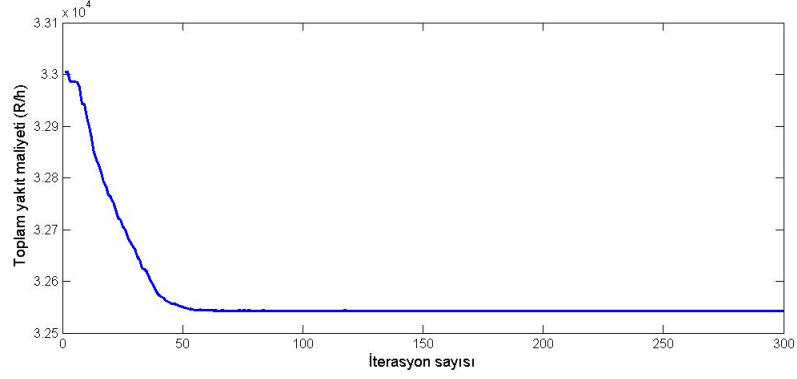
Şekil 8'de verilen generatör çıkış güçlerinin en düşük 3. iterasyonda 1 (P_6), en yüksek olarak da 119. iterasyonda 1 adet üretim birimi (P_{10}) optimal çalışma değerini yakalamıştır. Dolayısıyla optimal çalışma değerleri 3. iterasyon ile 119. iterasyonlar arasında yakalanmıştır. Sistemin 119. iterasyondan sonra optimal değeri yakaladığı ve generatör çıkış güçlerinin sabit kaldığı söylenebilir.

TABLO 6. B kayıp matrisi değerleri.

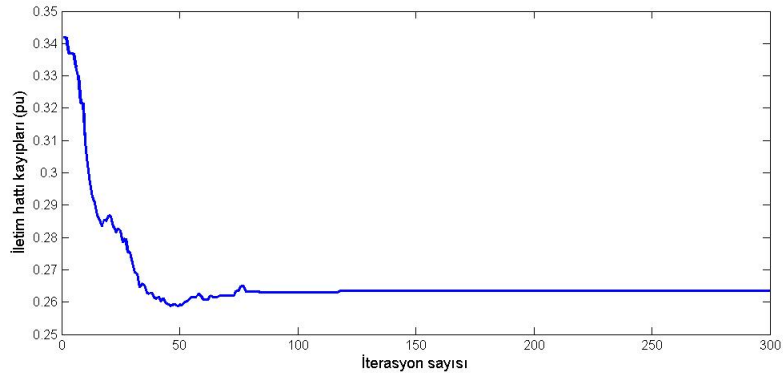
		B-Katsayıları																
		1,4	1,2	0,7	-0,1	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,5	-0,3	-0,2	0,4	0,3	-0,1	
		1,2	1,5	1,3	0,0	-0,5	-0,2	0,0	0,1	-0,2	-0,4	-0,4	-0,4	0,0	0,4	1,0	-0,2	
		0,7	1,3	7,6	-0,1	-1,3	-0,9	-0,1	0,0	-0,8	-1,2	-1,7	0,0	-2,6	11,1	-2,8	-2,8	
		-0,1	0,0	-0,1	3,4	-0,7	-0,4	1,1	5,0	2,9	3,2	-1,1	0,0	0,1	0,1	-2,6	-2,6	
		-0,3	-0,5	-1,3	-0,7	9,0	1,4	-0,3	-1,2	-1,0	-1,3	0,7	-0,2	-0,2	-2,4	-0,3	-0,3	
		-0,1	-0,2	-0,9	-0,4	1,4	1,6	0,0	-0,6	-0,5	-0,8	1,1	-0,1	-0,2	-1,7	0,3	0,3	
		-0,1	0,0	-0,1	1,1	-0,3	0,0	1,5	1,7	1,5	0,9	-0,5	0,7	0,0	-0,2	-0,8	-0,8	
		-0,1	0,1	0,0	5,0	-1,2	-0,6	1,7	16,8	8,2	7,9	-2,3	-3,6	0,1	0,5	-7,8	-7,8	
		-0,3	-0,2	-0,8	2,9	-1,0	-0,5	1,5	8,2	12,9	11,6	-2,1	-2,5	0,7	-1,2	-7,2	-7,2	
		-0,5	-0,4	-1,2	3,2	-1,3	-0,8	0,9	7,9	11,6	20,0	-2,7	-3,4	0,9	-1,1	-8,8	-8,8	
		-0,3	-0,4	-1,7	-1,1	0,7	1,1	-0,5	-2,3	-2,1	-2,7	14,0	0,1	0,4	-3,8	16,8	16,8	
		-0,2	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,1	0,7	-3,6	-2,5	-3,4	0,1	5,4	-0,1	-0,4	2,8	2,8	
		0,4	0,4	-2,6	0,1	-0,2	-0,2	0,0	0,1	0,7	0,9	0,4	-0,1	10,3	-10,1	2,8	2,8	
		-0,3	1,0	11,1	0,1	-2,4	1,7	-0,2	0,5	-1,2	-1,1	-3,8	-0,4	-10,1	57,8	-9,4	-9,4	
		-0,1	-0,2	-2,8	-2,6	-0,3	0,3	-0,8	-7,8	-7,2	-8,8	16,8	2,8	2,8	-9,4	128,3	128,3	
		$[B] = 0,001 *$																
		$[B_0] = 0,001 * [$	-0,1	2,8	-0,1	0,1	-0,3	-0,2	-0,2	0,6	3,9	-1,7	0,0	-3,2	6,7	-6,4]		
		$[B_{00}] = 0,0055$																

TABLO 7. Yasak işletim bölgeleri.

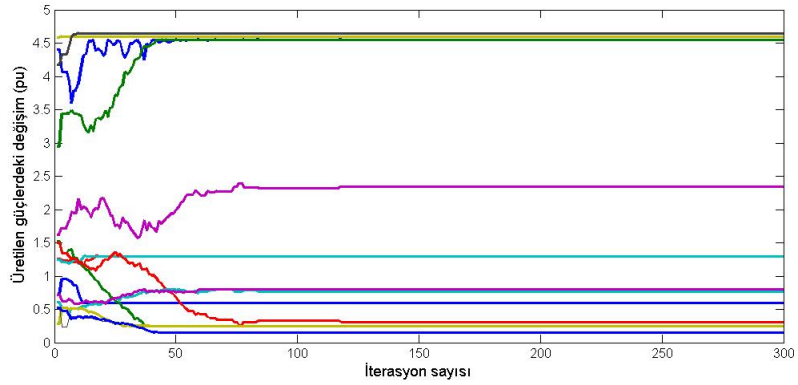
Bara No	Bölge-I	Bölge-II	Bölge-III
2	[185,225]	[305,335]	[420,450]
5	[180,200]	[305,335]	[390,420]
6	[230,255]	[365,395]	[430,455]
12	[30,40]	[55,65]	-



ŞEKİL 6. Toplam yakıt maliyetinin iterasyonlara göre değişimi.



ŞEKİL 7. İletim hattı kayıplarının iterasyonlara göre değişimi.



ŞEKİL 8. Üretilen güçlerin iterasyonlara göre değişimi.

Test sistemi için elde edilen optimal çözüm değerleri koyu olarak Tablo 8'de literatürdeki sonuçlarla birlikte verilmiştir. Test sistemin GPSO ile çözümü 5,108 sn'de tamamlanmıştır.

TABLE 8. Test sistemi için literatürdeki sonuçlar ve GPSO ile elde edilen optimal çözüm değerleri.

Bara No	MP SO [2]	NAP SO [1]	PSO [5]	GA [5]	SA [14]	TS [14]	MTS [14]	GPSO
$P_1(MW)$	455,0000	454,9999	450,2978	455,0000	453,6646	453,5374	453,9922	454,9800
$P_2(MW)$	380,0000	454,9999	440,0000	440,0000	377,6091	371,9761	379,7434	455,0000
$P_3(MW)$	130,0000	130,0000	118,1179	119,5719	120,3744	129,7823	130,0000	130,0000
$P_4(MW)$	130,0000	130,0000	122,4839	117,9836	126,2668	129,3411	129,9232	130,0000
$P_5(MW)$	170,0000	234,2005	270,0000	270,0000	165,3048	169,5950	168,0877	230,7520
$P_6(MW)$	460,0000	460,0000	284,0404	324,8959	459,2455	457,9928	460,0000	460,0000
$P_7(MW)$	430,0000	464,9999	430,0000	314,1524	422,8619	426,8879	429,2253	465,0000
$P_8(MW)$	92,7278	60,0000	151,2743	140,3805	126,4025	95,1680	104,3097	60,0000
$P_9(MW)$	43,0282	25,0000	111,3938	113,2752	54,4742	76,8439	35,0358	25,0000
$P_{10}(MW)$	140,1938	30,9939	75,1117	128,6250	149,0879	133,5044	155,8829	32,5759
$P_{11}(MW)$	80,0000	76,7014	50,4559	63,2303	77,9594	68,3087	79,8994	77,9697
$P_{12}(MW)$	80,0000	79,9999	44,6579	44,1564	73,9489	79,6815	79,9037	79,9919
$P_{13}(MW)$	27,6403	25,0000	47,3174	77,2804	25,0022	28,3082	25,0220	25,0000
$P_{14}(MW)$	20,7610	15,0000	37,1838	25,7138	16,0636	17,7661	15,2586	15,0000
$P_{15}(MW)$	22,2724	15,0000	35,0895	34,0248	15,0196	22,8446	15,0796	15,0000
$\sum P_i(MW)$	2661,6235	2656,8959	2667,4000	2668,3000	2663,2900	2661,5300	2661,3600	2656,2695
$P_{\text{kayıp}}(MW)$	29,9780	26,8959	37,3329	3832499	33,2737	31,4100	31,3523	26,2694
$F_{\text{toplam}}(R/h)$	32738,417	32548,585	33020,000	33149,000	32786,400	32762,120	32716,870	32542,784

Tablo 8 incelendiğinde ise GPSO ile elde edilen toplam yakıt maliyetinin literatürdeki bütün sonuçlardan daha iyi olduğu görülmektedir.

5. Sonuçlar

Çalışmada yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım probleminin çözümü için 6 ve 15 generatörlü test sistemlerine GPSO uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların, literatürde verilen sonuçlara yakınsadığı ve birçok metottan daha iyi olduğu görülmüştür.

GPSO basit ve kolay kodlanabilir bir algoritma olup yasak işletim bölgesi ekonomik güç dağıtım probleminin çözümüne kolayca uygulanabilmiştir. Çalışmada klasik PSO'nun problemlerin çözümünde sıkıntıya düştüğü durumlarda GPSO'nun kolayca çözüme ulaştığı gösterilmiştir. Sonuç olarak kısıt sayısının fazla olduğu gerçek problemlerin çözümünde GPSO algoritmasının kullanılmasının daha avantajlı olduğu söylenebilir. İleride yapılacak çalışmalarda önerilen GPSO algoritması valf nokta etkili konveks olmayan ekonomik güç dağıtım problemlerine ve kısa dönem hidrotermal güç dağıtım problemlerine uygulanacaktır.

Kaynaklar

- [1] T. Niknam, H. D. Mojarrad and H. Z. Meymand, Non-smooth economic dispatch computation by fuzzy and self adaptive particle swarm optimization, *Applied Soft Computing* **11** (2011), 2805–2817.
- [2] M. Neyestani, M. M. Farsangi and H. Nezamabadi-pour, A modified particle swarm optimization for economic dispatch with non-smooth cost functions, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **23** (2010), 1121–1126.
- [3] A. Safari and H. Shayeghi, Iteration particle swarm optimization procedure for economic load dispatch with generator constraints, *Expert Systems with Applications* **38** (2011), 6043–6048.
- [4] A. I. Selvakumar and K. Thanushkodi, A new particle swarm optimization solution to non-convex economic dispatch problems, *IEEE Transaction on Power Systems* **22** (2007), 41–51.
- [5] Z. L. Gaing, Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints, *IEEE Transaction on Power Systems* **18** (2003), 1187–1195.
- [6] T. Niknam, H. D. Mojarrad, H. Z. Meymand and B. B. Firouzi, A new honey bee mating optimization algorithm for non-smooth economic dispatch, *Energy* **36** (2011), 896–908.
- [7] S. O. Orero and M. R. Irving, Economic dispatch of generators with prohibited operating zones: A genetic algorithm approach, *IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution* **143** (1996), 529–534.
- [8] J. X. V. Neto, D. L. A. Bernert and L. S. Coelho, Improved quantum-inspired evolutionary algorithm with diversity information applied to economic dispatch problem with prohibited operating zones, *Energy Conversion and Management* **52** (2011), 8–14.
- [9] P. Somasundaram, K. Kuppusamy and R. P. Kumuudini Devi, Economic dispatch with prohibited operating zones using fast computation evolutionary programming algorithm, *Electric Power Systems Research* **70** (2004), 245–252.
- [10] T. Javabarathi, G. Sadasivam and V. Ramachandran, Evolutionary programming based economic dispatch of generators with prohibited operating zones, *Electric Power Systems Research* **52** (1999), 261–266.
- [11] L. G. Papageorgiou and E. S. Fraga, A mixed integer quadratic programming formulation for the economic dispatch of generators with prohibited operating zones, *Electric Power Systems Research* **77** (2007), 1292–1296.

- [12] B. K. Panigrahi, S. R. Yadav, S. Agrawal and M. K. Tiwari, A clonal algorithm to solve economic load dispatch, *Electric Power Systems Research* **77** (2007), 1381–1389.
- [13] A. Bhattacharya and P. K. Chattopadhyay, Solving complex economic load dispatch problems using biogeography based optimization, *Expert Systems with Applications* **37** (2010), 3605–3615.
- [14] S. Pothiya, I. Ngamroo and W. Kongprawechnon, Application of multiple tabu search algorithm to solve dynamic economic dispatch considering generator constraints, *Energy Conversion and Management* **49** (2008), 506–516.
- [15] C. L. Chen, Non-convex economic dispatch : A direct search approach, *Energy Conversion and Management* **48** (2007), 219–225.
- [16] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation Operation and Control*, New York-Wiley, 1996.
- [17] L. Wang and C. Singh, Environmental/economic power dispatch using a fuzzified multi-objective particle swarm optimization algorithm, *Electric Power Systems Research* **77** (2007), 1654-1664.
- [18] M. A. Abido, Multiobjective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem, *Electric Power Systems Research* **79** (2009), 1105–1113.
- [19] L. Wang and C. Singh, Reserve-constrained multiarea environmental/economic dispatch based on particle swarm optimization with local search, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **22** (2009), 298-307.
- [20] A. Mahor, V. Prasad and S. Rangnekar, Economic dispatch using particle swarm optimization: A review, *Electric Power Systems Research* **13** (2009), 2134–2141.
- [21] J. Cai, X. Ma, Q. Li and H. Peng, A multi-objective chaotic particle swarm optimization for environmental/economic dispatch, *Energy Conversion and Management* **50** (2009), 1318–1325.
- [22] L. Wang and C. Singh, Stochastic combined heat and power dispatch based on multi-objective particle swarm optimization, *Electric Power and Energy Systems* **30** (2008), 226–234.
- [23] T. Cura, *Modern Sezgisel Teknikler ve Uygulamaları*, Papatya Yayıncılık Eğitim, 2008.
- [24] D. Karaboğa, *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, Atlas Yayın Dağıtım, 2004.
- [25] S. Özyön, C. Yaşar and H. Temurtaş, Particle swarm optimization algorithm applied to environmental economic power dispatch problems consisting of thermal units, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Electrical & Electronics Technologies Papers* **4** (2011), 175–180.