

VALF NOKTA ETKİLİ KONVEKS OLMAYAN EKONOMİK GÜÇ DAĞITIM PROBLEMLERİNİN HARMONİ ARAMA ALGORİTMASIYLA ÇÖZÜMÜ

Serdar ÖZYÖN^{1,*}, Celal YAŞAR², Hasan TEMURTAŞ³

¹Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, KÜTAHYA, ^{1,*}serdarozyon@dpu.edu.tr

²Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, KÜTAHYA, ²cyasar@dpu.edu.tr

³Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, KÜTAHYA, ³hemurtas@dpu.edu.tr

Geliş Tarihi: 18.10.2011 Kabul Tarihi: . .2012

ÖZET

Literatürde ekonomik güç dağıtım problemleri konveks ve konveks olmayan olarak iki grupta incelenmektedir. Bu çalışmada valf nokta etkili konveks olmayan ekonomik güç dağıtım probleminin çözümü için harmoni arama algoritması (HAA) kullanılmıştır. Bu tür problemlerde yakıt maliyet eğrisi sinüzoidal dalgalanmalar şeklinde artmaktadır. Problemin çözümünde hat kayıplarının hesaplanması için B kayıp matrisi kullanılmıştır. Toplam yakıt maliyeti elektriksel kısıtlar altında minimize edilmiştir. HAA metodu 6 baralı 3 generatörlü, 14 baralı 5 generatörlü (IEEE) ve 30 baralı 6 generatörlü (IEEE) olmak üzere üç farklı test sistemine uygulanmıştır. MATLAB R2010a’da bir program geliştirilerek test sistemlerinin çözümleri elde edilmiştir. Bulunan optimal çözüm değerleri, literatürde farklı metotlar uygulanarak bulunan optimal çözüm değerleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ekonomik güç dağıtımı, Valf nokta etkileri, Konveks olmayan fonksiyonlar, Harmoni arama algoritması.

SOLUTION TO NONCONVEX ECONOMIC DISPATCH PROBLEM WITH VALVE POINT EFFECT BY HARMONY SEARCH ALGORITHM

ABSTRACT

In literature, economic power dispatch problems are generally categorized as convex and nonconvex optimization problems. In this study, harmony search algorithm (HSA) has been used for the solution of the economic dispatch problem with valve point effect. In these this kind of problems, fuel cost curve increases as sinusoidal oscillations. In the solution of the problem B loss matrix has been used for the calculation of the line losses. Total fuel cost has been minimized under electrical constraints. HSA method has been applied to three different test systems one with 6 buses 3 generators, the other with 14 buses 5 generators (IEEE) and the last one with 30 buses 6 generators (IEEE). The solution of the test systems have been obtained by improving a programme in MATLAB R2010a. The obtained optimum solution values have been compared with optimum solution values obtained by the application of different methods in literature and the results of them have been discussed.

Keywords: Economic power dispatch, Valve point effects, Non-convex functions, Harmony search algorithm.

1. GİRİŞ

Ekonomik güç dağıtım problemi, güç sistemlerinin işletimlerinde en önemli konulardan biridir. Elektrik üretiminde kullanılan yakıtın üretim maliyetleri üzerinde önemli bir miktara ulaşması, elektrik üreten şirketleri yakıtı daha verimli kullanmaya yönlendirmiştir. Böylece elektrik üretim sistemlerinin ekonomik olarak işletimleri gündeme gelmiştir. Literatürde ekonomik güç dağıtım problemi, sistemdeki mevcut yükün sistemin kısıtları altında toplam yakıt maliyetini minimum yapmak için üretim birimlerinin aktif güç çıkışlarının ayarlanması olarak tanımlanmaktadır. Bu tür problemlerde toplaam yakıt maliyetinin hesaplanması için üretim birimlerine ait yakıt maliyet fonksiyonu eğrileri kullanılmaktadır [1,2].

Geleneksel olarak her bir üretim birimi için yakıt maliyeti fonksiyonu valf nokta etkileri ihmal edildiğinde yaklaşık olarak ikinci dereceden bir fonksiyonla gösterilmektedir. Bu şekildeki gösterim bulunan optimal çözümün hatalı olmasına yol açmaktadır. Optimal çözümleri hatasız hale getirmek için probleme değişik fiziksel ve işletim kısıtları ilave edilirse problem fazlaca kısıtlı lineer olmayan optimizasyon problemine dönüşmektedir. Valf nokta etkili ekonomik güç dağıtım problemi de bu problemlerden biri olup konveks olmayan karakteristiğe sahip ve optimal çözümünün bulunması oldukça zor olan bir problemdir [3-5].

Çok vanalı buhar tribünlerinden oluşan termik üretim birimlerinde maliyet fonksiyonu konveks olmayan bir fonksiyondur. Bu üretim birimleri için kullanılan maliyet fonksiyonu sinüzoidal dalgalanmalar şeklindedir [6,7].

Çeşitli konveks olmayan ekonomik güç dağıtım problemlerine literatürde birçok algoritma ile çözüm aranmıştır. Bunlardan bazıları modifiye edilmiş alt gradyent (MAG) ve harmoni arama (HA) algoritmalarının birleşiminden oluşan hibrid algoritma (MAGHA) [1], geliştirilmiş genetik algoritma (GGA) ve Newton'un ikinci derece yaklaşımını kullanan yeni hibrid arama algoritması (YHAA) [2], diferansiyel gelişim algoritması (DGA) [3,4], büyük patlama-büyük sıkıştırma optimizasyon algoritması (BP-BŞ) [5], bölümlene yaklaşım algoritması (BYA) [6], parçacık sürü optimizasyonu veya geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu (PSO veya GPSO) [7,8], eşeysiz çoğalma algoritması (EÇA) [9], hibrid genetik algoritma (HGA) [10], geliştirilmiş diferansiyel gelişim algoritması (GDGA) [11], evrimsel algoritması (EA) [12] ve yapay arı koloni (YAK) algoritması [13] şeklinde belirtilebilir.

Bu çalışmada sürekli ve ayrık optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan, oldukça az kontrol parametresine sahip, son yıllarda tasarlanmasına rağmen kısa sürede birçok alanda uygulaması yapılmış HAA metodu kullanılarak valf nokta etkili konveks olmayan ekonomik dağıtım probleminin çözümü yapılmıştır.

2. EKONOMİK GÜÇ DAĞITIMI

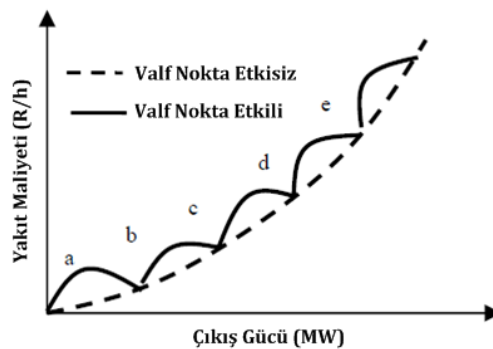
Ekonomik güç dağıtımının çözümü, sistem kısıtları altında toplam yakıt maliyetinin minimize edilmesiyle bulunur. Bu da denklem (1)'de verilen optimizasyon probleminin amaç fonksiyonudur [1,14].

$$\min F_{Toplam} = \min \sum_{n=1}^N F_n(P_{G,n}) \quad (1)$$

Üretim birimlerine ait yakıt maliyet fonksiyonu Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekilde kesik çizgiyle gösterilmiş grafik konveks yakıt maliyet fonksiyonu olup denklem (2)'de ifade edildiği gibi her bir birim için aktif güç üretiminin 2. derece fonksiyonu olarak alınmıştır [1,14].

$$F_n(P_{G,n}) = a_n + b_n P_{G,n} + c_n P_{G,n}^2, (R/h) \quad (2)$$

Denklemden $F_n(P_{G,n})$ 'nin n. üretim biriminin yakıt maliyet fonksiyonunu, a_n , b_n ve c_n sırasıyla n. üretim biriminin maliyet fonksiyonu katsayılarını, $P_{G,n}$ n. üretim biriminin çıkış gücünü göstermektedir.



Şekil-1. Üretim birimlerinin giriş-çıkış karakteristikleri

Gerçekte çok valfli buhar tribünlü üretim birimlerinin giriş-çıkış eğrisi denklem (2)'deki eşitlikle karşılaştırıldığında çok farklıdır. Üretim biriminin yakıt maliyetine valf nokta etkisinin de dahil edilmesi, yakıt maliyetinin gösterimini daha uygun hale getirmektedir. Şekil 1'de koyu çizgilerle gösterildiği gibi valf noktası sinüzoidal dalgalanmalarla sonuçlandırıldığından, yakıt maliyet fonksiyonu doğrusal olmayan daha yüksek diziler içermektedir. Bu yüzden valf nokta etkilerini dikkate alabilmek için yapılan çalışmalarda denklem (2) yerine aşağıdaki denklemdeki konveks olmayan fonksiyon kullanılmıştır [1-4].

$$F_n(P_{G,n}) = a_n + b_n P_{G,n} + c_n P_{G,n}^2 + \left| e_n \cdot \sin(f_n (P_{G,n}^{\min} - P_{G,n})) \right|, (R/h) \quad (3)$$

Denklemde e_n ve f_n ise valf nokta etkisini gösteren n . üretim birimi maliyet fonksiyonu katsayılarıdır. Denklem (2), (3)'de $P_{G,n}$ 'nin birimi MW olarak alınmaktadır. Kayıplı sistemdeki aktif güç eşitlik kısıtı denklem (4)'teki gibi alınmıştır.

$$P_{yük} + P_{kayıp} - \sum_{n=1}^N P_{G,n} = 0 \quad (4)$$

Üretim birimlerinin çalışma sınır değerleri aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$P_{G,n}^{\min} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\max}, (n \in N) \quad (5)$$

Sistemin iletim hatlarında meydana gelen güç kayıpları, B kayıp matrisi ile denklem (6) kullanılarak hesaplanmaktadır [1-4].

$$P_{kayıp} = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^N P_{G,n} \cdot B_{nj} \cdot P_{G,j} + \sum_{n=1}^N B_{0n} \cdot P_{G,n} + B_{00} \quad (6)$$

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.

3. HARMONİ ARAMA ALGORİTMASI (HAA)

Optimizasyon tekniği olarak kullanılan ve ilk olarak Geem ve diğerleri tarafından geliştirilen harmoni arama algoritması, bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları notalar ile armonik açıdan en iyi melodinin elde edilmesi prensibine dayanmaktadır [15-19].

Harmoni arama tekniği aşağıda belirtilen avantajlara sahiptir.

- Karar değişkenleri için özel bir başlangıç çözümü gerekli değildir.
- Birden fazla çözümle optimizasyon işlemine devam ettiği için yerel optimum çözümlere takılmaz.
- Yöntem için sürekli değişkenler kullanılma zorunluluğu yoktur, ayrık değişkenlerde kullanılabilir.

Harmoni arama algoritması hesaplama mantığı bakımından genetik algoritma (GA)'ya benzemektedir. Fakat HAA'daki yeniden üretim aşamasındaki varsayımlar GA'dan farklıdır. GA ile yeni bir karar değişkeninin oluşturulmasında toplum içerisindeki iki adet birey kullanılırken HAA metodunda oluşturulan yeni birey toplum içindeki tüm bireylerin özelliklerini taşıyabilmektedir. Ayrıca HAA'da bir iterasyonun tamamlanması GA'ya göre daha hızlıdır. Harmoni arama algoritmasıyla bir optimizasyon probleminin çözümü problemin kurulması, harmoni belleğinin oluşturulması, yeniden üretim, belleğin güncellenmesi ve durma koşulu kontrolü gibi beş adımda yapılmaktadır [15-19].

Adım 1. Problemin Kurulması ve Çözüm Parametrelerinin Belirlenmesi

Optimizasyon problemine ait amaç fonksiyonu denklem (7)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\min \{f(x)\} \quad x_i \in X_i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (7)$$

Denklemde $f(x)$ minimize edilecek fonksiyonunu, x_i her karar değişkeni için kullanılan çözüm uzayını ve N ise toplam karar değişkeni sayısını göstermektedir. Harmoni arama algoritmasına ait çözüm parametreleri ise

harmoni belleği kapasitesi (HBK), harmoni belleğini dikkate alma oranı (HBDAO) ve ton ayarlama oranı (TAO) şeklinde belirlenir [15-19].

Adım 2. Harmoni Belleğinin Oluşturulması

Tanımlanan çözüm uzayı içerisinde tamamı rasgele olarak üretilmiş karar değişkenleri ile harmoni belleği doldurulur ve bu çözümlere karşılık gelen amaç fonksiyonu değerleri denklem (8)'e göre hesaplanır [15-19].

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HBK-1} & x_2^{HBK-1} & \cdots & x_{N-1}^{HBK-1} & x_N^{HBK-1} \\ x_1^{HBK} & x_2^{HBK} & \cdots & x_{N-1}^{HBK} & x_N^{HBK} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} f(x^1) \\ f(x^2) \\ \vdots \\ f(x^{HBK-1}) \\ f(x^{HBK}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Adım 3. Yeniden Üretim: Yeni Harmoni Oluşturulması

Yeni harmoni vektörü $x' = (x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_N)$, harmoni belleğindeki tonlara göre ve tamamen rastgele seçilen tonlara göre üretilmektedir. Harmoni belleğinde bulunan tonlara göre, yeni harmoni vektörüne ait ilk karar değişkeni (x'_1) mevcut harmoni belleği (x_1, \dots, x_1^{HBK}) içerisindeki herhangi bir değerden rastgele olarak seçilmektedir. Diğer karar değişkenlerinin ($x'_2, x'_3, x'_4, \dots, x'_N$) seçilmesi ise aynı şekilde yapılmaktadır. Değişkenlerin harmoni belleğinden seçilip seçilmeyeceğinin belirlenmesi, değeri 0 ile 1 arasında değişen HBDAO oranına göre yapılmaktadır. Burada, HBDAO bir karar değişkeninin değerinin mevcut harmoni belleğinden seçilme olasılığını gösterirken, (1-HBDAO) oluşturulan yeni karar değişkeninin mevcut çözüm uzayı içerisinde rastgele olarak seçilmesine karşılık gelmektedir. Seçim işleminin yapılma şekli aşağıdaki denklemde verilmiştir [15-19].

$$x'_i = \begin{cases} x_i \in \{x_i^1, x_i^2, x_i^3, \dots, x_i^{HBK}\} & \text{HBDAo olasılığı durumu} \\ x_i \in X_i & (1-HBDAO) \text{ olasılığı durumu} \end{cases} \quad (9)$$

Bu işlemden sonra, ton ayarlama işleminin gerekli olup olmadığı belirlenir. Bunun için her karar değişkeninin değerlendirilmesi ton ayarlama oranı olan TAO parametresi ile denklem (10)'a göre yapılmaktadır [15-19].

$$x'_i = \begin{cases} x_i \pm Rnd\{0,1\} \times bw & \text{TAO olasılığı durumu} \\ x_i & (1-TAO) \text{ olasılığı durumu} \end{cases} \quad (10)$$

Denklemde bw rastgele seçilmiş band genişliğini Rnd (0,1) 0 ile 1 arasında üretilmiş rastgele sayıyı göstermektedir. Denklemde görüldüğü gibi, TAO olasılığı olması durumunda x'_1 karar değişkeni $x_i \pm Rnd\{0,1\} \times bw$ ile değiştirilmekte, buna karşın 1-TAO olması durumunda ise hiçbir şey yapılmamaktadır.

HBDAO ve TAO parametreleri algoritmanın sırasıyla genel ve yerel optimum çözümleri elde etmesinde tetikleyici rol oynamaktadır.

Adım 4. Harmoni Belleğinin Güncellenmesi

Bu adımda, yeni oluşturulan harmoni $x' = (x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_N)$ ile bellekteki en kötü harmoni arasında amaç fonksiyonlarının değerleri bakımından karşılaştırma işlemi yapılmaktadır. Yeni oluşturulan harmoni vektörünün en kötü harmoniden daha iyi sonuç vermesi durumunda, en kötü harmoni vektörü bellekten çıkarılır ve yeni harmoni vektörü onun yerine atanır [15-19].

Adım 5. Durma Koşulunun Kontrolü

Bu adımda verilen durma koşulunun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Koşulun sağlanmaması durumunda yeniden üretim, yeni harmoni oluşturulması, değişkenlerin harmoni belleğinden seçilip seçilmeyeceği (HBDAO), ton ayarlama (TAO) ve harmoni belleğinin güncellenmesi adımları tekrar edilir.

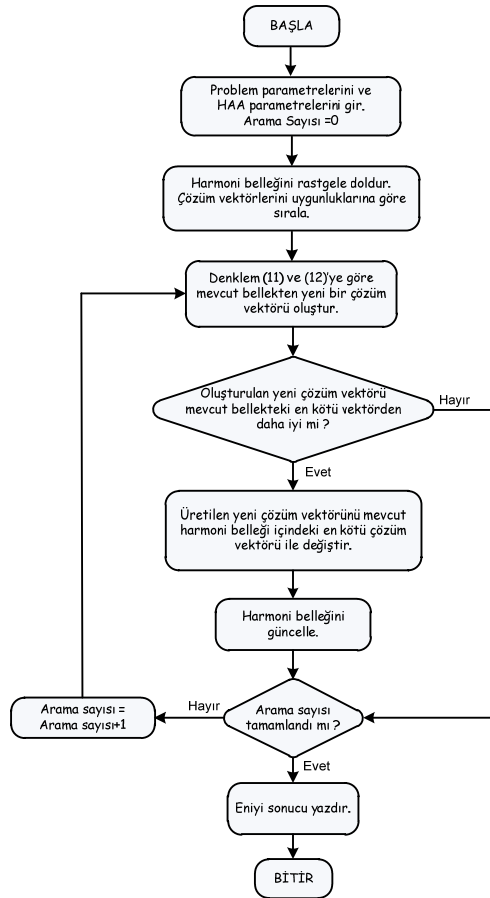
Durma koşulu sağlandığında en iyi sonuç alınarak arama sonlandırılır [15-19]. Harmoni arama optimizasyon algoritmasının akış diyagramı Şekil 2’de verilmiştir.

4. HARMONİ ARAMA ALGORİTMASININ PROBLEME UYGULANMASI

Bu bölümde HAA’nin valf nokta etkili konveks olmayan ekonomik güç dağıtım problemi uygulanması anlatılmıştır. Başlangıç sürecinde harmoni belleği rassal olarak çözüm vektörleriyle doldurulur. M çözüm vektörü (toplam karar değişkeni) için $P_{G,n}$ denklem (5)’de verilen eşitliği sağlayacak biçimde rassal olarak seçilir. Bir bireyin bileşeni başlangıç olarak aşağıdaki denklem kullanılarak bulunur [3, 13].

$$P_{G,n} = P_{G,n}^{\min} + Rnd(0,1) \times (P_{G,n}^{\max} - P_{G,n}^{\min}) \quad (11)$$

Denklem (4)’te verilen aktif güç eşitlik kısıtını sağlamak için harmoni belleğinin oluşturulması önemlidir. Aktif güç eşitlik kısıtının sağlanması için üretim gücü $P_{G,l}$ olan l. bağımlı generatör rassal olarak seçilir. Bağımlı generatör gücü $P_{G,l}^{eski}$ ’nin değeri başlangıç durumunda $P_{kayıp}^{eski} = P_{kayıp}^{ilk} = 0$ alınarak denklem(12)’den hesaplanır [3, 13].



Şekil 2. Harmoni arama algoritmasının akış şeması

$$P_{G,l}^{eski} = P_{yük} + P_{kayıp} - \sum_{n \in N_{G,l} \setminus \{G\}} P_{G,n} \quad (12)$$

$P_{G,l}^{eski}$ 'ninde bulunmasıyla denklem (6)'dan $P_{kayıp}^{yeni}$ hesaplanır. Buna göre $P_{G,l}^{yeni}$ 'nin değeri aşağıdaki eşitlikten tekrar hesaplanır.

$$P_{G,l}^{yeni} = P_{G,l}^{eski} + P_{kayıp}^{yeni} - P_{kayıp}^{eski} \quad (13)$$

Bu işlem denklem (14)'deki eşitlikte kontrol edilir ve Hata TOL_{hata} değerinin altında olduğunda denklem (4) eşitliği de sağlanmış olur.

$$Hata = \left| P_{kayıp}^{yeni} - P_{kayıp}^{eski} \right|, \quad Hata \leq TOL_{hata} \quad (14)$$

Bu durumda elde edilen $P_{G,l}^{yeni}$ değerinin denklem (5) kısıtını sağlayıp sağlamadığına bakılır. Eğer sağlıyorsa işleme devam edilir. Eğer sağlamıyorsa denklem (11) eşitliğine dönülerek rassal atama işlemi yeniden yapılır.

Denklem (5)'deki kısıt sağlanıyorsa yeniden üretim için vektörler denklem (9)'a göre seçilir, denklem (10)'a göre ton ayarlama işlemi yapılır. Bu işlemlerden sonra denklem (5)'deki eşitsizlik kısıtını sağlamayan bireyler aşağıdaki denkleme göre güncellenir [3, 13].

$$P_{G,n} = \begin{cases} P_{G,n}^{\min} & \text{eğer } P_{G,n} < P_{G,n}^{\min} \\ P_{G,n}^{\max} & \text{eğer } P_{G,n} > P_{G,n}^{\max} \end{cases} \quad (15)$$

Daha sonra harmoni belleğinin güncellemesi yapılır ve durma işlemi kontrol edilir. Durma koşulu sağlandığında (arama sayısı tamamlandığında) algoritma durdurulur. Literatür karşılaştırmalarında durma kriteri olarak genellikle iterasyon sayısı kullanılmıştır. Bu nedenle yapılan çalışmada arama sayısı, belirlenen bir iterasyon sayısı ve harmoni belleği kapasitesinin çarpımıyla elde edilmiştir. Arama sayısı tamamlandıktan sonra en iyi değere sahip çözüm en uygun çözüm olarak yazdırılır.

5. ÖRNEK PROBLEM ÇÖZÜMLERİ

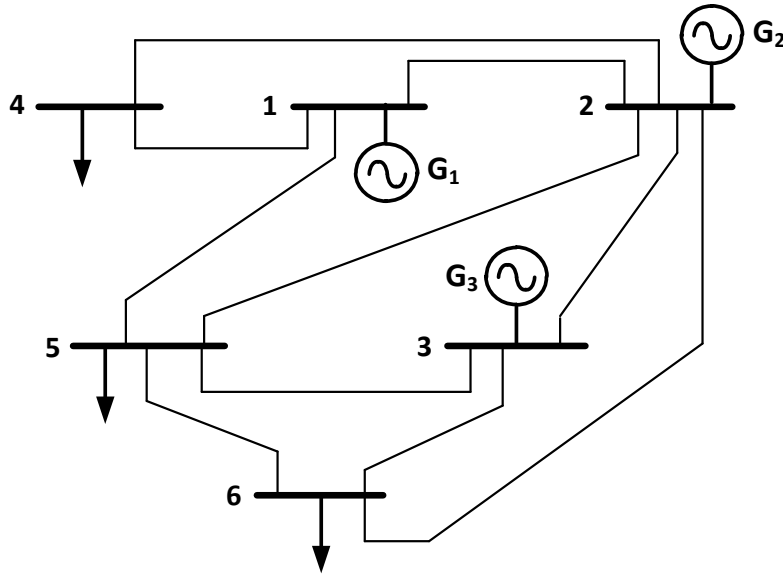
HAA metodu sırasıyla 6 baralı 3 generatörlü test sistemine 210 MW, 14 baralı 5 generatörlü (IEEE) test sistemine 259 MW ve 30 baralı 6 generatörlü (IEEE) test sistemine 283.4 MW yük talepleri için ayrı ayrı uygulanmıştır. HAA metodu ile elde edilen tüm sonuçlar literatürdeki diğer sonuçlarla birlikte verilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışma için AMD 64 X2 Dual Core 2.3 GHz işlemcili ve 4 GB RAM bellekli bir bilgisayarda MATLAB R2010a'da HAA için bir program geliştirilerek aynı koşullarda test sistemlerinin çözümleri elde edilmiştir.

HAA algoritmasının çözüm parametreleri harmoni belleği kapasitesi (HBK) 25, harmoni belleğini dikkate alma oranı (HBDAO) 0,9, ton ayarlama oranı (TAO) 0,1, iterasyon sayısı 100, arama sayısı 2500 ve denklem (14)'deki kayıp hesabında kullanılan hata toleransı $TOL_{hata} = 1 \times 10^{-6}$ MW olarak alınmıştır.

5.1. Test Sistemi I: 6 Baralı 3 Generatörlü Sistem

HAA algoritması Şekil 3'te tek hat diyagramı verilen 6 baralı 3 generatörlü test sistemine [14] 210 MW yük talebi için uygulanmıştır. Test sisteminin çözümünde kullanılan üretim birimlerine ait maliyet fonksiyonu ve aktif güç üretim sınırları ile B kayıp matrisi değerleri sırasıyla Çizelge 1 ve 2'de verilmiştir.



Şekil 3. 6 baralı 3 generatörlü test sistemi tek hat diyagramı (Sistem-I)

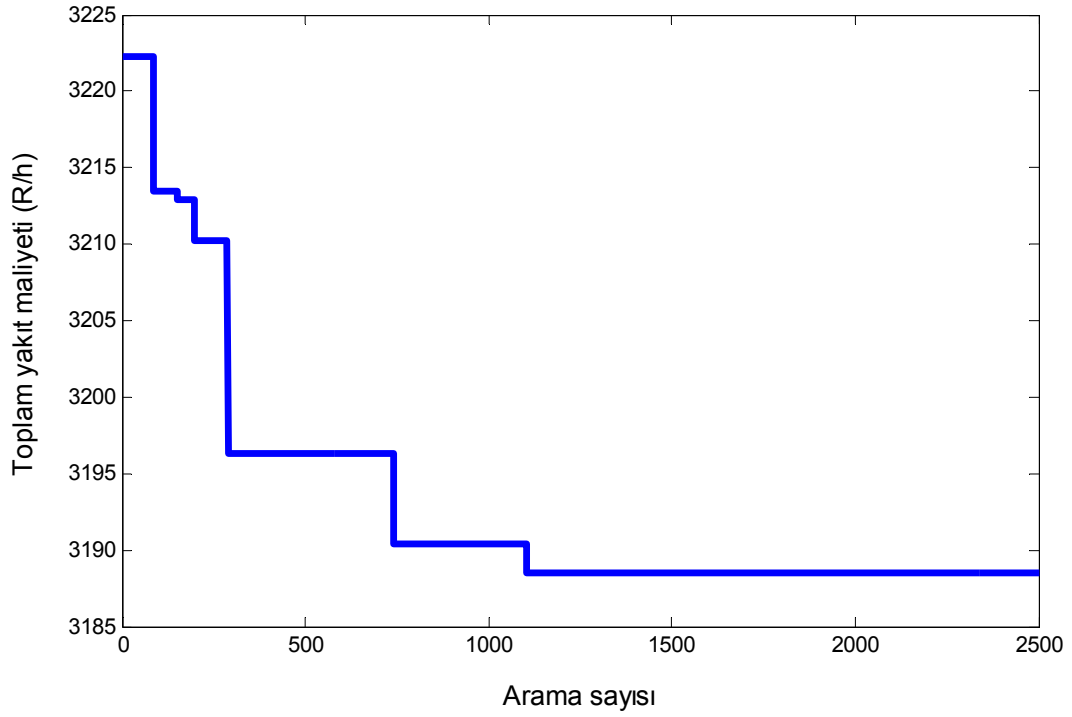
Çizelge 1. Üretim birimlerinin maliyet fonksiyonu katsayıları ve aktif güç üretim sınırları (Sistem-I)

Bara No	1	2	3
a	213,1	200,0	240,0
b	11,669	10,333	10,833
c	0,00533	0,00889	0,00741
e	130	90	100
f	0,0635	0,0598	0,0685
P _{min} (MW)	50	37,5	45
P _{max} (MW)	200	150	180

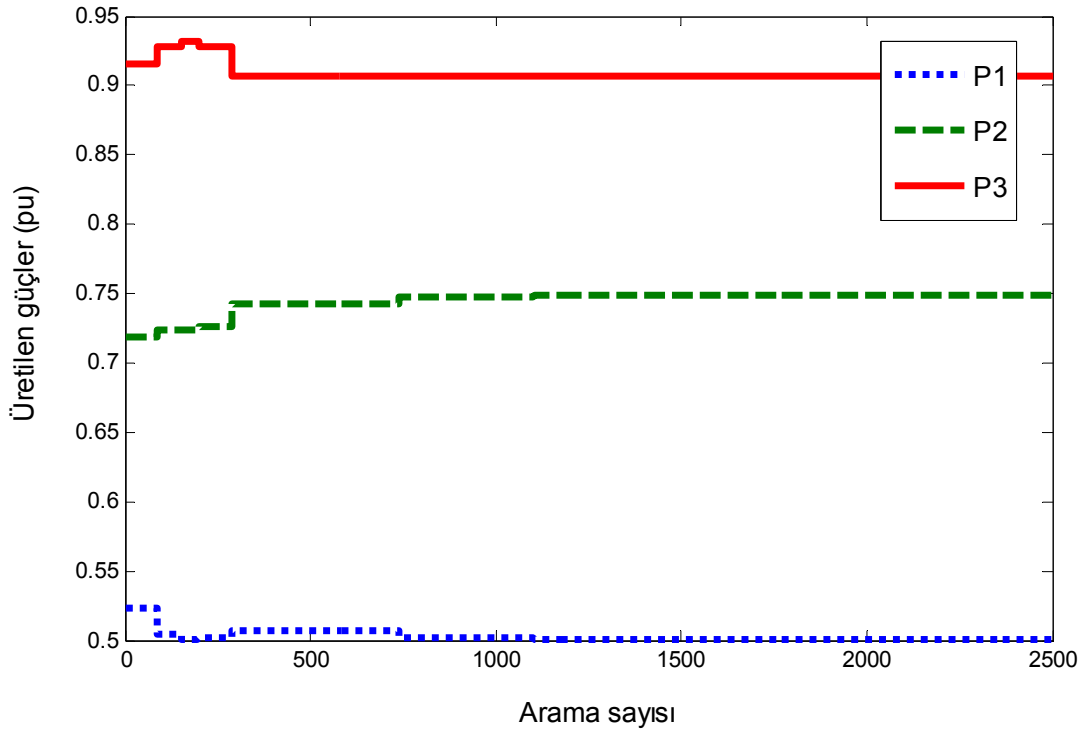
Çizelge 2. B kayıp matrisi değerleri (Sistem-I)

$$[B] = \begin{bmatrix} 0.0552 & 0.0062 & -0.0046 \\ 0.0062 & 0.0253 & 0.0064 \\ -0.0046 & 0.0064 & 0.0286 \end{bmatrix}$$
$$[B_0] = [0.0046 \quad 0.0035 \quad 0.0019]$$
$$[B_{00}] = 0.00055711$$

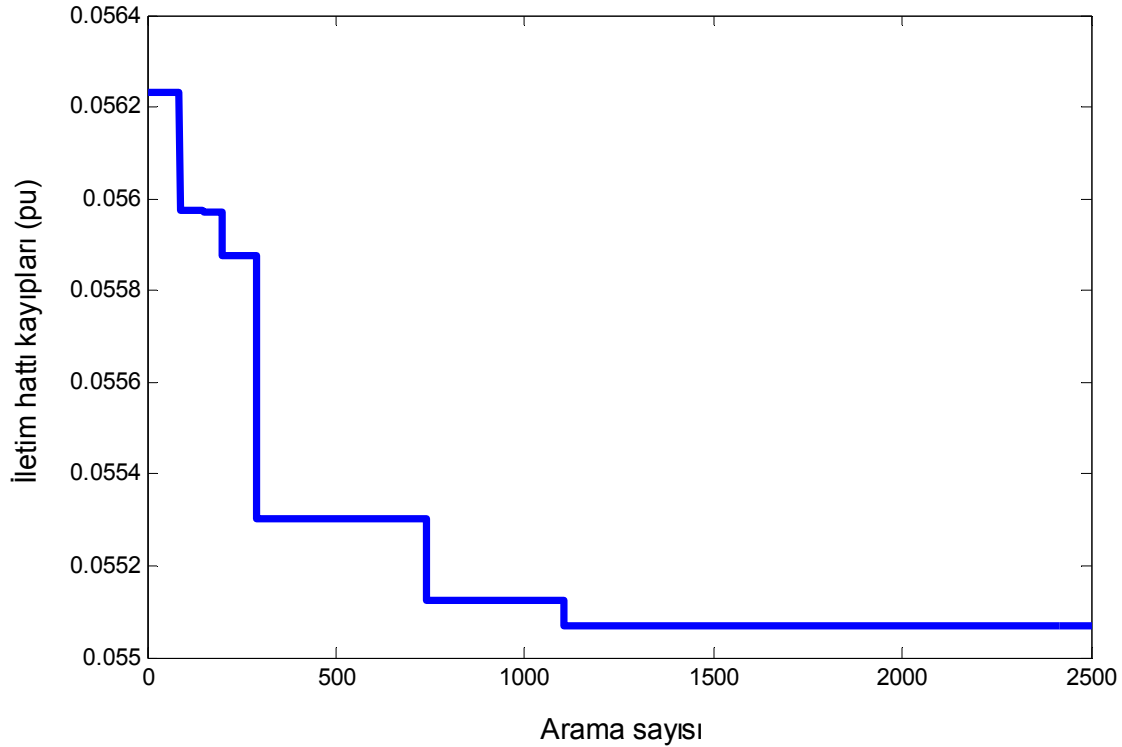
HAA algoritmasıyla yapılan çözümde problemin amaç fonksiyonu olan toplam yakıt maliyetinin üretim birimlerinin çıkış güçlerinin ve iletim hattı kayıplarının arama sayısına göre değişimlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 4, 5 ve 6'da verilmiştir.



Şekil 4. Toplam yakıt maliyetinin arama sayısına göre değişim (Sistem-I)



Şekil 5. Üretim birimlerinin çıkış güçlerinin arama sayısına göre değişimleri (Sistem-I)



Şekil 6. İletim hattı kayıplarının arama sayısına göre değişimi (Sistem-I)

Şekil 4’te yakıt maliyetindeki değişimin ve Şekil 5’te üretim birimlerinin çıkış güçlerinin değişimlerinin yaklaşık olarak 600. arama sayısından sonra eş zamanlı olarak artık değişmediği gözlemlenmektedir. Bu durumda yapılan aramanın doğruluğunun yanında, çözümün 600. aramadan sonra optimal sonuca yakınsandığı söylenebilir. Ayrıca beklendiği gibi iletim hattı kayıplarının da 600. arama sayısından sonra 5,5111 MW’a oturduğu Şekil 6’dan görülmektedir.

HAA algoritmasıyla yapılan bu test sisteminin çözümünden elde edilen optimal sonuçlar ve üretim birimlerinin çıkış güç değerleri literatürdeki sonuçlarla birlikte Çizelge 3’te verilmiştir.

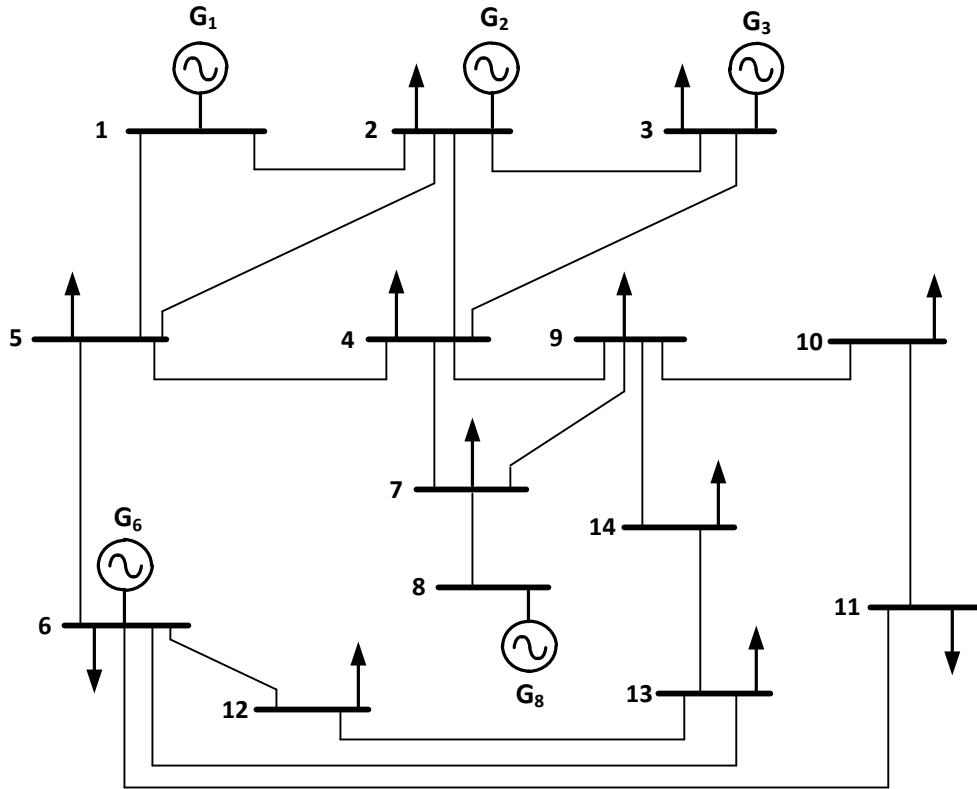
Çizelge 3. Elde edilen optimal sonuçlar (Sistem-I)

Bara No	GA [1,2]	GGA [1,2]	YHAA [1,2]	DGA [3]	YAK [13]	PSO [1]	HAA
$P_{G,1}$ (MW)	53,260	61,646	50,000	50.000	50,032	50.4739	50,016
$P_{G,2}$ (MW)	88,964	95,163	86,067	74.652	74,820	74.1958	74,762
$P_{G,3}$ (MW)	74,769	60,540	79,711	90.862	90,655	90.8627	90,732
$\sum P_{G,n}$ (MW)	216,994	217,350	215,779	215.515	215,509	215.5324	215,511
F_{toplam} (R/h)	3252,457	3341,771	3205,990	3187.891	3188,870	3189.82	3188,449
$P_{kayıp}$ (MW)	6,9939	7,3460	5,7797	5.5515	5,5090	5.5324	5,5111
Süre (s)	1,0310	0,812	0,0140	0.6904	2,6755	0.3117	0,6885

Çizelge 3 incelendiğinde HAA algoritmasından elde edilen optimal sonuçlar diğer sonuçlarla karşılaştırıldığında toplam yakıt maliyetinin (DGA ile bulunan değer hariç) daha iyi olduğu görülmektedir. Fakat DGA ile elde edilen değerlere yakın olduğu söylenebilir.

5.2. Test Sistemi II: 14 Baralı 6 Generatörlü Sistem

HAA algoritması Şekil 7’de tek hat diyagramı verilen 14 baralı 6 generatörlü (IEEE) test sistemine 259 MW yük talebi için uygulanmıştır. Test sisteminin çözümünde kullanılan üretim birimlerine ait maliyet fonksiyonu katsayıları ve aktif güç üretim sınırları ile B kayıp matrisi değerleri sırasıyla Çizelge 4 ve 5’te verilmiştir.



Şekil 7. 14 baralı 6 generatörlü test sistemi tek hat diyagramı (Sistem-II)

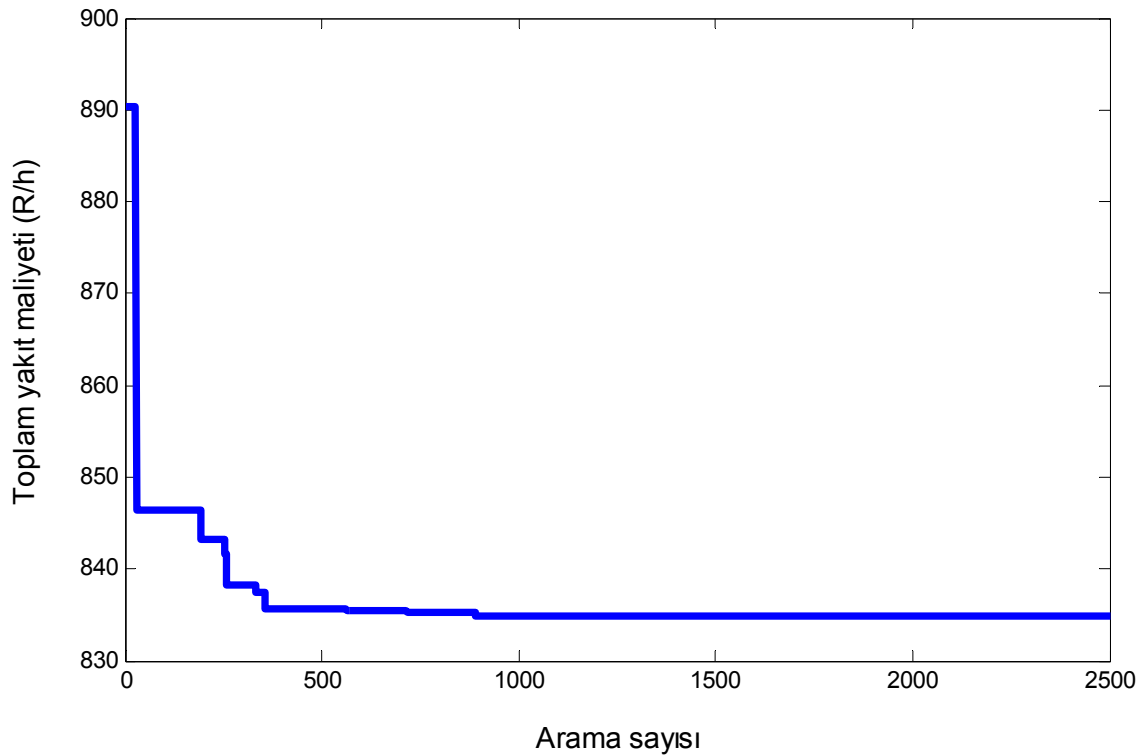
Çizelge 4. Üretim birimlerinin maliyet fonksiyonu katsayıları ve aktif güç üretim sınırları (Sistem-II)

Bara No	1	2	3	6	8
a	150,0	25,0	0,0	0,0	0,0
b	2,00	2,50	1,00	3,25	3,00
c	0,0016	0,0100	0,0625	0,00834	0,025
e	50,0	40,0	0,0	0,0	0,0
f	0,0630	0,0980	0,0	0,0	0,0
P_{min} (MW)	50	20	10	10	10
P_{max} (MW)	200	80	35	35	30

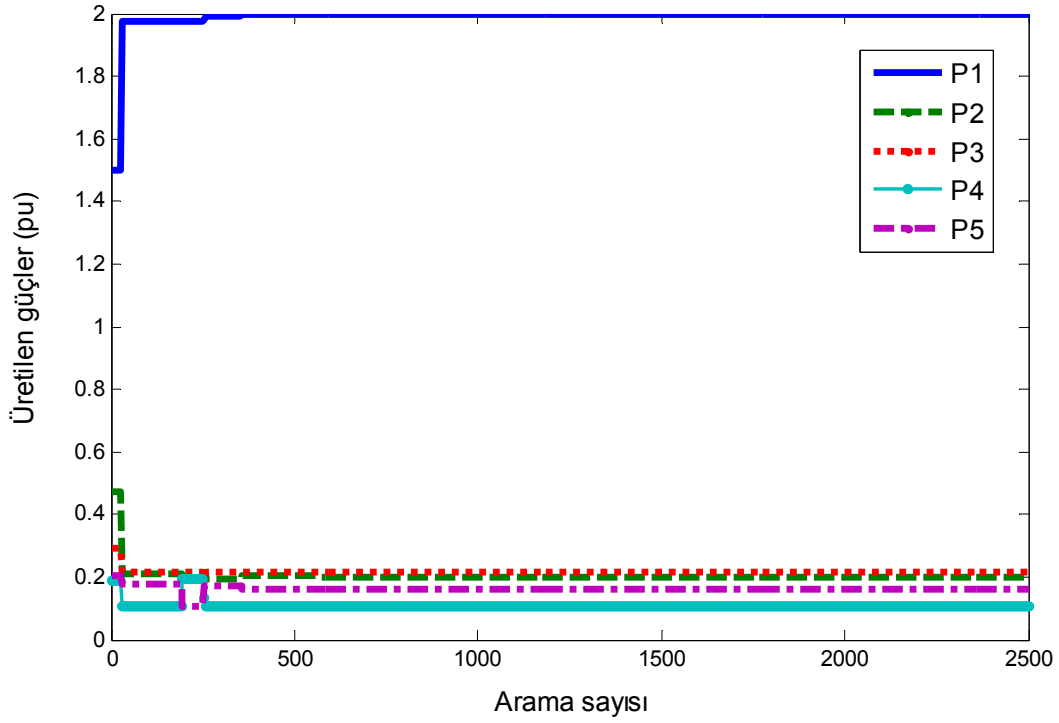
Çizelge 5. B kayıp matrisi değerleri (Sistem-II)

$[B]$	$=$	$\begin{bmatrix} 0.0212 & 0.0085 & -0.0009 & 0.0021 & 0.0007 \\ 0.0085 & 0.0206 & -0.0041 & 0.0037 & 0.0001 \\ -0.0009 & -0.0041 & 0.0395 & -0.0207 & -0.0251 \\ 0.0021 & 0.0037 & -0.0207 & 0.0613 & -0.0071 \\ 0.0007 & 0.0001 & -0.0251 & -0.0071 & 0.0406 \end{bmatrix}$
$[B_0]$	$=$	$[-0.0002 \quad 0.0030 \quad -0.0017 \quad 0.0101 \quad -0.0038]$
$[B_{00}]$	$=$	0.00085357

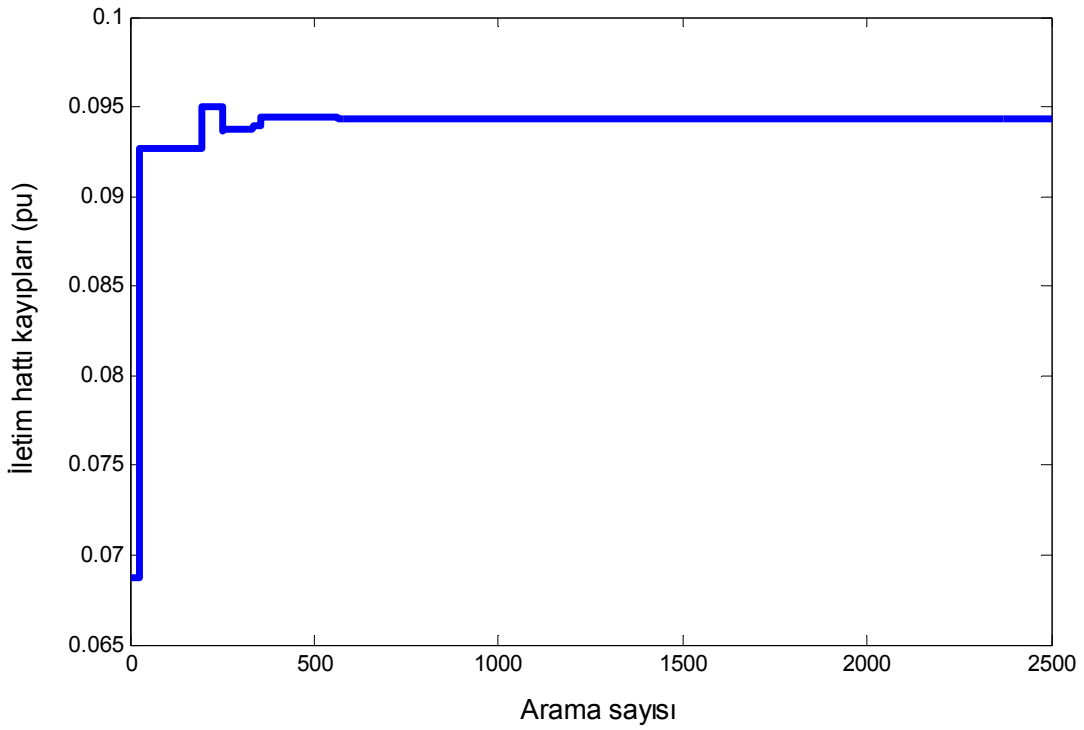
HAA algoritmasıyla yapılan çözümde toplam yakıt maliyetinin, üretim birimlerinin çıkış güçlerinin ve iletim hattı kayıplarının arama sayısına göre değişimlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 8, 9 ve 10'da verilmiştir.



Şekil 8. Toplam yakıt maliyetinin arama sayısına göre değişim (Sistem-II)



Şekil 9. Üretim birimlerinin çıkış güçlerinin arama sayısına göre değişimleri (Sistem-II)



Şekil 10. İletim hattı kayıplarının arama sayısına göre değişimi (Sistem-II)

Şekil 8’de toplam yakıt maliyetindeki değişimin ve Şekil 9’da üretim birimlerinin çıkış güçlerinin değişimlerinin yaklaşık 1250. arama sayısından sonra eş zamanlı olarak değişmediği gözlemlenmektedir. Bu durumda yapılan aramanın doğruluğunun yanında, çözümün 1250. aramadan sonra optimal sonuca yakınsandığı söylenebilir. Ayrıca beklendiği gibi iletim hattı kayıplarının da 1250. arama sayısından sonra 9,5904 MW’a yakınsadığı Şekil 10’dan görülmektedir.

HAA algoritmasıyla yapılan bu test sisteminin çözümünden elde edilen optimal sonuçlar ve üretim birimlerinin çıkış güç değerleri literatürdeki sonuçlarla birlikte Çizelge 6’da verilmiştir.

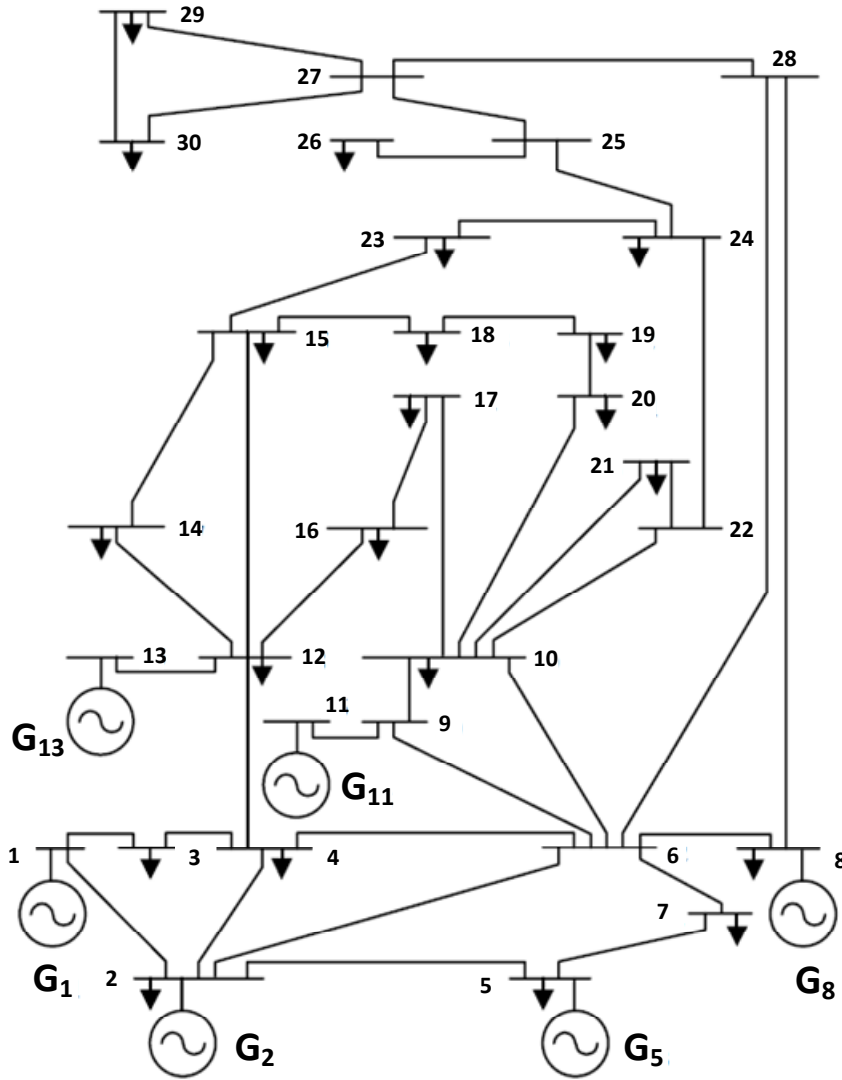
Çizelge 6. Elde edilen optimal sonuçlar (Sistem-II)

Bara No	GA [1,2]	GGA [1,2]	YHAA [1,2]	DGA [3]	YAK [13]	PSO [1]	HAA
$P_{G,1}$ (MW)	172,764	172,764	181,128	199.299	199,595	197.4696	199,599
$P_{G,2}$ (MW)	26,621	26,621	46,756	20.000	20,000	20.000	20,000
$P_{G,3}$ (MW)	24,832	24,832	19,152	20.999	19,445	21.3421	18,904
$P_{G,6}$ (MW)	23,415	23,415	10,187	15.432	19,662	11.6762	16,486
$P_{G,8}$ (MW)	19,188	19,188	10,771	12.521	10,000	17.7744	13,600
$\sum P_{G,n}$ (MW)	266,821	266,821	267,997	268.553	268,703	268.2623	268,590
F_{toplam} (R/h)	926,553	926,553	905,543	834.130	834,649	836.4568	834,457
$P_{kayıp}$ (MW)	7,8250	7,8250	8,9977	9.5532	9,7034	9.2623	9,5904
Süre (s)	0,3910	0,3910	0,0150	0.6706	2,1038	0.3484	0,6939

Çizelge 6 incelendiğinde HAA algoritmasından elde edilen optimal sonuçlar diğer sonuçlarla karşılaştırıldığında toplam yakıt maliyetinin (DGA ile bulunan değerler hariç) daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca DGA ile elde edilen değerlere yakın olduğu söylenebilir.

5.3. Test Sistemi III: 30 Baralı 6 Generatörlü Sistem

HAA algoritması son olarak Şekil 11’de tek hat diyagramı verilen 30 baralı 6 generatörlü (IEEE) test sistemine 283,4 MW yük talebi için uygulanmıştır. Test sisteminin çözümünde kullanılan üretim birimlerine ait maliyet fonksiyonu ve aktif güç üretim sınırları ile B kayıp matrisi değerleri sırasıyla Çizelge 7 ve 8’de verilmiştir.



Şekil 11. 30 baralı 6 generatörlü test sistemi tek hat diyagramı (Sistem-III)

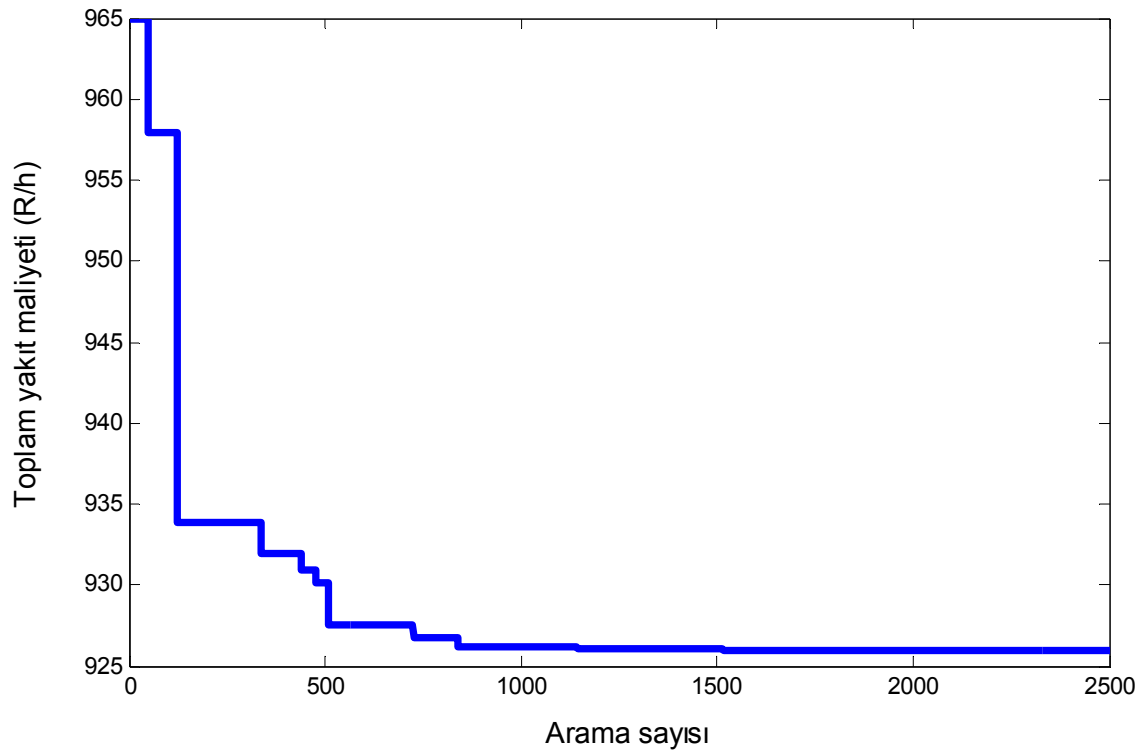
Çizelge 7. Üretim birimlerinin maliyet fonksiyonu katsayıları ve aktif güç üretim sınırları (Sistem-III)

Bara No	1	2	5	8	11	13
a	150,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0
b	2,00	2,50	1,00	3,25	3,00	3,00
c	0,0016	0,0100	0,0625	0,00834	0,025	0,025
e	50,0	40,0	0,0	0,0	0,0	0,0
f	0,0630	0,0980	0,0	0,0	0,0	0,0
P_{min} (MW)	50	20	15	10	10	12
P_{max} (MW)	200	80	50	35	30	40

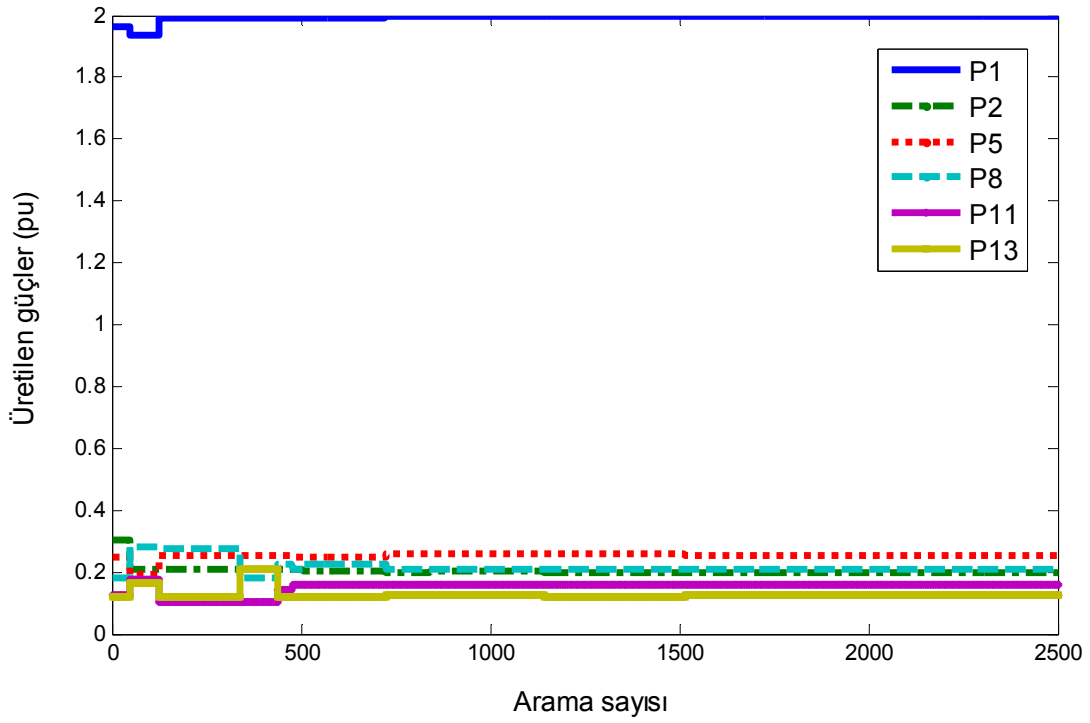
Çizelge 8. B kayıp matrisi değerleri (Sistem-III)

$$[B] = \begin{bmatrix} 0.0224 & 0.0103 & 0.0016 & -0.0053 & 0.0009 & -0.0013 \\ 0.0103 & 0.0158 & 0.0010 & -0.0074 & 0.0007 & 0.0024 \\ 0.0016 & 0.0010 & 0.0474 & -0.0687 & -0.0060 & -0.0350 \\ -0.0053 & -0.0074 & -0.0687 & 0.3464 & 0.0105 & 0.0534 \\ 0.0009 & 0.0007 & -0.0060 & 0.0105 & 0.0119 & 0.0007 \\ -0.0013 & 0.0024 & -0.0350 & 0.0534 & 0.0007 & 0.2353 \end{bmatrix}$$
$$[B_0] = [-0.0005 \quad 0.0016 \quad -0.0029 \quad 0.0060 \quad 0.0014 \quad 0.0015]$$
$$[B_{00}] = 0.0011$$

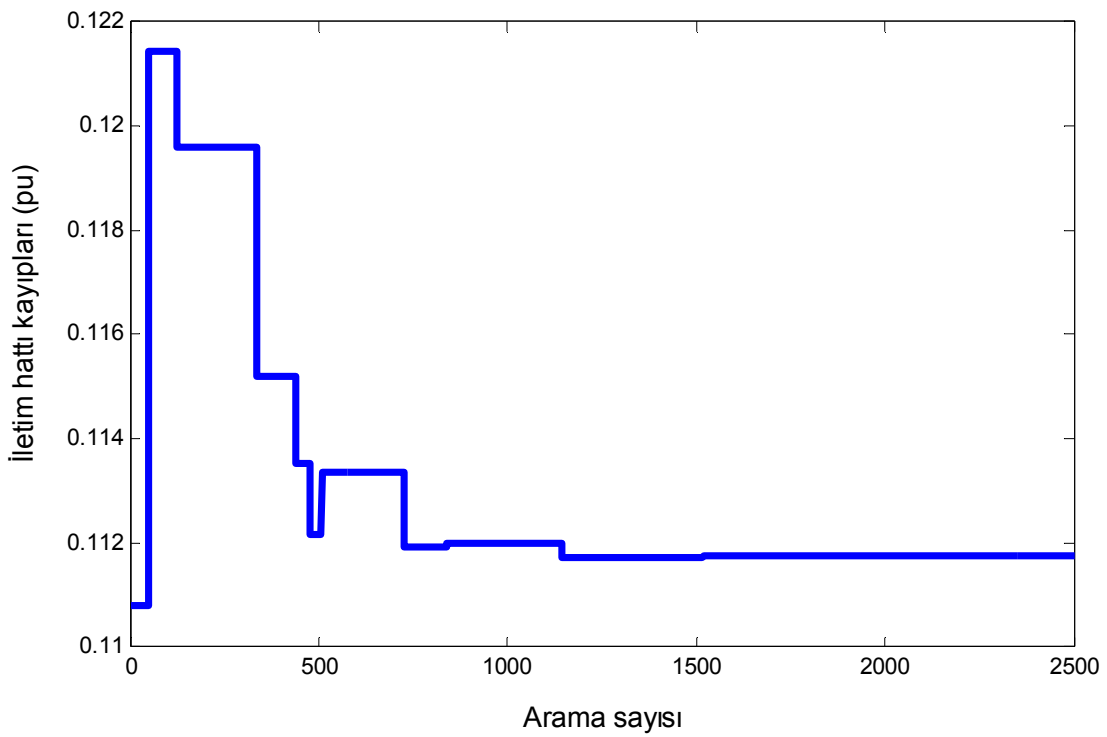
HAA algoritmasıyla yapılan çözümde toplam yakıt maliyetinin, üretim birimlerinin çıkış güçlerinin ve iletim hattı kayıplarının arama sayısına göre değişimlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 12, 13 ve 14’de verilmiştir.



Şekil 12. Toplam yakıt maliyetinin arama sayısına göre değişim (Sistem-III)



Şekil 13. Üretim birimlerinin çıkış güçlerinin arama sayısına göre değişimleri (Sistem-III)



Şekil 14. İletim hattı kayıplarının arama sayısına göre değişimi (Sistem-III)

Şekil 12’de toplam yakıt maliyetindeki değişimin ve Şekil 13’de üretim birimlerinin çıkış güçlerinin değişimlerinin yaklaşık 500. arama sayısından sonra eş zamanlı olarak değişmediği gözlemlenmektedir. Bu durumda yapılan aramanın doğruluğunun yanında, çözümün 500. aramadan sonra optimal sonuca yakınsandığı söylenebilir. Ayrıca beklendiği gibi iletim hattı kayıplarının da 500. arama sayısından sonra 11,2234 MW’a oturduğu ve değişmediği Şekil 14’ten görülmektedir.

HAA algoritmasıyla yapılan bu test sisteminin çözümünden elde edilen optimal sonuçlar ve üretim birimlerinin çıkış güç değerleri literatürdeki sonuçlarla birlikte Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 9. Elde edilen optimal sonuçlar (Sistem-III)

Bara No	GA [1,2]	GGA [1,2]	YHAA [1,2]	DGA [3]	YAK [13]	PSO [1]	HAA
$P_{G,1}$ (MW)	150,724	133,981	182,478	149.732	199,562	197.86483	199,606
$P_{G,2}$ (MW)	60,870	37,215	48,352	52.056	20,000	50.3374	20,000
$P_{G,5}$ (MW)	30,896	37,767	19,855	26.227	26,647	15.000	25,010
$P_{G,8}$ (MW)	14,213	28,349	17,137	24.158	20,394	10.000	19,187
$P_{G,11}$ (MW)	19,488	18,792	13,667	23.572	10,000	10.000	15,134
$P_{G,13}$ (MW)	15,915	38,052	12,348	16.995	18,280	12.000	15,684
$\sum P_{G,n}$ (MW)	292,109	294,160	293,839	292.742	294,884	295.2022	294,623
F_{toplam} (R/h)	996,036	1101,491	984,936	963.001	928,437	925.7581	925,852
$P_{kayıp}$ (MW)	8,7060	10,7563	10,4395	9.3425	11,4849	11.8022	11,2234
Süre (s)	0,5780	0,156	0,0150	0.6558	2,1194	0.3529	0,8264

Çizelge 9 incelendiğinde HAA algoritmasından elde edilen optimal sonuçlar diğer sonuçlarla karşılaştırıldığında toplam yakıt maliyetinin (PSO ile bulunan değerler hariç) daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca PSO ile elde edilen değerlere yakın olduğu söylenebilir.

6. SONUÇLAR

Çalışmada HAA, valf nokta etkili konveks olmayan ekonomik dağıtım probleminin çözümü için 6, IEEE’nin 14 ve 30 baralı test sistemlerine uygulanmıştır. HAA ile elde edilen sonuçların, literatürde verilen sonuçlara yakınsadığı bazılarından daha iyi olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sistem-I için HAA ile elde edilen toplam yakıt maliyetinin GA, GGA, YHAA, YAK ve PSO ile elde edilen değerlerden daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca HAA ile elde edilen toplam yakıt maliyeti DGA ile elde edilen değerden 0,558 R/h fazladır. Sistem-II için HAA ile elde edilen toplam yakıt maliyeti değerinin GA, GGA, YHAA, YAK ve PSO ile elde edilen değerlerden daha iyi olduğu, DGA ile elde edilen değere yakınsadığı görülmüştür. Sistem-III için HAA ile elde edilen toplam yakıt maliyeti değerinin GA, GGA, YHAA, YAK ve DGA ile elde edilen değerlerden daha iyi olduğu, ayrıca PSO ile elde edilen değere çok yakındır.

Sonuç olarak hızlı yakınsama özelliğine sahip, çok az miktarda parametre içeren, kolay kodlanabilir bir algoritma olan HAA’nin valf nokta etkili konveks olmayan ekonomik güç dağıtım probleminin çözümü için de kolayca uygulanabileceği gösterilmiştir.

HAA algoritması ileriki çalışmalarda geliştirilerek kısa dönem hidrotermal güç dağıtım problemlerine ve farklı yakıt sistemleri kullanan çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerine uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Yaşar, C., Özyön, S., "A new hybrid approach for nonconvex economic dispatch problem with valve-point effect", *Energy*, Volume 36, Issue 10, s.5838-5845, October 2011.
- [2] Malik T.N., Asar A., Wyne M.F., Akhtar S., "A new hybrid approach for the solution of nonconvex economic dispatch problem with valve-point effects", *Electric Power Systems Research*, Vol.80, No.9, s.1128-1136, 2010.
- [3] Özyön S., Yaşar C., Temurtaş H., "Diferansiyel gelişim algoritmasının valf nokta etkili konveks olmayan ekonomik güç dağıtım problemlerine uygulanması - Differential evolution algorithm approach to nonconvex economic power dispatch problems with valve point effect", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), *Electrical & Electronics Technologies Papers*, Vol.4, EAE-40, s.181-186, 16-18 May 2011, Elazığ, TURKEY.
- [4] Yuan X., Wang L., Zhang Y., Yuan Y., "A hybrid differential evolution method for dynamic economic dispatch with valve-point effects", *Expert systems with applications*, Vol.36, No.2, Part. 2, s.4042-4048, 2009.
- [5] Labbi Y., Attous D., "Big bang – big crunch optimization algorithm for economic dispatch with valve-point effect", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol.16, No.1, s.48-56, 2010.
- [6] Lin W.M., Gow H.J., Tsay M.T., "A Partition Approach Algorithm for nonconvex Economic Dispatch", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.29, No: 5, s. 432-438, 2007.
- [7] Selvekumar A.I., Thanushkodi K., "Anti-Predatory Particle Swarm Optimization: Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems", *Electrical Power Systems Research*, Vol.78, No.1, s. 2-10, 2008.
- [8] Chaturvedi K.T., Pandit M., Srivastava L., "Particle swarm optimization with time varying acceleration coefficients for non-convex economic power dispatch", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.31, No.6, s. 249-257, July 2009.
- [9] Panigrahi B.K., Yadav S.R., Tiwari M.K., "A clonal algorithm to solve economic load dispatch", *Electric Power Systems Research*, Vol.77, No.10, s.1381-1389, 2007.
- [10] Da-kuo H., Fu-li W., Zhi-zhong M., "Hybrid genetic algorithm for economic dispatch with valve-point effect", *Electric Power Systems Research*, Vol.78, s.626-633, 2008.
- [11] Guerrero R.E.P., Maldonado J.R.C., "Economic power dispatch with non-smooth cost functions using differential evolution", *Power Symposium 2005, NAPS 2005, Proceedings of the 37th Annual North American*, s.183-190, 2005.
- [12] Michalewicz Z., Schoenauer M., "Evolutionary algorithm for constrained parameter optimization problem", *Evolutionary Computation*, Vol.4, No.1, s.1-32, 1996.
- [13] Özyön, S., Yaşar, C., Özcan G., Temurtaş, H., "Valf nokta etkili konveks olmayan ekonomik güç dağıtım problemlerine yapay arı koloni algoritması (ABC) yaklaşımı - An artificial bee colony algorithm (ABC) approach to nonconvex economic power dispatch problems with valve point effect", *Ulusal Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu (FEEB 2011), Bildiri Kitabı-1*, s. 294-299, 05-07 Ekim 2011, Elazığ, TÜRKİYE.
- [14] Wood A. J., Wollenberg B. F., "Power Generation Operation and Control ", New York-Wiley, 1996.
- [15] Ayvaz M. T., Karahan, H., Gürarlan, G., "Su dağıtım şebekelerinin armoni araştırması optimizasyon tekniği ile optimum tasarımı" 5. Kentsel Altyapı Ulusal Sempozyumu, *Bildiriler Kitabı*, s.188-202, 2007.
- [16] Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV., "A new heuristic optimization algorithm: harmony search" *Simulation*, Vol.76, No.2, s.60-68, 2001.
- [17] Lee KS, Geem ZW. "A new structural optimization method based on the harmony search algorithm" *Computers and Structures*, Vol.82 No.9-10, s.781-798, 2004.
- [18] Lee KS, Geem ZW. "A new meta-heuristic algorithm for continues engineering optimization: harmony search theory and practice" *Computer Method Application Mech. Eng.*, Vol.194, s.3902–3933, 2004.
- [19] Mahdavi M, Fesanghary M, Damangir E. "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems" *Applied Mathematics and Computation*, vol.188, s.1567–1579, 2007.