



## HAM ENERJİ KAYNAĞI KISITLI BİRİM İÇEREN HİDROTERMAL GÜÇ SİSTEMLERİNDE ÇEVRESEL EKONOMİK GÜÇ DAĞITIMI PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

Serdar ÖZYÖN<sup>1</sup>, Celal YAŞAR<sup>1</sup>, Hasan TEMURTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Kütahya, serdarozyon@dpu.edu.tr, cyasar@dpu.edu.tr

<sup>2</sup>Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, Kütahya, htemurtas@dpu.edu.tr

*Geliş Tarihi: 18.12.2009*

*Kabul Tarihi: 18.03.2010*

### ÖZET

Bu çalışmada ham enerji kaynağı kısıtlı birim içeren hidrotermal güç sistemlerinde çevresel ekonomik güç dağıtım probleminin çözümü ele alınmıştır. Problemden toplam termik maliyet ile toplam  $NO_x$  emisyonunun minimum düzeye çekilmesinin yanında, hidrolik üretim birimlerinin her birinin istenilen miktarda suyu kullanması ve ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimin anlaşma gereği satın alınan gaz miktarını harcaması da sağlanmıştır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinden biri olan çevresel ekonomik güç dağıtım problemini tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürmek için ağırlıklı toplam metodu (*ATM*) kullanılmıştır. Tek amaçlı optimizasyon probleminin çözümü için genetik algoritma (*GA*) metodu seçilmiştir. Belirlenen örnek sistemde bir günlük işletim süresi göz önüne alınmıştır. Bu sistemin çözümü hem gaz kısıtlı hem de gaz kısıtsız olmak üzere ağırlık faktörü  $w$ 'nin farklı değerleri için tekrarlanmıştır. Elde edilen çözüm değerlerine göre toplam termik maliyet ve toplam  $NO_x$  emisyon değerleri değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Çevresel ekonomik güç dağıtım, Hidrotermal koordinasyon problemi, Ham enerji kaynağı kısıtlı birim, Ağırlıklı toplam metodu, Genetik algoritma.

## SOLUTION TO ENVIRONMENTAL ECONOMIC POWER DISPATCH PROBLEM IN HYDROTHERMAL POWER SYSTEMS WITH LIMITED ENERGY SUPPLY

### ABSTRACT

In this study, the solution of the environmental power dispatch problem in hydrothermal power systems that contain limited energy supply thermal units has been considered. In this problem, as well as the minimization of the total thermal cost and total  $NO_x$  emission, the use of the determined amount of water by the hydraulic generation units and the waste of the bought amount of gas for the limited energy supply thermal units have been provided. In order to convert the environmental economic power dispatch problem, which is one of the multi-objective optimization problems, into a single objective optimization problem weighted sum method (*WSM*) has been used. Genetic algorithm (*GA*) method has been applied to single objective optimization problem for the solution. The one-day operation period of the sample system is considered. Solution of the system is repeated for various values of  $w$  weight factor for both with gas constraint and without gas constraint. The obtained total thermal cost and total  $NO_x$  emission values have been evaluated.

**Key Words :** Environmental economic power dispatch, Hydrothermal coordination problem, Limited energy supply Weighted sum method, Genetic algorithm.

## 1. GİRİŞ

Enerji üretim sistemlerinin optimal bir şekilde işletimi ve planlaması enerji üretiminde çok önemli bir yer tutmaktadır. Klasik olarak bir enerji sisteminin optimal işletimi, harcanan yakıtın maliyetinin minimize edilmesi şeklindedir. Fakat günümüzde termal üretim birimlerinde çoğunlukla fosil kaynaklı *yakıtların* kullanılması, problemlerin çözümünde üretim birimlerinin yol açtığı çevre kirliliğinin de göz önüne alınmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu şekilde maliyet minimizasyonunun çevre kirliliğiyle birlikte dikkate alınması çevresel ekonomik güç dağıtım problemini oluşturmaktadır [1]. Fosil kaynaklı yakıtları kullanan üretim birimleri çevreye büyük ölçüde zarar verebilmektedirler. Bu yakıtlardan doğal gaz,  $NO_x$  yayılımı bakımından kömüre göre %42 daha az bir değere sahiptir [2].

Çok amaçlı optimizasyon problemleri literatürde iki farklı şekilde çözülmektedir. Bunlardan biri çok amaçlı optimizasyon problemlerine doğrudan bu tür problemleri çözen metotların uygulanması, diğeri ise çok amaçlı optimizasyon problemlerini tek amaçlı optimizasyon problemlerine dönüştürdükten sonra çözüm metotlarının uygulanması şeklindedir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin uygun dönüşümler kullanılarak tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürülmesine skalerleştirme denir. Skalerleştirme metotlarından biri de ağırlıklı toplam metodudur (*ATM*) [1,3,4].

Makalede normal termik, ham enerji kaynağı kısıtlı termik ve hidrolik birimlerden oluşan kayıplı bir sistem göz önüne alınmaktadır. Sistemdeki ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin yakıtlarının *ya al yada öde* (take-or-pay) anlaşmasıyla sağlandığı kabul edilmektedir. Bu çeşit anlaşmada, sistemdeki ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin göz önüne alınan işletim süreleri boyunca harcayacağı toplam yakıtın bir alt sınırı belirlenmektedir. Birimleri işleten şirket yakıtı satan şirketten anlaşmada belirlenen yakıt miktarının alt sınırından daha az yakıt almayacağını garanti etmektedir. Belirlenen miktardan az yakıt alınması durumunda yakıtı satan şirkete alt sınırdan yakıt almış gibi ödeme yapılmaktadır [1,5].

Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren hidrotermal güç sistemlerinde çevresel ekonomik güç dağıtım problemi çözümlenirken maliyet ve emisyonun minimum düzeye çekilmesinin yanında, toplam gaz miktarı ve periyodik bir dönem boyunca su şartları tolerans sınırları içinde sağlanmalıdır.

Çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerinin çözümü için bugüne kadar birçok yöntem ve algoritma geliştirilmiştir. Literatürde bazı çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerinin çözümü çok amaçlı optimizasyon problemi olarak doğrudan çok amaçlı evrimsel algoritma metoduyla [6], çok amaçlı ve yerel aramalı parça küme optimizasyon metoduyla [7], hedef - kazanma metodu ve bölünme yaklaşım algoritmasıyla [8], geliştirilmiş bulanık sinirsel yaklaşımla [9], genetik veya geliştirilmiş genetik algoritmayla [10-13] ve analitik metotla [14] çözümü gerçekleştirilmiştir. Problem *ATM*yla tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürüldükten sonra birinci derece gradyent metotla [15] ve genetik algoritmayla [3,4,6] çözülmüştür.

Problemin çözümü, öngörülen işletim süresi boyunca *ATM*yla skalerleştirilen toplam maliyet fonksiyonunu minimum yapan, sistemdeki olası termik ve hidrolik kısıtların sağlandığı üretim birimlerinin aktif güç üretim değerlerini vermektedir.

Genetik algoritma (*GA*), optimizasyon problemlerinin çözümünde yerel optimumlara takılmadan genel optimuma ulaşabilmektedir. Bu nedenle ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren hidrotermal güç sistemlerine ait *ATM*yla skalerleştirilen çevresel ekonomik güç dağıtım probleminin çözümünde *GA* yöntemi tercih edilmiştir.

## 2. PROBLEMİN FORMÜLASYONU

Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren hidrotermal güç sistemlerinde çevresel ekonomik güç dağıtım problemi bir günden bir haftaya kadar olan işletim süresini kapsamaktadır. Bu süre zarfında ele alınan elektrik enerji sistemindeki yük dağılımının ve bu yükleri besleyecek olan enerji üretim birimlerinin bulunduğu varsayılmaktadır. Problemden ele alınan işletim süresi alt zaman dilimlerine bölünerek her bir dilimde yüklerin

değişmediği kabul edilmektedir. Bu problemin çözümü, öngörülen işletim süresi boyunca toplam yakıt maliyetini (termik maliyet ve  $NO_x$  emisyon maliyetinin toplamı) minimum yapan sistemdeki olası termik, hidrolik ve elektriksel kısıtların sağlandığı üretim birimlerinin aktif güç üretim değerlerini vermektedir. Problemden toplam maliyet fonksiyonu ( $TMF$ ) minimize edilirken hidrolik üretim birimlerinin her birinin istenilen miktarda suyu kullanması ve *ya al yada öde* anlaşmasıyla satın alınan gazın harcanması sağlanacaktır. Çalışmada hidrolik üretim birimlerinin yakıt maliyetleri sıfır olarak kabul edilmiştir [5,16].  $ATM$  yla skalerleştirilmiş minimize edilecek amaç fonksiyonu ( $TMF$ ) aşağıda verilmiştir.

$$TMF = \min \left\{ \sum_{j=1}^{j_{\max}} \left[ w \left( \left( \sum_{n \in N_T} F_n(P_{GT,nj}) \right) + \left( \sum_{k \in N_K} F_k(P_{GK,kj}) \right) \right) + (1-w) \left( \left( \sum_{n \in N_T} \gamma_n E_n(P_{GT,nj}) \right) + \left( \sum_{k \in N_K} \gamma_k E_k(P_{GK,kj}) \right) \right) \right] t_j \right\} \quad (R/h) \quad (1)$$

Denklemden  $\gamma_n$ ,  $n$ . normal termik ve  $\gamma_k$ ,  $k$ . ham enerji kaynağı kısıtlı termik üretim biriminin ( $R/ton$ ) olarak  $NO_x$  emisyon fiyatlarını,  $w$  ( $0 \leq w \leq 1$ ) şeklinde değişen ağırlıklı faktörünü göstermektedir. Burada  $w = 1.0$  değeri sadece yakıt maliyetinin,  $w = 0.0$  değeri ise sadece  $NO_x$  emisyon maliyetinin minimum olmasına karşılık düşmektedir.

Normal termik birimlerin yakıt maliyetleri ve yaydıkları  $NO_x$  emisyon miktarlarını veren fonksiyonlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$F_n(P_{GT,n}) = a_{1,n} + a_{2,n} P_{GT,n} + a_{3,n} P_{GT,n}^2, \quad (R/h) \quad (2)$$

$$E_n(P_{GT,n}) = b_{1,n} + b_{2,n} P_{GT,n} + b_{3,n} P_{GT,n}^2 + b_{4,n} \exp(b_{5,n} P_{GT,n}), \quad (ton/h) \quad (3)$$

Sistemdeki ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin saat başına harcadıkları ısı değerlerini ve  $NO_x$  emisyon miktarlarını veren fonksiyonlar aşağıda verilmiştir.

$$H_k(P_{GK,k}) = z_{1,k} + z_{2,k} P_{GK,k} + z_{3,k} P_{GK,k}^2, \quad (MBtu/h) \quad (4)$$

$$E_k(P_{GK,k}) = c_{1,k} + c_{2,k} P_{GK,k} + c_{3,k} P_{GK,k}^2 + c_{4,k} \exp(c_{5,k} P_{GK,k}), \quad (ton/h) \quad (5)$$

Kullanılan gazın  $ft^3$  başına verdiği ısı enerjisi ortalama bir değer olarak  $1100 Btu/ft^3$  ve gazın fiyatı  $2,0 R/ccf$  olarak alınmıştır. Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlere ait saat başına maliyet eğrilerini ( $F_k(P_{GK,kj})$ ) bulmak için bu birimlere ait saat başına harcanan ısı değerlerini veren eğriler  $1,8182 R/MBtu$ , harcanan yakıt miktarlarını veren ( $A_k(P_{GK,kj})$ ) eğrileri bulmak için ise  $0,909 ccf/MBtu$  ile çarpılması gerekir [1,5,17]. Ele alınan işletim süresi boyunca *ya al yada öde* anlaşması gereği ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler tarafından tüketilmesi planlanan toplam minimum yakıt miktarı  $A_{toplam}$  olarak belirlenmiştir. Bu üretim birimlerinin ele alınan işletim süresi boyunca harcadıkları ( $A_{harcanan}$ ) toplam yakıt miktarı ise denklem (6)'da verilmiştir.

$$A_{harcanan} = \sum_{j=1}^{j_{\max}} t_j \sum_{k \in N_K} A_k(P_{GK,kj}) = \sum_{j=1}^{j_{\max}} t_j \sum_{k \in N_K} 0,909 H_k(P_{GK,kj}), \quad (ccf) \quad (6)$$

Hidrolik üretim birimlerinin giriş çıkış eğrileri, saat başına deşarj edilen su miktarlarının üretilen aktif güçlere göre değişimini ifade etmektedirler. Hidrolik birimlerin saat başına deşarj edilen su miktarları aşağıdaki gibi iki parçalı eğriler olarak alınmıştır.

$$q_m(P_{GH,m}) = \begin{cases} d_{1,m} + d_{2,m}P_{GH,m} & , \text{ eğer } P_{GH,m}^{\min} \leq P_{GH,m} \leq P_{GH,m}^{\text{büktim}} \\ d_{3,m} + d_{4,m}P_{GH,m} + d_{5,m}P_{GH,m}^2 & , \text{ eğer } P_{GH,m}^{\text{büktim}} \leq P_{GH,m} \leq P_{GH,m}^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

$m$ . hidrolik birimin  $j$ . zaman diliminde rezervuarına birim zamandaki su girişi  $r_{mj}$  ( $acre - ft / h$ ) olarak bilinir. Bu hidrolik birimin günlük toplam deşarj olan su miktarı denklem (8)'den hesaplanır.

$$q_{harcanan,m} = \sum_{j=1}^{j_{\max}} q_{mj}(P_{GH,mj})t_j \quad , \quad q_{toplaml,m} = V_m^{\text{ilk}} - V_m^{\text{son}} + \sum_{j=1}^{j_{\max}} r_{mj}t_j \quad , \quad m \in N_H \quad (8)$$

$m$ . hidrolik birimin rezervuarında  $j$ . zaman dilimi sonunda depolanan su miktarının hesaplanmasında aşağıdaki denklem kullanılır.

$$V_{mj} = V_{mj-1} + [r_{mj} - q_m(P_{GH,mj})]t_j \quad (9)$$

Sistemde  $m_1$ . ve  $m_2$ . birimler birbirine hidrolik olarak seri bağlı olup  $m_2$ . hidrolik birim  $m_1$ . hidrolik birimden sonra ise  $m_1$ . hidrolik birimden deşarj olan su  $m_2$ . hidrolik birimin rezervuarına girmektedir. Bu durumda  $m_2$ . hidrolik birimin rezervuarında  $j$ . zaman dilimi sonunda depolanan su miktarı denklem (10)'a göre hesaplanır.

$$V_{m_2,j} = V_{m_2,j-1} + [q_{m_1}(P_{GH,m_1j}) - q_{m_2}(P_{GH,m_2j})]t_j \quad (10)$$

Bu çalışmada  $m_1$ . hidrolik birimden bırakılan suyun doğrudan  $m_2$ . hidrolik birimin rezervuarına zaman gecikmesi olmadan ulaştığı kabul edilmiştir. Hidrolik birim  $m_2$  tarafından harcanacak toplam su miktarı  $q_{harcanan,m_2}$  denklem (11)'e göre hesaplanır [5,17,18].

$$q_{harcanan,m_2} = q_{harcanan,m_1} + V_{m_2}^{\text{ilk}} - V_{m_2}^{\text{son}} \quad (11)$$

Normal termik, ham enerji kaynağı kısıtlı termik ve hidrolik birimlerin aktif güç çalışma sınır değerleri sırasıyla denklem (12), (13) ve (14)'te verilmiştir.

$$P_{GT,n}^{\min} \leq P_{GT,nj} \leq P_{GT,n}^{\max} \quad , \quad n \in N_T \quad , \quad j = 1, \dots, j_{\max} \quad (12)$$

$$P_{GK,k}^{\min} \leq P_{GK,kj} \leq P_{GK,k}^{\max} \quad , \quad k \in N_K \quad , \quad j = 1, \dots, j_{\max} \quad (13)$$

$$P_{GH,m}^{\min} \leq P_{GH,mj} \leq P_{GH,m}^{\max} \quad , \quad m \in N_H \quad , \quad j = 1, \dots, j_{\max} \quad (14)$$

Hidrolik üretim birimlerinin rezervuarlarından deşarj edilen su miktarının sınır değerleri aşağıda verilmiştir.

$$q_m^{\min} \leq q_{mj}(P_{GH,mj}) \leq q_m^{\max} \quad , \quad m \in N_H \quad , \quad j = 1, \dots, j_{\max} \quad (15)$$

Hidrolik üretim birimlerinin rezervuar depolama sınır değerleri ile başlangıç ve bitiş su hacim değerleri sırasıyla denklem (16) ve (17)'de verilmiştir.

$$V_m^{\min} \leq V_{mj} \leq V_m^{\max} \quad , \quad m \in N_H \quad , \quad j = 1, \dots, j_{\max} \quad (16)$$

$$V_{m0} = V_m^{ilk}, \quad V_{mj_{max}} = V_m^{son}, \quad m \in N_H \quad (17)$$

Kayıplı sistemdeki güç denge kısıtı denklem (18)'de gösterilmiştir.

$$\sum_{n \in N_T} P_{GT,nj} + \sum_{k \in N_K} P_{GK,kj} + \sum_{m \in N_H} P_{GH,mj} - P_{yük,j} - P_{kayıp,j} = 0, \quad j = 1, \dots, j_{max} \quad (18)$$

$TMF^*$ 'yi minimize eden çözüm değerleri  $GA$  ile bulunduktan sonra sistemin toplam termik maliyeti ( $TTM$ ) ve toplam  $NO_x$  emisyon miktarı ( $TEM$ ) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır. Burada  $TTM$ , sadece normal termik birimlerin oluşturduğu yakıt maliyetine ( $NTM$ ), ( $F_{gaz}$ =gaz birim fiyatı x harcanan toplam gaz miktarı) şeklinde hesaplanan ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin yakıt maliyeti,  $F_{gaz}$ , sabit bir değer olarak ilave edilerek hesaplanır.

$$TTM = NTM + F_{gaz} = \sum_{j=1}^{j_{max}} t_j \sum_{n \in N_T} F_n(P_{GT,nj}) + (gaz \text{ birim fiyatı} \times \text{harcanan toplam gaz miktarı}), \quad (R) \quad (19)$$

$$TEM = \sum_{j=1}^{j_{max}} t_j \left( \sum_{n \in N_T} E_n(P_{GT,nj}) + \sum_{k \in N_K} E_k(P_{GK,kj}) \right), \quad (ton) \quad (20)$$

### 3. GENETİK ALGORİTMA METODU

Genetik algoritmalar geleneksel yöntemlerle çözümü zor veya imkansız olan problemlerin çözümünde kullanılabilir. Algoritma ilk olarak popülasyon diye tabir edilen ve kromozomlarla temsil edilen rastgele bir çözüm kümesi ile başlamaktadır. Bu popülasyondan alınan sonuçlar bir öncekinden daha iyi çözümler içereceği beklenen yeni bir popülasyon oluşturmak için kullanılır. Yeni popülasyon oluşturulması için seçilen çözümler uygunluklarına göre seçilir. Çünkü uygun olanların daha iyi sonuçlar üreteceği olasıdır. Bu süreç belli bir durum (örneğin belli sayıda toplum veya en iyi çözümün gelişmesi) sağlanıncaya kadar devam ettirilir.

$GA$ 'nın en iyi çözüme ulaşıncaya kadar geçirdiği süreç; çözüm kümesinin kodlanması, başlangıç popülasyonunun oluşturulması, popülasyondaki çözümlerin uygunluğunun hesaplanması, uygunluğuna göre ata bireylerin seçilmesi, çaprazlama ve mutasyon işlemleriyle yeni bireylerin oluşturulması şeklinde tanımlanabilir [1,3,4,16,19].

#### 3.1. Genetik Algoritmanın Probleme Uygulanması

Bu bölümde  $GA$ 'nın skalerleştirilmiş çevresel ekonomik güç dağıtım problemine uygulanması anlatılacaktır. Burada her türlü üretim birimini temsil etmesi için üretim birimi genel olarak  $P_{G,g}$  ile gösterilecektir. Sistemdeki üretim birimi normal termik birim olursa  $P_{G,g} = P_{GT,n}$ , ham enerji kaynağı kısıtlı termik birim olursa  $P_{G,g} = P_{GK,k}$  ve hidrolik birim olursa  $P_{G,g} = P_{GH,m}$  olarak ifade edilir. Sistemdeki tüm üretim birimlerinin elemanı olduğu küme ise  $N_G$  ile gösterilmiştir.

Çözüme başlamadan önce sistem bilgileri,  $GA$  parametreleri, ceza katsayıları ve generatör tipleri belirlenir. Sistemde bir bara salınım barası olarak seçilir. Salınım barası haricindeki diğer güç üretim birimlerin her bir zaman dilimindeki aktif çıkış güçleri  $GA$  tarafından belirlenir.  $bn$  bit sayısını (çözüm hassasiyeti) göstermek üzere her üretim biriminin çıkış gücü olan  $P_{G,g}$  değeri için denklem (21)'deki kısıtı sağlayan rastgele  $N_G$  kümesinin elemanlarının bir eksiği (salınım barası) kadar sayı atanır.

$$0 \leq P_{G,g}^{ilk} \leq 2^{bn} - 1, \quad g \in N_G \quad (21)$$

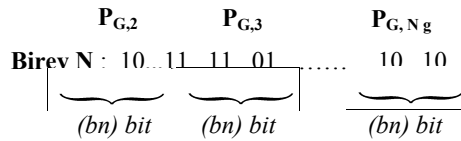
Atanan bu sayılar sistemdeki üretim birimlerinin mevcut kısıtlarının dışında bir değer alabileceğinden, denklem (22)'ye göre haritalama yapılarak üretim birimlerinin minimum ve maksimum üretim aralığına çekilir. Başka bir ifadeyle  $[0, 2^{bn} - 1] \rightarrow [P_{G,g}^{\min}, P_{G,g}^{\max}]$  lineer haritalaması yapılır.

$$P_{G,g}^{yeni} = P_{G,g}^{\min} + \frac{P_{G,g}^{\max} - P_{G,g}^{\min}}{2^{bn} - 1} \cdot P_{G,g}^{ilk}, \quad g \in N_G \quad (22)$$

Elde edilen bu  $P_{G,g}^{yeni}$  değerlerinin denklem (23)'ü sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Bu kontrol salınım barası haricindeki üretim birimlerinin ürettikleri güçlerin sistemdeki yük taleplerini aşmaması veya çok çok altında olmaması için yapılır. İşlemler bu şekilde yapıldığında salınım barası daima generatör olarak çalışmış olur [1,3,16].

$$K_{yük} \cdot P_{yük,j} < \sum_{g \in N_G, g \neq sal} P_{G,gj} < P_{yük,j}, \quad j = 1, \dots, j_{max} \quad (23)$$

Denklemdaki  $K_{yük}$  katsayısı algoritmayı çalıştıran kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Bu seçim sisteme ve probleme göre değişiklik gösterebilir. Oluşturulan her birey problemin bir çözümü haline gelir. Bireyin oluşum biçimi Şekil 1'de gösterilmiştir. Birey oluşturulduktan sonra yük akışı yapılarak salınım barasının aktif güç üretimi hesaplanır. Oluşturulan bireyin birinci periyottaki maliyeti, emisyonu, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin harcadıkları gaz miktarı, hidrolik birimlerin harcadıkları su, rezervuarlarında kalan su miktarları hesaplanır. Yapılan bu işlemler belirlenen periyot sayısı kadar tekrarlanır. Periyot sayısı tamamlandıkça sistemin toplam maliyeti, toplam emisyonu, harcanan toplam gaz, rezervuarlarındaki suyun son değerleri ( $V_m^{son}$ ) hesaplanır ve birey popülasyona katılır. Popülasyondaki birey sayısı  $ps$  tamamlandıktan sonra bütün bireylerin cezaları hesaplanarak  $TMF$ 'na eklenir.



Şekil 1. Bireyin oluşumu (Salınım barası hariç)

Bu çalışmada problemin çözümünde kullanılan  $f$  uygunluk fonksiyonu denklem (24)'de ifade edilmiştir. Optimizasyon sürecinde uygunluk fonksiyonunun maksimum olması istenmektedir [1,3,4].

$$f = \frac{1}{f_d} = \frac{1}{TMF + CF} \quad (24)$$

Denklemda  $f_d$  uygunluk değeri  $TMF$  ile toplam ceza fonksiyonunun ( $CF$ ) toplamına eşittir. Problemin çözümü kısıtları ihlal ettiğinde ceza fonksiyonu yardımıyla cezalandırılmaktadır. Ceza fonksiyonu kısıtlara uymayan çözümleri kısıtlara uygun hale getirebilmek için  $TMF$ 'ye eklenir [1,16,19]. Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birim içeren kısa dönem hidrotermal koordinasyon problemi için toplam ceza fonksiyonu denklem (25)'de formüle edilmiştir.

$$CF = CZ_{sal} + CA_{toplam} + CV_m + CV_m^{son} \quad (25)$$

Denklemdaki  $CZ_{sal}$  salınım barası cezası,  $CA_{toplam}$  toplam gaz cezası,  $CV_m$  hidrolik birimlerin rezervuarlarında depolanan su hacimlerine ait ceza fonksiyonu ve  $CV_m^{son}$  hidrolik birimlerin son zaman diliminde rezervuarlarında kalan su hacimlerine ait ceza fonksiyonları olup eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

$$CZ_{sal} = \begin{cases} \sum_{j \in \{P_{GT,salj} < P_{GT,sal}^{\min}\}} KP_{sal} (P_{GT,sal}^{\min} - P_{GT,salj})^2 \\ \sum_{j \in \{P_{GT,salj} > P_{GT,sal}^{\max}\}} KP_{sal} (P_{GT,salj} - P_{GT,sal}^{\max})^2 \\ 0 \quad \text{eğer} \quad P_{GT,salj}^{\min} \leq P_{GT,salj} \leq P_{GT,salj}^{\max} \end{cases} \quad (26)$$

$$CA_{toplamlam} = KA_{toplamlam} \cdot (A_{harcanan} - A_{toplamlam})^2 = KA_{toplamlam} \cdot \left( \sum_{j=1}^{j_{\max}} t_j \sum_{k \in N_k} A_k(P_{GK,kj}) - A_{toplamlam} \right)^2 \quad (27)$$

$$CV_m = \begin{cases} \sum_{\substack{j,m \in \{V_{mj} < V_m^{\min}\} \\ j \neq j_{\max}}} KV_m (V_m^{\min} - V_{mj})^2 \\ \sum_{\substack{j,m \in \{V_{mj} > V_m^{\max}\} \\ j \neq j_{\max}}} KV_m (V_m^{\max} - V_{mj})^2 \\ 0 \quad \text{eğer} \quad V_m^{\min} \leq V_{mj} \leq V_m^{\max} \end{cases}, \quad m \in N_H, j = 1, \dots, j_{\max} - 1, j \neq j_{\max} \quad (28)$$

$$CV^{son} = \left\{ \sum_{m \in N_H} KV^{son} (V_{mj_{\max}} - V_m^{son})^2 \right. \quad (29)$$

Denklemlerde yer alan  $KP_{sal}$ ,  $KA_{toplamlam}$ ,  $KV_m$  ve  $KV^{son}$  değerleri verilen ceza fonksiyonlarına ait katsayılarıdır. Bu katsayılar verilen sisteme uygun olarak çözüm aşamasında kullanıcı tarafından belirlenir.  $P_{GT,salj}$ ,  $P_{GT,sal}^{\min}$  ve  $P_{GT,sal}^{\max}$  değerleri sırasıyla salınım barasının  $j$ . periyottaki aktif güç üretimi, salınım barasının alt ve üst üretim aktif güç sınırlarını göstermektedir.

Hesaplanan  $f_d$  uygunluk değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanır (1,2,3,...ps). Uygunluk değeri sıralamasına göre bütün bireyler denklem (30) kullanılarak puanlanır. Puanlama her bireyin rulet tekerleğindeki alanını belirlemek için yapılır. Yüksek puana sahip (daha uygun) birey rulet tekerleğinde diğer bireylerden daha fazla alana sahip olacağından, seçilme şansı daha yüksek olacaktır.

$$Puan(f_d)_r = 5 + \text{yuvarla} \left[ 95 \cdot \left( \frac{ps - r + 1}{ps} \right)^2 \right], \quad r = 1, 2, \dots, ps \quad (30)$$

Denklemden  $r$  bireyin sıralamadaki yerini,  $ps$  ise popülasyondaki birey sayısını göstermektedir. Yapılan puanlama sonraki iterasyonlarda oluşturulacak popülasyonlar için belirlenecek olan bireylerin seçiminde kullanılır. Puanlama sistemi seçim işleminin daha başarılı yapılabilmesi için kullanılmıştır.

Yeni popülasyonun oluşturulması için sırasıyla elitizm, seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri gerçekleştirilir. İlk olarak mevcut popülasyondaki en yüksek puana sahip (yani elit) birey hiçbir işleme uğratılmadan sonraki popülasyona aktarılır. Kalan bireylerin oluşturulması için iki adet birey seçilir. Seçilen bu iki birey çaprazlama oranına bakılarak çaprazlanır. Çaprazlamadan sonra oluşan birey orana bağlı olarak mutasyona uğratılır. Seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonunda oluşan yeni bireyle yük akışı yapılarak maliyet, emisyon, gaz miktarı ve su durumları hesaplanır. Hesaplanan bu değerlere göre yeni cezalar hesaplanarak  $TMF$ 'ye eklenir. Bu işlemler belirlenen periyot sayısı ve popülasyondaki birey sayısı tamamlanıncaya kadar devam eder. Popülasyonun

oluşturulmasından sonra bireylerin toplam maliyetleri, toplam emisyonları, toplam gaz miktarı ve son su durumları hesaplanarak en iyi çözüm aranır. Bu işlemler tekrarlanarak farklı iterasyonlarda oluşacak popülasyonlardaki iyi çözümlerin daha iyi olması amaçlanır. Durma kriteri sağlandığında en iyi çözüm belirlenerek algoritma sonlandırılır. Problemin çözümü için kullanılan algoritmaya ait işaret akış diyagramı Şekil 2’de gösterilmiştir [1].

Çalışmada seçim için rulet tekerleği metodu, çaprazlama türü olarak tek noktalı çaprazlama, mutasyon türü tek bit değiştirme ve durma kriteri olarak da iterasyon sayısı kullanılmıştır.

Probleminin çözümü için Şekil 2’de verilen akış diyagramına uygun Delphi dilinde görsel bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Program AMD 64 X2 Dual Core işlemcili ve 2 GB RAM bellekli bilgisayarda çalıştırılmıştır.

#### 4. ÖRNEK SİSTEM ÇÖZÜMÜ

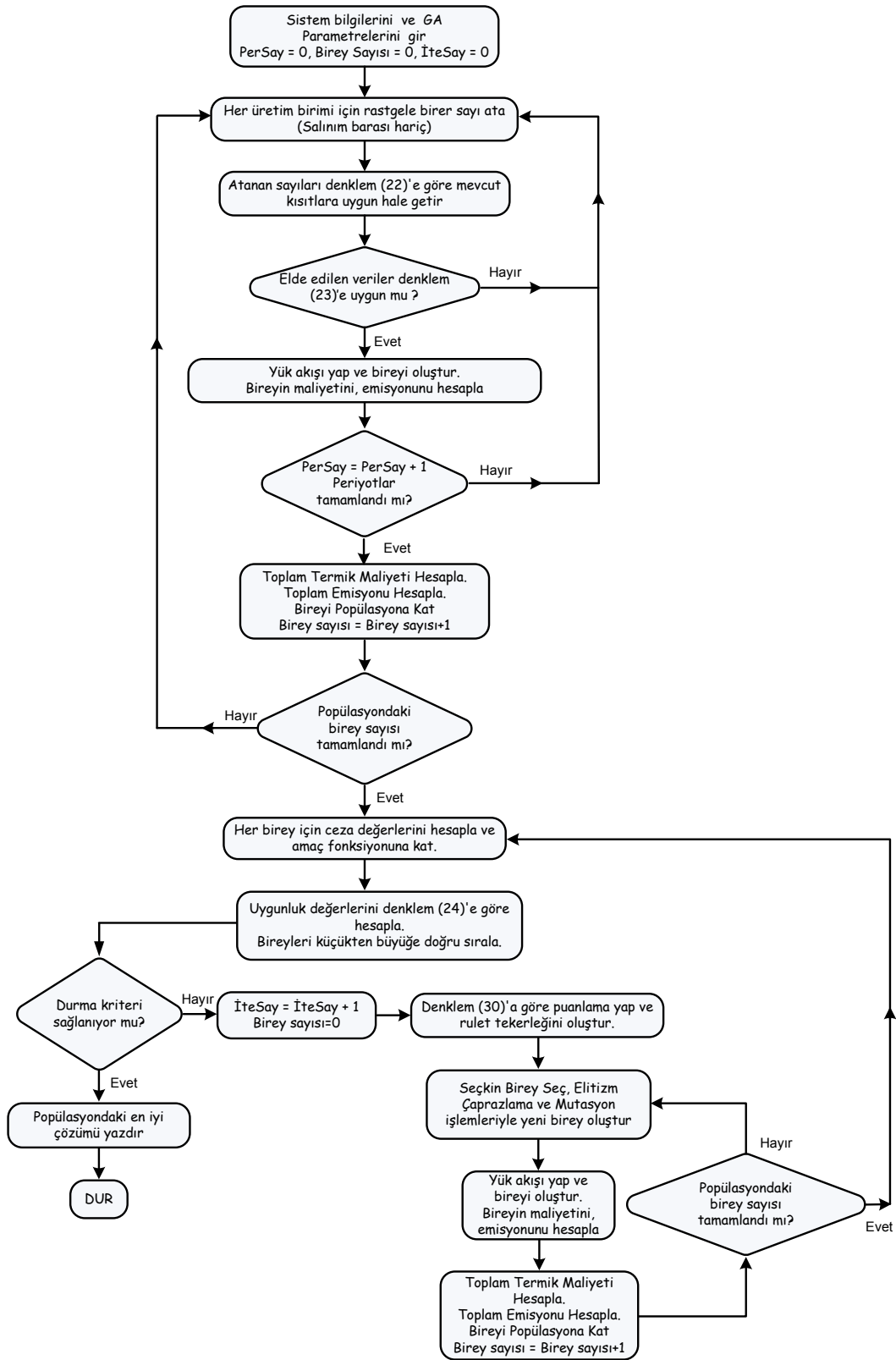
Bu çalışmada geliştirilen programı test edebilmek için literatürde daha önce sadece ekonomik aktif güç dağıtım problemi olarak çözülen Şekil 3’te tek hat diyagramı verilen örnek problem [5,16] ele alınmıştır. Sistemde 1 nolu bara salınım barası olup gerilimi  $1.05 \angle 0^{\circ}$  pu’dur. Sistemdeki baz değerleri  $S_{baz} = 100$  MVA,  $U_{baz} = 230$  kV olup 1, 8 ve 15 nolu baralara normal termik, 4 ve 5 nolu baralara ham enerji kaynağı kısıtlı termik, 10, 12, 14 ve 16 nolu baralara hidrolik üretim birimleri bağlıdır. Sistemin çözümünde altı eşit alt zaman diliminden ( $t_j = 4h, j = 1, \dots, 6$ ) oluşan bir günlük işletim süresi göz önüne alınmıştır.

Örnek sistemdeki iletim hatlarının nominal  $\pi$  devrelerine ait pu empedans değerleri Çizelge 1’de, normal termik üretim birimlerinin maliyet eğrisi ve  $NO_x$  emisyon fonksiyonu katsayıları ile aktif güç üretim sınırları Çizelge 2’de, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin saat başına harcadıkları ısı enerjisini veren eğrilere ait katsayılar,  $NO_x$  emisyon fonksiyonu katsayıları ve aktif güç üretim sınırları Çizelge 3’de, hidrolik üretim birimlerinin saat başına deşarj su miktarı eğrilerine ait katsayılar ve aktif güç üretim sınırları Çizelge 4’de verilmiştir. Hidrolik birimlerin rezervuarları arasındaki hidrolik ilişkiler Şekil 4’de gösterilmiştir. 10. ve 14. baralara bağlı hidrolik birimlerin rezervuarlarına saat başına gelen su miktarları sırasıyla  $r_{10j} = 650.0$  acre-ft/h ve  $r_{14j} = 450.0$  acre-ft/h şeklinde alınmıştır. Şekil 4’de rezervuarların hidrolik ilişkileri verilen 12. ve 16. baralara bağlı hidrolik birimlerin her bir zaman dilimi sonunda rezervuarlarında depolanan su değerleri sırasıyla aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$V_{12j} = V_{12j-1} + [q_{10}(P_{GH,10j}) - q_{12}(P_{GH,12j})] \cdot t_j, \quad j = 1, \dots, 6 \quad (31)$$

$$V_{16j} = V_{16j-1} + [q_{12}(P_{GH,12j}) + q_{14}(P_{GH,14j}) - q_{16}(P_{GH,16j})] \cdot t_j, \quad j = 1, \dots, 6 \quad (32)$$





Şekil 2. Çözüm algoritmasının akış şeması



spot fiyat algoritmasıyla çözüldüğünde sistemin toplam maliyeti 169584 R, kaynakça [16]'da genetik algoritma ile çözüldüğünde ise 177004 R olarak bulunmuştur. Bu çalışmada önerilen algoritma ile  $w=1$  alındığında bulunan değer ise 172651 R olup (Çizelge 8) literatürde daha önce çözülen sadece ekonomik aktif güç dağıtım problemine karşılık düşmektedir. Bulunan bu değer, literatürdeki bulunan önceki değerlerle karşılaştırıldığında ( $169584 < 172651 < 177004$ ) söz konusu değerlerin arasında bir değer olup algoritmanın doğru çalıştığının bir göstergesidir.

**Çizelge 1.** Örnek sistemdeki iletim hatlarının nominal  $\pi$  devrelerine ait pu empedans değerleri [5,16].

Baradan baraya	R (pu)	X (pu)	$B_{cap}$ (pu)	Baradan baraya	R (pu)	X (pu)	$B_{cap}$ (pu)
1-2	0,1000	0,2000	0,0400	7-8	0,0200	0,1000	0,0200
1-3	0,0150	0,1800	0,0300	7-13	0,0700	0,2000	0,0500
1-5	0,0800	0,3000	0,0600	7-16	0,0600	0,1800	0,0400
1-6	0,0500	0,2000	0,0400	8-9	0,0800	0,3000	0,0600
1-7	0,0700	0,2000	0,0500	8-13	0,0500	0,2000	0,0400
2-3	0,0500	0,2500	0,0600	9-10	0,0200	0,1000	0,0200
2-5	0,0500	0,1000	0,0200	9-12	0,0700	0,2000	0,0500
3-4	0,0500	0,2000	0,0400	10-11	0,0600	0,1800	0,0400
3-5	0,0700	0,2000	0,0500	10-12	0,0500	0,2500	0,0600
4-5	0,1000	0,2000	0,0400	11-12	0,1000	0,2000	0,0400
4-9	0,0900	0,3000	0,0600	11-14	0,0200	0,1000	0,0200
4-10	0,0700	0,2000	0,0500	12-13	0,1000	0,2000	0,0400
4-11	0,0150	0,1800	0,0300	12-15	0,0600	0,1800	0,0400
5-6	0,0200	0,1000	0,0200	13-15	0,0800	0,2000	0,0400
5-9	0,0800	0,3000	0,0600	13-16	0,0500	0,2500	0,0600
6-7	0,1000	0,3000	0,0600	14-15	0,0500	0,2000	0,0400
6-8	0,0700	0,2000	0,0500	15-16	0,1000	0,3000	0,0600
6-9	0,0600	0,1800	0,0300				

**Çizelge 2.** Normal termik birimlere ait maliyet ve  $NO_x$  emisyon fonksiyonlarına ait katsayıları ve aktif güç üretim sınırları [5,6,16].

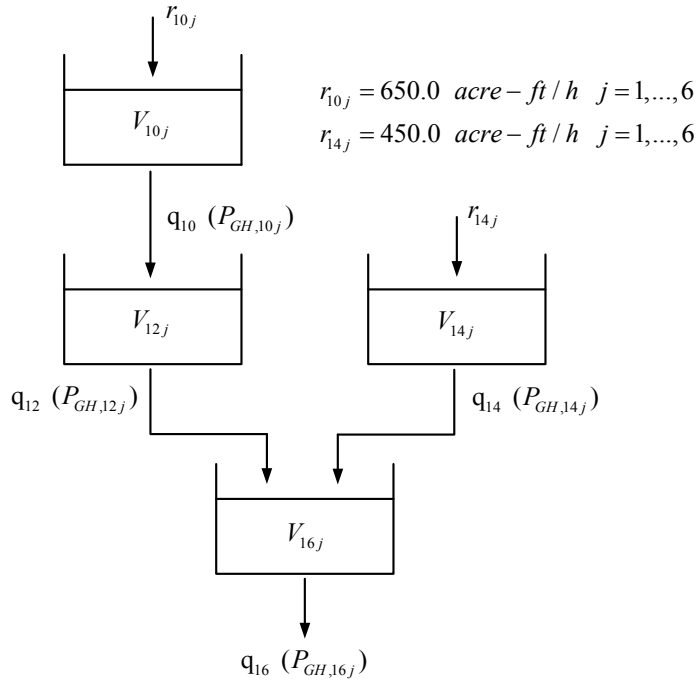
		Normal termik birimlerin bağlı olduğu bara no, (n)		
		1	8	15
Maliyet fonksiyonu katsayıları	$a_{1,n}$	527,0	215,0	78,0
	$a_{2,n}$	7,48	7,94	7,97
	$a_{3,n}$	0,001495	0,00236	0,00482
Emisyon fonksiyonu katsayıları	$b_{1,n}$	$4,091.10^{-02}$	$2,543.10^{-02}$	$5,326.10^{-02}$
	$b_{2,n}$	$-5,554.10^{-04}$	$-6,047.10^{-04}$	$-3,550.10^{-04}$
	$b_{3,n}$	$6,490.10^{-06}$	$5,638.10^{-06}$	$3,380.10^{-06}$
	$b_{4,n}$	$2,000.10^{-04}$	$5,000.10^{-04}$	$2,000.10^{-03}$
	$b_{5,n}$	$2,857.10^{-02}$	$3,333.10^{-02}$	$2,000.10^{-02}$
Üretim birimlerinin aktif güç sınır değerleri	$P_{GT,n}^{min}$ (MW)	30,0	50,0	45,0
	$P_{GT,n}^{max}$ (MW)	350,0	200,0	250,0

**Çizelge 3.** Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin saat başına harcadıkları ısı enerjisini veren eğrilere ait katsayılar,  $NO_x$  emisyon fonksiyonu katsayıları ve aktif güç üretim sınırları [2,5,6,16].

		Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin bağlı olduğu bara no ( $k$ )	
		4	5
Isı değerini veren fonksiyonun katsayıları	$z_{1,k}$	300,0	250,0
	$z_{2,k}$	6,0	6,5
	$z_{3,k}$	0,0025	0,002
Emisyon fonksiyonu katsayıları	$c_{1,k}$	$1,475 \cdot 10^{-02}$	$3,089 \cdot 10^{-02}$
	$c_{2,k}$	$-3,507 \cdot 10^{-04}$	$-2,059 \cdot 10^{-04}$
	$c_{3,k}$	$3,270 \cdot 10^{-06}$	$1,960 \cdot 10^{-06}$
	$c_{4,k}$	$2,900 \cdot 10^{-04}$	$1,160 \cdot 10^{-03}$
	$c_{5,k}$	$3,333 \cdot 10^{-02}$	$2.000 \cdot 10^{-02}$
Üretim birimlerinin aktif güç sınır değerleri	$P_{GK,k}^{\min}$ (MW)	20,0	20,0
	$P_{GK,k}^{\max}$ (MW)	400,0	500,0

**Çizelge 4.** Hidrolik üretim birimlerine ait saat başına deşarj su miktarı eğrilere ait katsayılar ve aktif güç üretim sınırları [5,16].

Hidrolik birimlerin bağlı olduğu bara no, ( $m$ )					
		10	12	14	16
$d_{1,m}$		330,0	320,0	380,0	300,0
$d_{2,m}$		4,97	6,2	5,65	6,0
$d_{3,m}$		254,4	275,0	432,0	343,2
$d_{4,m}$		2,0	3,8	2,0	2,28
$d_{5,m}$		0,03	0,018	0,025	0,028
$P_{GH,m}^{\min}$ (MW)		0,0	0,0	0,0	0,0
$P_{GH,m}^{büküm}$ (MW)		120,0	150,0	130,0	120,0
$P_{GH,m}^{\max}$ (MW)		135,0	165,0	145,0	135,0



Şekil 4. Örnek güç sistemindeki hidrolik birimlerin rezervuarları arasındaki hidrolik ilişkiler

Çizelge 5. Hidrolik üretim birimlerin rezervuar depolama sınırları, başlangıç-bitiş su hacimleri ve harcanması gereken toplam su miktarları [5,16].

Hidrolik birimlerin bağlı olduğu bara no, (m)				
	10	12	14	16
$V_m^{min} \text{ (acre-ft)}$	30000	30000	30000	30000
$V_m^{max} \text{ (acre-ft)}$	80000	80000	80000	80000
$V_m^{ilk} \text{ (acre-ft)}$	50000	45000	46600	40000
$V_m^{son} \text{ (acre-ft)}$	48000	46600	40600	50600
$q_{toplam,m} \text{ (acre-ft)}$	17600	16000	16800	22200

Gaz kısıtı kaldırıldığında fakat hidrolik kısıtlar varken ise Çizelge 9'dan görüleceği üzere sistemin sadece normal termik maliyeti  $NTM = 105677,461 R$  ve harcanan gaz miktarı  $30016,816 \text{ ccf}$  olarak hesaplanır, toplam termik maliyet ise  $TTM_{gaz\ kısıtsız} = 105677,461 + (2,0 \times 44500) = 194677,461 R$  olarak bulunur. Burada harcanması gereken gaz miktarının tam olarak harcanması durumunda maliyetin azaldığı görülmüştür ( $172651,007 < 194677,461 R$ ).

Denklem (1)'de  $w = 0.0$  alınarak sadece toplam  $NO_x$  emisyon maliyetinin minimizasyonunda hidrolik ve gaz kısıtlarının birlikte sağlanması durumunda toplam  $NO_x$  emisyon miktarı  $9856,571 \text{ kg}$ , sadece hidrolik kısıtların sağlanması (gaz kısıtı yok) durumunda ise  $10360,037 \text{ kg}$  olarak elde edilmiştir. Sadece hidrolik kısıtların sağlanması durumunda ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler tarafından  $44430,518 \text{ ccf}$  gaz harcanmıştır.

**Çizelge 6.** Örnek sistemdeki alt zaman dilimlerindeki  $pu$  aktif ve reaktif yük değerlerin [5,16].

		Zaman dilimi sayısı, (j)					
Bara No	Yük	1	2	3	4	5	6
2	$P_{yük,2}$	0,75	0,90	1,25	1,20	1,25	0,85
	$Q_{yük,2}$	0,55	0,60	0,95	0,90	0,95	0,60
3	$P_{yük,3}$	1,00	1,10	1,05	1,00	1,20	0,95
	$Q_{yük,3}$	0,75	0,80	0,80	0,75	0,90	0,70
6	$P_{yük,6}$	0,95	0,95	1,15	1,25	1,10	1,00
	$Q_{yük,6}$	0,70	0,65	0,85	0,95	0,80	0,75
7	$P_{yük,7}$	0,70	1,05	1,00	1,15	1,15	0,95
	$Q_{yük,7}$	0,50	0,80	0,75	0,85	0,85	0,70
9	$P_{yük,9}$	1,05	0,85	1,30	1,30	1,30	1,05
	$Q_{yük,9}$	0,80	0,60	1,00	1,00	1,00	0,80
11	$P_{yük,11}$	0,60	1,20	0,90	1,10	1,10	1,10
	$Q_{yük,11}$	0,45	0,90	0,60	0,80	0,80	0,80
13	$P_{yük,13}$	0,90	1,00	1,15	1,05	1,05	0,90
	$Q_{yük,13}$	0,65	0,75	0,85	0,80	0,80	0,65
15	$P_{yük,15}$	0,85	1,25	0,95	1,35	1,00	0,80
	$Q_{yük,15}$	0,60	0,95	0,70	1,00	0,75	0,60
$\sum P (pu)$		6,800	8,300	8,750	9,400	9,150	7,600
$\sum Q (pu)$		5,000	6,050	6,500	7,050	6,850	5,600

Çizelge 8 ve 9'daki gibi bütün sonuçlar gösterilmek istendiğinde  $w$ 'nın değişik değerlerine ait 20 adet daha Çizelge oluşturulması gerekir. Bu nedenle optimal çözüm sonuçları gaz kısıtı altında özetlenerek Çizelge 10'da ve gaz kısıtı olmaksızın Çizelge 11'de verilmiştir. Farklı  $w$  değerleri için toplam  $NO_x$  emisyon miktarına göre toplam termik maliyetteki değişim gaz kısıtı altında Şekil 5'te, gaz kısıtı olmaksızın ise Şekil 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 10'daki tüm işlemlerde ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler tarafından harcanan toplam gaz miktarı %0,03, hidrolik kısıtlar yani hidrolik birimlerin harcamaları gereken su miktarları Çizelge 10 ve Çizelge 11'de %5'lik hatanın altında sağlanmıştır

**Çizelge 7.** Örnek sistemdeki üretim birimlerine ait  $pu$  reaktif güç üretim değerleri [5,16].

		Zaman dilimi sayısı, ( $j$ )					
		1	2	3	4	5	6
$Q_{GK,4j}$	0,400	0,550	0,600	0,700	0,650	0,500	
$Q_{GK,5j}$	0,400	0,550	0,600	0,650	0,650	0,500	
$Q_{GT,8j}$	0,400	0,550	0,600	0,600	0,600	0,500	
$Q_{GH,10j}$	0,400	0,550	0,600	0,600	0,600	0,500	
$Q_{GH,12j}$	0,400	0,550	0,600	0,700	0,600	0,500	
$Q_{GH,14j}$	0,400	0,550	0,600	0,700	0,650	0,500	
$Q_{GT,15j}$	0,400	0,550	0,600	0,700	0,600	0,500	
$Q_{GH,16j}$	0,400	0,550	0,600	0,650	0,650	0,500	

**Çizelge 8.**  $w = 1.0$  için gaz kısıtı altında elde edilen optimal çözüm değerleri.

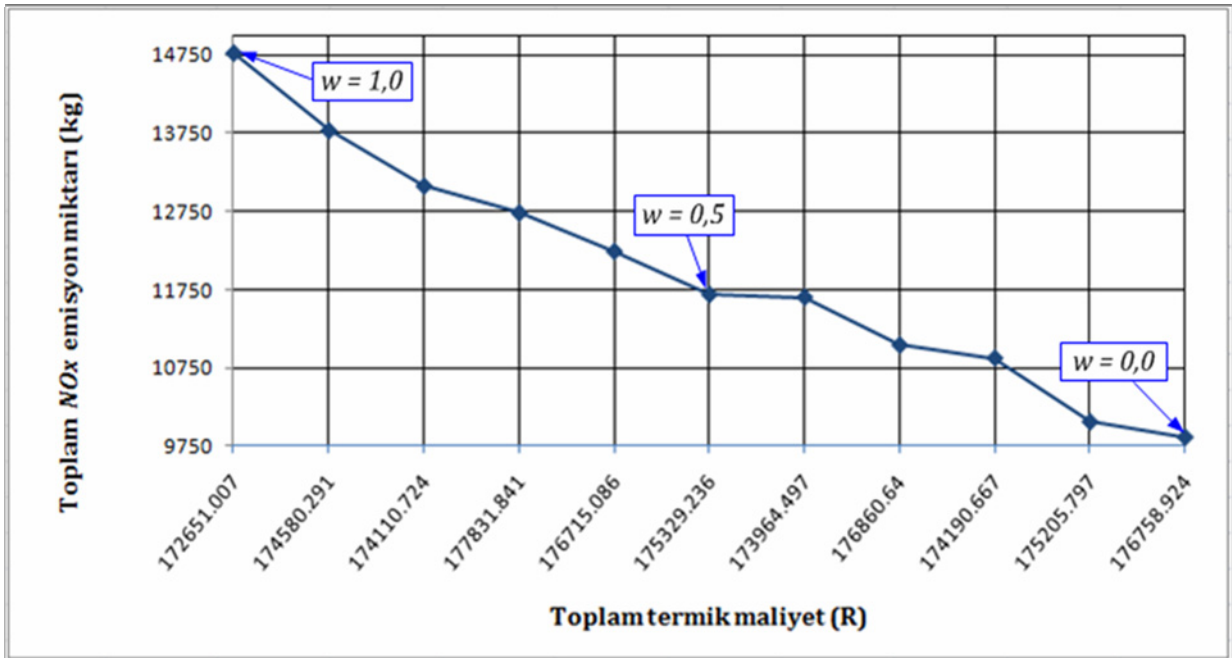
Üretim birimlerinin bağlı olduğu bara no, ( $n$ )	Zaman Dilimi ( $j$ )					
	1	2	3	4	5	6
$P_{GT,1}^{sonuç}, (pu)$	2,140564	1,242076	1,992787	0,895240	0,712567	2,119167
$Q_{GT,1}^{sonuç}, (pu)$	0,750888	0,562555	0,873056	1,050918	1,135283	0,535631
$P_{GT,4}^{sonuç}, (pu)$	0,417325	0,413788	0,550573	2,488988	2,118816	0,624445
$P_{GT,5}^{sonuç}, (pu)$	0,763095	1,002893	1,851124	1,146816	1,425434	0,731600
$P_{GT,8}^{sonuç}, (pu)$	1,285283	0,976539	0,831197	1,103891	1,172900	0,540398
$P_{GH,10}^{sonuç}, (pu)$	0,612552	1,181392	0,762023	0,759675	1,056928	0,592303
$P_{GH,12}^{sonuç}, (pu)$	0,014578	0,654612	0,638423	0,232110	0,853967	1,039222
$P_{GH,14}^{sonuç}, (pu)$	0,916574	0,777404	0,247696	0,737534	0,074475	0,631088
$P_{GT,15}^{sonuç}, (pu)$	0,467955	1,299342	0,865349	0,989722	0,686484	0,576844
$P_{GH,16}^{sonuç}, (pu)$	0,331263	0,926759	1,263976	1,335354	1,341678	0,917201

$V_{10}^{son}$ (acre-ft)	<b>47809,832</b>		$V_{12}^{son}$ (acre-ft)	<b>46596,547</b>	
$V_{14}^{son}$ (acre-ft)	<b>40630,416</b>		$V_{16}^{son}$ (acre-ft)	<b>50627,458</b>	
$TTM$ (R)	<b>172651,007</b>	$TEM$ (kg)	<b>14784,882</b>	$A_{harcanan}$ (ccf)	<b>44497,363</b>

**Çizelge 9.**  $w = 1.0$  için gaz kısıtı olmaksızın elde edilen optimal çözüm değerleri

Üretim birimlerinin bağlı olduğu bara no, (n)	Zaman Dilimi ( $j$ )					
	1	2	3	4	5	6
$P_{GT,1}^{sonuç}$ , (pu)	2,478211	3,233930	1,657143	1,760762	2,962403	1,399854
$Q_{GT,1}^{sonuç}$ , (pu)	0,949700	1,096635	0,848455	1,091219	1,302344	0,514857
$P_{GT,4}^{sonuç}$ , (pu)	0,323912	0,752010	0,350237	0,923992	0,517058	1,032828
$P_{GT,5}^{sonuç}$ , (pu)	0,208203	0,654328	0,822861	0,394681	1,433491	0,289577
$P_{GT,8}^{sonuç}$ , (pu)	1,492218	1,241291	1,402632	0,575601	0,519570	0,802724
$P_{GH,10}^{sonuç}$ , (pu)	0,099105	0,251666	1,286594	0,946308	0,673980	1,344129
$P_{GH,12}^{sonuç}$ , (pu)	0,412431	0,246965	0,589705	1,430579	0,407269	0,181529
$P_{GH,14}^{sonuç}$ , (pu)	0,187249	0,134767	0,787073	1,008595	0,858716	0,416403
$P_{GT,15}^{sonuç}$ , (pu)	0,497891	0,920935	1,615530	1,751477	1,006551	1,131456
$P_{GH,16}^{sonuç}$ , (pu)	1,298542	1,125855	0,499480	0,920373	1,070236	1,179929
$V_{10}^{son}$ (acre-ft)	<b>48107,345</b>		$V_{12}^{son}$ (acre-ft)	<b>46706,829</b>		
$V_{14}^{son}$ (acre-ft)	<b>40612,265</b>		$V_{16}^{son}$ (acre-ft)	<b>50617,837</b>		
$TTM$ (R)	<b>194677,461</b>	$TEM$ (kg)	<b>24571,033</b>	$A_{harcanan}$ (ccf)	<b>30016,816</b>	





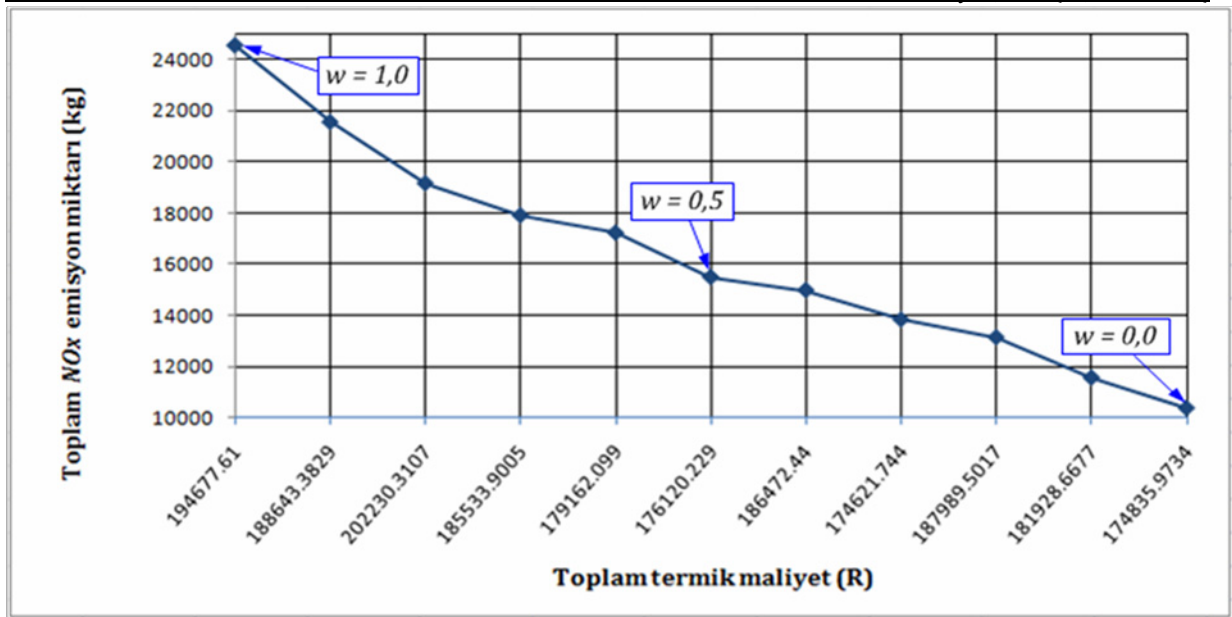
Şekil 5. Gaz kısıtı altında toplam  $NO_x$  emisyon miktarına göre toplam maliyetteki değişim

**Çizelge 10.**  $w^*$ 'nin değişimine göre **gaz kısıtı altında** sadece normal termik maliyet, toplam termik maliyet, toplam  $NO_x$  emisyon, toplam harcanan gaz ve hidrolik birimlerin harcaadıkları toplam su miktarları

<i>Ağırlık Faktörü (w)</i>	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
NTM (R)	87758,924	86205,797	85190,667	87860,640	84964,497	86328,860	87696,752	88824,293	85108,736	85380,291	83651,007
TTM (R)	176738,92	175205,19	174190,67	176860,64	173964,49	175329,24	176715,09	177831,84	174110,72	174580,29	172651,01
TEM (kg)	9856,571	10054,063	10872,860	11039,427	11653,701	11689,345	12240,975	12733,881	13078,740	13789,427	14784,882
$A_{\text{harcanan}} (ccf)$	44499,957	44497,919	44499,017	44495,960	44499,346	44500,188	44509,167	44503,774	44500,994	44499,596	44497,363
$Q_{\text{toplam},10}$	17354,519	17410,519	17536,06	17250,035	17464,921	17446,943	17326,85	17311,171	17549,118	17336,123	17790,168
$Q_{\text{toplam},12}$	15540,375	15637,719	15883,857	15310,346	15791,134	15746,988	15498,977	15662,07	15881,172	15910,331	16193,621
$Q_{\text{toplam},14}$	16734,331	16652,175	16739,232	16658,826	16772,334	16737,932	16634,399	16696,128	16738,182	16764,484	16769,584
$Q_{\text{toplam},16}$	21653,383	21736,255	22046,806	21229,815	21887,665	21829,04	21394,492	21832,326	21953,8	22027,236	22335,747

**Çizelge 11.** Gaz  $w^*$ 'nin değişimine göre **gaz kısıtı olmaksızın** toplam sadece normal termik maliyet, toplam termik maliyet, toplam  $NO_x$  emisyon, toplam harcanan gaz ve hidrolik birimlerin harcaadıkları toplam su miktarları

<i>Ağırlık Faktörü (w)</i>	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
NTM (R)	85835,973	92928,667	98989,501	85621,744	97472,440	87120,229	90162,099	96533,900	113230,31	99643,382	105677,61
TTM (R)	174835,97	181928,67	187989,50	174621,74	196472,44	176120,23	179162,10	185533,90	202230,31	188643,38	194677,61
TEM (kg)	10360,037	11551,273	13135,341	13827,726	14979,102	15493,589	17238,376	17911,115	19166,649	21563,415	24571,033
$A_{\text{harcanan}} (ccf)$	44430,518	41954,569	33654,135	46717,880	35698,309	44777,255	41404,311	38812,730	25755,474	35182,296	30016,816
$Q_{\text{toplam},10}$	17512,539	17077,63	17617,145	17302,703	17434,826	17226,327	17326,683	17217,368	17395,882	17297,272	17492,655
$Q_{\text{toplam},12}$	15885,668	15489,299	16030,528	15413,996	15718,141	15477,748	15561,043	15373,411	15614,928	15420,116	15785,826
$Q_{\text{toplam},14}$	16816,288	16697,029	16792,886	16608,422	16749,883	16952,898	16825,288	16513,815	16479,412	16641,824	16787,735
$Q_{\text{toplam},16}$	22015,513	21152,242	22229,217	21304,037	21794,200	21831,376	21717,635	21126,626	21336,117	21398,451	21955,724



Şekil 6. Gaz kısıtı olmaksızın toplam  $NO_x$  emisyon miktarına göre toplam maliyetteki değişim

## 5. SONUÇ

Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birim içeren hidrotermal güç sisteminde çevresel ekonomik güç dağıtım problemi  $ATM$ yla skalerleştirilmiş ve GA metoduyla çözülmüştür. Örnek sistem ağırlık faktörü  $w=1.0$ 'dan başlayarak  $0.1$ 'er aralıklarla azaltılarak  $0.0$ 'a kadar hem gaz kısıtı altında hem de gaz kısıtsız olmak üzere  $11$ 'er kez çözülmüştür. Geliştirilen program AMD 64 X2 Dual Core işlemcili ve 2 GB RAM bellekli bilgisayarda her bir ağırlık değeri için 150 iterasyon çalıştırılmış ve bu çalışma ortalama olarak 40,9 saniye sürmüştür. Bu şekilde Çizelge 10 veya 11 için gerekli değerlerin elde edilmesi yaklaşık 450 saniye tutmuştur. Literatürde ham enerji kaynağı kısıtlı termik birim içeren hidrotermal güç sistemlerinde çevresel ekonomik güç dağıtım probleminin çözümüne rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmada daha önce sadece ekonomik güç dağıtım olarak çözülen problem çevresel ekonomik güç dağıtım problemi olarak çözülmüştür. Literatürde sadece ekonomik güç dağıtım problemi olarak sözde spot fiyat algoritmasıyla çözüldüğünde sistemin toplam termik maliyeti  $169584 R$ , genetik algoritma ile çözüldüğünde ise  $177004 R$  bulunmasına karşılık bu çalışmada geliştirilen algoritma ile elde edilen  $172651 R$ 'nin ( $169584 < 172651 < 177004$ ) sonuç olarak iyi değer olduğu söylenebilir. Çözümlerde tolerans değerleri içinde gaz kısıtı ve hidrolik kısıtlar sağlanırken  $w$ 'nın azalan değerleri için toplam  $NO_x$  emisyon miktarının azaldığı görülmüştür. Sonuçlara bakılarak örnek güç sisteminin hangi noktada çalışacağı karar vericilere (sistem sahiplerine) bırakılmıştır.

## 6. SEMBOLLER LİSTESİ

$TTM$  = öngörülen işletim süresi boyunca sistemdeki toplam termik maliyet ( $R$ ).

$NTM$  = öngörülen işletim süresi boyunca sistemdeki sadece normal termik birimlerin toplam yakıt maliyeti ( $R$ ).

$TEM$  = öngörülen işletim süresi boyunca sistemdeki termik birimlerin toplam  $NO_x$  emisyon miktarı ( $ton$ ).

$F_n(P_{GT,nj})$  =  $n$ . normal termik birimin  $j$ . alt zaman dilimindeki aktif güç üretimi  $P_{GT,nj}$  iken saat başına maliyeti, ( $R/h$ ).

$E_n(P_{GT,nj}), E_k(P_{GK,kj})$  =  $n$ . normal termik ve  $k$ . ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimin  $j$ . alt zaman dilimindeki aktif güç üretimleri  $P_{GT,nj}$  ve  $P_{GK,kj}$  iken saat başına  $NO_x$  emisyon miktarları, ( $ton/h$ ).

$H_k(P_{GK,kj}) = k$ . ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimin  $j$ . alt zaman dilimindeki aktif güç üretimi  $P_{GK,kj}$  iken saat başına harcadığı ısı miktarı, ( $MBtu / h$ ).

$GT, GK, GH$  = sırasıyla normal termik, ham enerji kaynağı kısıtlı termik ve hidrolik birimlerin aktif-reaktif güç üretim indisleri.

$N_T, N_K, N_H$  = sırasıyla ele alınan sistemdeki tüm normal termik, ham enerji kaynağı kısıtlı termik ve hidrolik birimleri içeren kümeler.

$P_{GT,nj}, P_{GK,kj}, P_{GH,mj} = n$ . normal termik,  $k$ . ham enerji kaynağı kısıtlı termik ve  $m$ . hidrolik birimlerin  $j$ . alt zaman dilimindeki aktif güç üretimleri, ( $MW$ ),

$j, j_{max}$  = alt zaman indeksi ve toplam alt zaman dilimi sayısı.

$t_j = j$ . alt zaman dilimi süresi ( $h$ ).

$P_{yük,j} = j$ . alt zaman dilimindeki sistemdeki toplam aktif yük, ( $MW$ ).

$P_{kayıp,j} = j$ . alt zaman dilimindeki sistemdeki toplam aktif güç kaybı, ( $MW$ ).

$P_{GT,n}^{min}, P_{GT,n}^{max} = n$ . normal termik birime ait alt ve üst aktif güç üretim sınırları, ( $MW$ ),

$P_{GK,k}^{min}, P_{GK,k}^{max} = k$ . ham enerji kaynağı kısıtlı termik birime ait alt ve üst aktif güç üretim sınırları, ( $MW$ ).

$P_{GH,m}^{min}, P_{GH,m}^{max} = m$ . hidrolik birime ait alt ve üst aktif güç üretim sınırları, ( $MW$ ),

$A_k(P_{GK,kj}) = k$ . ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimin  $j$ . alt zaman diliminde aktif güç üretimi  $P_{GT,kj}$  iken saat başına tükettiği ham enerji miktarı, ( $ft^3 / h, m^3 / h, ccf / h^1$  vb.).

$A_{toplam} =$  öngörülen işletim süresi boyunca ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin harcaması gerekli toplam yakıt miktarı, ( $ton, m^3, ccf$  vb.).

$A_{harcanan} =$  öngörülen işletim süresi boyunca ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin harcadıkları toplam yakıt miktarı, ( $ton, m^3, ccf$  vb.).

$q_{mj}(P_{GH,mj}) = m$ . hidrolik birimden  $j$ . alt zaman diliminde deşarj edilen su miktarı, ( $acre-ft^2/h$ ).

$q_m^{min}, q_m^{max} = m$ . hidrolik birime ait alt ve üst deşarj edilebilecek su miktarları, ( $acre-ft/h$ ).

$q_{toplam,m} = m$ . hidrolik birimden işletim süresince toplam deşarj olan su miktarı, ( $acre-ft$ ).

$V_{mj} = m$ . hidrolik birimin rezervuarında  $j$ . zaman dilimi sonunda depolanan su miktarı, ( $acre-ft$ ).

$V_m^{min}, V_m^{max} = m$ . hidrolik birimin rezervuarında depolanabilecek su miktarlarının alt ve üst sınırları, ( $acre-ft$ ).

$V_m^{ilk}, V_m^{son} = m$ . hidrolik birimin rezervuarındaki su miktarlarının başlangıç ve bitiş miktarları, ( $acre-ft$ ).

$r_{mj} = m$ . hidrolik birimin  $j$ . zaman diliminde rezervuarına saat başına giren su miktarı, ( $acre-ft/h$ ).

## KAYNAKÇA

- [1] S. Özyön, Genetik algoritmanın bazı çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, 136 s. (yayımlanmamış), 2009.
- [2] M.G. Özkaya, H.İ. Variyenli, S. Uçar, "Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ve Kayseri ili için çevresel etkilerinin değerlendirilmesi", C.Ü Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 29, Sayı 1, Sayfa. 1-20, 2008.
- [3] C. Yaşar, S. Özyön, ve H. Temurtaş, Termik üretim birimlerinden oluşan çevresel-ekonomik güç dağıtım probleminin genetik algoritma yöntemiyle çözümü, ELECO'2008, 5. Elektrik - Elektronik Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, Elektrik-Kontrol Kitapçığı, s. 105-109, 26-30 Kasım 2008, BURSA, 2008.

<sup>1</sup>  $1 ccf = 10^3 ft^3 = 27.317 m^3$

<sup>2</sup>  $1 acre - ft = 1233,5 m^3$

- [4] S. Özyön, C. Yaşar, Y. Aslan, H. Temurtaş, Solution to environmental economic power dispatch problem in hydrothermal power systems by using genetic algorithm, 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO'2009, 5-8 November 2009, Volume I, pp. 387-392, Bursa, TURKEY, 2009.
- [5] C. Yaşar, S. Fadıl, M. Babadağı, "A Spot Price of Electricity Algorithm Applied to Lossy Short-Term Hydrothermal Scheduling Problem with Limited Energy Supply Thermal Units", European Transactions on Electrical Power, Vol.18, No.3, pp:296-312, April 2008.
- [6] M. A. Abido, Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 18, No 4, p.1529-1537, November 2003.
- [7] M.A. Abido, " Multiobjective Particle Swarm Optimization for Environmental Economic Dispatch Problem", Electrical Power Systems Research, Vol. 79, pp:1105-1113, 2009.
- [8] M. Basu, "A Simulated Annealing-Based Goal\_Attainment Method For Economic Emission Load Dispatch of Fixed Head Hydrothermal Power Systems", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 27, pp:147-153, 2005.
- [9] K.T. Chaturvedi, M. Pandit, L. Srivastava, "Modified neo-fuzzy neuron-based approach for economic and environmental optimal power dispatch", Applied Soft Computing, Vol. 8, No. 4, September 2008, pp. 1428-1438.
- [10] J. Cai, X. Ma, L. Li, H. Peng, "A multi objective chaotic particle swarm optimization for environmental economic dispatch" Energy Conversion and Management, Vol. 50, No. 5, May 2009, pp. 1318-1325.
- [11] L. Wang, C. Singh, "Reserve-constrained multi area environmental/economic dispatch based on particle swarm optimization with local search", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 22, No. 2, March 2009, pp. 298-307.
- [12] C. L. Chiang, Optimal economic emission dispatch of hydrothermal power systems, Electrical Power and Energy Systems, Volume 29, p.462-469 2007.
- [13] T. Yalçınöz, O. Köksoy, "A Multiobjective Optimization Method to Environmental Economic Dispatch", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 29, pp:42-50. 2007.
- [14] C. Palanichamy, N.S. Babu, "Analytical Solution for Combined Economic and Emissions Dispatch", Electrical Power Systems Research, Vol. 78, pp:1129-1137, 2008.
- [15] C. Yaşar, S. Fadıl, Solution to environmental economic dispatch problem by using first order gradient method, 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO'2007, 5-9 December, Electric Control Proceeding, pp. 91-95, Bursa, TURKEY, 2007.
- [16] S. Fadıl, U. Ergün, "Solution to Lossy Short Term Hydrothermal Coordination Problem with Limited Energy Supply Units By using Genetic Algorithm", International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO'99, 1-5 December, Electrical Proceeding, pp. 234-238, Bursa, TURKEY, 1999.
- [17] A. J. Wood, and B. F. Wollenberg, "Power Generation Operation & Control", John Wiley & Sons, 565 p, 1996.
- [18] S. Fadıl, C. Yaşar, A pseudo spot price algorithm applied to short term hydrothermal scheduling problem, Electric Power Components and Systems , Volume 29, No 11, p.112-119, 2001.

- 
- [19] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 412 p, 1989.