SÖZDE YAKIT FİYATINI KULLANAN BİR AKTİF GÜÇ DAĞITIM TEKNİĞİNİN HAM ENERJİ KAYNAĞI KISITLI TERMİK BİRİMLER İÇEREN SİSTEME UYGULANMASI

Celal YAŞAR[1] **Salih FADIL**[2]

[1]Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fak., Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, 43100, Kütahya
[2] Osmangazi Üniversitesi, MMF, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Batı Meşelik, 26480, Eskişehir

[1]e-posta: cyasar@dumlupinar.edu.tr [2] e-posta: sfadil@ogu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Aktif güç dağıtım tekniği, Gradyent metodu, Salınım bara ceza faktörleri

ABSTRACT

A lossy electric energy system that contains normal thermal and limited energy supply thermal units are considered in this paper. It is assumed that all limited energy supply thermal units are fueled under take-or-pay fuel agreement. Total fuel cost of normal thermal units for a specific operation period is made minimum under some possible electric and fuel constraints. Transmission loss is added into the optimization problem via reference bus penalty factors. Reference bus penalty factors are obtained by using jacobian matrix which is calculated during Newton-Raphson load flow calculations. The solution algorithm based on first-degree gradient method is tested on an example problem and the obtained results are also discussed.

1. GİRİŞ

Makalede, ham enerji kaynağı kısıtlı ve normal termik birimlerden oluşan kayıplı bir sistem göz önüne alınmıştır. Ya al yada öde (take-or-pay) anlaşması gereği sistemdeki ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin göz önüne alınan işletim süreleri boyunca harcayacağı yakıtın bir alt sınırı belirlenmektedir. Enerji üreten birimleri işleten şirket, yakıtı satan şirketten anlaşmada belirlenen yakıt miktarının alt sınırından daha az yakıt almayacağını garanti etmektedir. Eğer belirlenen miktardan daha az yakıt alınırsa, yakıtı satan şirkete belirlenen alt sınırda yakıt almış gibi ödeme yapılmaktadır [1]. Ele alınan sistemde belirli bir işletim zaman diliminde, ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin taahhüt edilen miktardan daha az yakıt harcaması durumunda, sistemdeki toplam termik maliyet yüksek olabilmektedir. Böyle bir durumda ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin taahhüt edilen miktar kadar ham enerji kullanması kısıtı altında bulunan optimal çözüm sistemdeki toplam maliyeti düşürebilmektedir.

Literatürde, sistem kayıplarının salınım bara ceza faktörleri yardımıyla optimizasyon işlemine katılarak çözüldüğü kısa dönem hidrotermal koordinasyon probleminde gradyent metodu kullanılmıştır [2]. Ayrıca ham enerji kaynağı kısıtlı termik birim içeren sistem sözde (pseudo) spot elektrik fiyat algoritmasıyla [3]'de, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birim içeren kısa dönem hidrotermal koordinasyon problemi genetik algoritma metodu kullanılarak [4]'de çözülmüştür.

Bu çalışmada birinci derece gradyent metod kullanılmıştır. Metod, optimizasyon işlemine olası bütün kısıtların dikkate alındığı mümkün olan çözümle (feasible solution) başlar ve tüm zaman dilimlerinde mümkün olan çözümü sürdürerek mümkün olan yeni bir optimum çözüm bulur. Bu metotla bulunan sistemin optimal çalışma noktası, başlangıç değerlerine bağlı olarak değişebilir. Metodun avantajı, başlangıç şartlarına bağlı olarak genelde her defasında sistem üzerinde iyileştirme sağlamasıdır. Dezavantajı ise, başlangıç şartlarına bağlı olduğu için sağlanan bu iyileştirmenin en iyi olması konusunda şüphenin bulunmasıdır. Gradyent metotla yapılan işlemde açık bir durma kriteri bulunmamakla birlikte yapılan işlemlerde iterasyon sayısının belirli bir değeri aşmaması istenir [1].

2. PROBLEMİN MATEMATİKSEL İFADESİ

Ham enerji kaynağı kısıtlı ve normal termik birimlerden oluşan sisteme ait optimizasyon problemi matematiksel olarak aşağıda verilmektedir.

$$Min\ F_{toplam} = \sum_{j=1}^{J_{max}} \left[\sum_{n \in N_s} F_n(P_{Gs,nj}) + F_{sal}(P_{Gs,sal\,j}) \right] t_j\, , R \quad (1)$$

$$P_{yük,j} + P_{kayıp,j} - \sum_{n\in \mathbf{N}_s} P_{Gs,nj} - \sum_{k\in \mathbf{N}_T} P_{GT,kj} - P_{Gs,sal\,j} = 0$$

$$j = 1,\ldots, j_{max} \tag{2}$$

$$P_{Gs,n}^{min} \le P_{Gs,nj} \le P_{Gs,n}^{max}, \quad n \in \mathbf{N}_s, \quad j = 1,\ldots, j_{max} \tag{3}$$

$$P_{GT,k}^{min} \le P_{GT,kj} \le P_{GT,k}^{max}, \quad k \in \mathbf{N}_T, \quad j = 1,\ldots, j_{max} \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{j_{max}} t_j \sum_{k\in \mathbf{N}_T} A_k(P_{GT,kj}) - A_{toplam} = 0 \tag{5}$$

Denklem (1)'deki R harfi hayali para birimini temsil etmektedir. Yukarıda verilen ifadelerde kullanılan sembollerin anlamları aşağıda verilmiştir.

F_{toplam} = öngörülen işletim süresi boyunca sistemdeki normal termik birimlerin toplam maliyeti, (R),

j = alt zaman indeksi,

$j_{\max}$ = toplam alt zaman dilimi sayısı,

$P_{Gs,nj}$, $P_{GT,kj}$ = *n.* normal termik ve *k.* ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin *j.* alt zaman dilimindeki aktif güç üretimi, *(MW)*,

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

$F_{sal}(P_{Gs,sal\,j})$ = salınım barasına bağlı normal termik üretim biriminin *j.* alt zaman dilimindeki aktif güç üretimi $P_{Gs,sal\,j}$ iken saat başına maliyeti, (R/h),

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)*,

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

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

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

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

N_s, N_T = sırasıyla ele alınan sistemdeki tüm normal termik ve ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimleri içeren kümeler.

Problemin çözümünden, (2-5) kısıtlarını sağlayan ve (1)'de verilen maliyet fonksiyonunu minimum yapan $P_{Gs,nj}$, $n \in \mathbf{N}_s$, $P_{GT,kj}$, $k \in \mathbf{N}_T$, $P_{Gs,sal\,j}$, $j = 1,\ldots, j_{max}$ değerleri elde edilmektedir.

3. PROBLEMİN ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Denklem (1)'de verilen toplam maliyetteki değişim, sadece birinci mertebeden türevler dikkate alındığından aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta F_{toplam} = \sum_{j=1}^{j_{max}} \left(\sum_{n\in \mathbf{N}_s} \frac{dF_n(P_{Gs,nj})}{dP_{Gs,nj}} \Delta P_{Gs,nj} + \frac{dF_{sal}(P_{Gs,sal\,j})}{dP_{Gs,sal\,j}} \Delta P_{Gs,sal\,j} \right) t_j \tag{6}$$

Denklemdeki $\Delta P_{Gs,nj}$ ve $P_{Gs,sal\,j}$'nin katsayıları birim enerji fiyatı *R/MWh* boyutunda olup ΔF_{toplam}'de, R olarak toplam maliyetteki değişimi göstermektedir. Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin tüketecekleri toplam yakıt miktarı, ya al yada öde anlaşmasıyla sabit bir değer olarak belirlenmiştir. Bu nedenle (6)'da, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlere ait toplam yakıt maliyeti yer almamaktadır. Benzer şekilde (2) denklemiyle verilen eşitlik kısıtına ait değişim yazılırsa $P_{yük,j}$ sabit olduğundan denklem (7) elde edilir.

$$\Delta P_{Gs,sal\,j} = \Delta P_{kayıp,j} - \sum_{n\in \mathbf{N}_s} \Delta P_{Gs,nj} - \sum_{k\in \mathbf{N}_T} \Delta P_{GT,kj}, \quad j = 1,\ldots, j_{max} \tag{7}$$

Ele alınan sistemde *j.* zaman dilimindeki toplam kayıptaki değişim (8)'de verildiği gibi yazılabilir.

$$\Delta P_{kayıp,j} = \sum_{n\in \mathbf{N}_s} \frac{\partial P_{kayıp,j}}{\partial P_{Gs,nj}} \Delta P_{Gs,nj} + \sum_{k\in \mathbf{N}_T} \frac{\partial P_{kayıp,j}}{\partial P_{GT,kj}} \Delta P_{GT,kj} + \frac{\partial P_{kayıp,j}}{\partial P_{Gs,sal\,j}} \Delta P_{Gs,sal\,j} \tag{8}$$

Denklem (8)'de verilen $\Delta P_{kayıp,j}$ ifadesi (7) denkleminde yerine konularak gerekli düzenlemeler yapılırsa (9) elde edilir.

$$\Delta P_{Gs,sal j} = -\sum_{n\in \mathbf{N}_s} \left(1 - \frac{\partial P_{kayıp,j}}{\partial P_{Gs,nj}}\right) \Delta P_{Gs,nj} - \sum_{k\in \mathbf{N}_T} \left(1 - \frac{\partial P_{kayıp,j}}{\partial P_{GT,kj}}\right) \Delta P_{GT,kj} \tag{9}$$

Çözümde salınım bara ceza faktörleri kullanıldığından (9)'un elde edilmesinde $\frac{\partial P_{kayıp,j}}{\partial P_{Gs,sal\,j}} = 0$ alınmıştır.

Denklem (9)'daki parantez içlerindeki ifadeler salınım bara ceza faktörlerinin tersi olarak (10)'daki gibi tanımlanmıştır.

---

[1] $1\,ccf = 10^3\ ft^3 = 27.317\ m^3$

$$\beta_{Gs,nj} = 1 - \frac{\partial P_{kayıp,j}}{\partial P_{Gs,nj}}, \quad \beta_{GT,kj} = 1 - \frac{\partial P_{kayıp,j}}{\partial P_{GT,kj}} \tag{10}$$

Denklemde görülen $\beta_{Gs,nj}$ ve $\beta_{GT,kj}$ değerleri *j.* alt zaman aralığındaki *n.* termik birim ile *k.* ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimin ceza faktörlerinin terslerine eşittir. Bu değerler *j.* zaman aralığında yapılan yük akışı çözümünde elde edilen Jacobian matrisi kullanılarak bulunmaktadır [1,2]. Sistemde bulunan ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin harcadıkları yakıt miktarları, birimlerin aktif çıkış güçlerinin fonksiyonları şeklinde $A_{k,j} = A_k(P_{GT,kj})$, $\forall k \in \boldsymbol{N}_T$, $j = 1,\ldots,j_{max}$ gibi yazılabilmektedirler. $A_{k,j}$'deki değişim, birinci mertebeden türevler gözönüne alınarak, $P_{GT,kj}$'deki değişim cinsinden yazılırsa (11)'deki eşitlik elde edilir.

$$\Delta A_{k,j} = \frac{dA_k(P_{GT,kj})}{dP_{GT,kj}} \Delta P_{GT,kj}, \ \forall k \in \boldsymbol{N}_T, \ j = 1,\ldots,j_{max} \tag{11}$$

Denklemden $\Delta P_{GT,kj}$ değişim miktarı çekilirse, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\Delta P_{GT,kj} = \Delta A_{k,j} \Bigg/ \left(\frac{dA_k(P_{GT,kj})}{dP_{GT,kj}} \right), \forall k \in \boldsymbol{N}_T, \ j = 1,\ldots,j_{max} \tag{12}$$

Denklem (10) ve (12)'deki ifadeler önce (9)'da yerine konulup sonra elde edilen $\Delta P_{Gs,sal\,j}$ ifadesi (6)'da yerine konursa, aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\Delta F_{toplam} = \sum_{j=1}^{j_{max}} \left\{ \sum_{n \in \boldsymbol{N}_s} \left[\frac{dF_n(P_{Gs,nj})}{dP_{Gs,nj}} - \beta_{Gs,nj} \frac{dF_{sal}(P_{Gs,sal\,j})}{dP_{Gs,sal\,j}} \right] \Delta P_{Gs,nj} - \sum_{k \in \boldsymbol{N}_T} \beta_{GT,kj}\, \gamma_{sal,kj}\, \Delta A_{kj} \right\} t_j \tag{13}$$

Denklemde sözde yakıt fiyatı olarak adlandırılan $\gamma_{sal,kj}$ ifadesi (14)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\gamma_{sal,kj} = \left(\frac{dF_{sal}(P_{Gs,sal\,j})}{dP_{Gs,sal\,j}} \right) \Bigg/ \left(\frac{dA_k(P_{GT,kj})}{dP_{GT,kj}} \right), (R/ccf, R/m^3, R/ton \ vs.), \quad k \in \boldsymbol{N}_T \tag{14}$$

Denklem (13)'deki toplam maliyetteki değişim, ΔF_{toplam}, optimizasyon işleminde daima negatif yapılmak istenir. Bu durumda yeni toplam maliyet aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$F^{(1)}_{toplam} \cong F^{(0)}_{toplam} + \Delta F^{(0)}_{toplam} \tag{15}$$

Denklem (15)'deki $F^{(1)}_{toplam}$ toplam maliyetinde, bir önceki $F^{(0)}_{toplam}$ maliyetine göre bir azalma meydana gelmelidir. Bu azalmayı sağlayan üretim birimlerinin yeni değerleri bulunur. Bu yeni değerlerle yeni yük akışı gerçekleştirilir. Bu işleme (16)'da verilen durma kriteri sağlanıncaya kadar devam edilir.

$$(F^{(g)}_{toplam} - F^{(g+1)}_{toplam}) \le TOL_{\Delta F_{toplam}} \tag{16}$$

Durma kriterindeki *g* harfi iterasyon sayısını, $TOL_{\Delta F_{toplam}}$ seçilen tolerans değerini göstermektedir.

4. PROBLEMİN ÇÖZÜM ALGORİTMASI

Adım-1: İterasyon sayacı $g = 0$ alınır. Başlangıç değerleri $P^{(g)}_{GT,kj}$, $k \in \boldsymbol{N}_T$, $j = 1,\ldots,j_{max}$ için (4), (5) ve $P^{(g)}_{Gs,nj}$, $n \in \boldsymbol{N}_s$, $j = 1,\ldots,j_{max}$ için ise (3), $\sum_{n \in \boldsymbol{N}_s} P^{(g)}_{Gs,nj} \le P_{yük,j} - \sum_{k \in \boldsymbol{N}_T} P^{(g)}_{GT,kj}$, $j = 1,\ldots,j_{max}$ kısıtlarını sağlayacak şekilde seçilirler. Daha sonra seçilen aktif üretim değerleriyle tüm zaman aralıklarında yük akışı yapılır ve $P^{(g)}_{Gs,sal\,j}$, $\beta^{(g)}_{Gs,nj}$, $\beta^{(g)}_{GT,kj}$, $A^{(g)}_{kj}$, $j = 1,\ldots,j_{max}$, $F^{(g)}_{Toplam}$ değerleri hesaplanır.

Adım-2: Denklem (13)'te $S\{\boldsymbol{N}_s\} \times j_{max}$ tane olan $\Delta P_{Gs,nj}$ terimlerine ait katsayılar hesaplanır. Bu bölümde kullanılan $S\{\boldsymbol{N}_s\}$ve $S\{\boldsymbol{N}_T\}$ ifadeleri sırasıyla sistemdeki normal termik ve ham enerji kaynağı kısıtlı termik birim sayılarını göstermektedir. Yine (13) denkleminde j_{max} tane olan her bir ham enerji kaynağı kısıtlı termik birime ait ΔA_{kj} terimlerinin mutlak olarak maksimum (j_{k+} aralığındaki katsayı) ve minimum değerli (j_{k-} aralığındaki katsayı) olan katsayıları bulunduktan sonra bunlar arasındaki farkın mutlak değeri bulunur.

Adım-3: $\Delta P^{(g)}_{Gs,nj}$ ve $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}}$, $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}}$ değerlerinin seçimi.

Adım-3.1: Eğer $\Delta P_{Gs,nj}$ teriminin katsayısı pozitif ise, $\Delta P^{(g)}_{Gs,nj} < 0$ alınmalıdır ve (17)'deki gibi seçilmelidir.

$$\left|\Delta P^{(g)}_{Gs,n}\right| = \alpha_s (P^{(g)}_{Gs,nj} - P^{\min}_{Gs,n}) \tag{17}$$

Eğer $\Delta P_{Gs,nj}$ teriminin katsayısı negatif ise, $\Delta P^{(g)}_{Gs,nj} > 0$ alınmalıdır ve (18)'deki gibi seçilmelidir.

$$\Delta P^{(g)}_{Gs,n} = \alpha_s (P^{\max}_{Gs,n} - P^{(g)}_{Gs,nj}) \tag{18}$$

Burada $0 < \alpha_s \le 1$ şeklinde olup çözüm noktasına yaklaştıkça (*g* sayısı arttıkça) 1'e doğru giden bir katsayıdır.

Adım-3.2: Eğer $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}}$ teriminin katsayısı (mutlak değer olarak büyük) negatif ise, $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}} > 0$ ve $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}} < 0$ olarak (19), (20), (21)'deki şartları sağlayacak şekilde seçilmelidir.

$$\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}} = \alpha_T (A^{max}_{GT,k} - A^{(g)}_{GT,kj_{k+}}), \quad 0 < \alpha_T \le 1 \tag{19}$$

$$\left|\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}}\right| = \left(\frac{t_{j_{k+}}}{t_{j_{k-}}}\right) \times \Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}} \tag{20}$$

$$\left|\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}}\right| \le (A^{(g)}_{GT,kj_{k-}} - A^{min}_{GT,k}) \tag{21}$$

Yukarıdaki denklemlerde $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}}$ ifadesi, *g.* iterasyonda ham enerji kaynağı kısıtlı *k.* termik birimin j_{k+} zaman dilimindeki artırılacak yakıt miktarını göstermektedir. $\Delta A_{GT,kj_{k-}}$ ise, *g.* iterasyonda ham enerji kaynağı kısıtlı *k.* termik birimin j_{k-} zaman dilimlerinin azaltılacak yakıt miktarını göstermektedir. $t_{j_{k+}}$ ve $t_{j_{k-}}$ sırasıyla ise j_{k+} ve j_{k-} zaman dilimlerinin sürelerini göstermektedir. $A^{max}_{GT,k}$ ve $A^{min}_{GT,k}$ ifadesi, *k.* ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimin saat başına harcayabileceği sırasıyla en çok ve en az yakıt miktarını göstermektedir. Bu değerler aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$A^{max}_{GT,k} = A_k(P^{max}_{GT,k}) \quad , \quad A^{min}_{GT,k} = A_k(P^{min}_{GT,k}) \tag{22}$$

Denklem (19)'da bulunan, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birim için arttırılması gereken yakıt miktarı $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}}$, bulunacak çözüm mümkün çözüm olduğundan ***Adım-2***'de tespit edilen bir başka zaman diliminde (j_{k-}) bu miktar kadar azaltılması gerekecektir. Bu nedenle (20)'deki azaltılması gereken miktar $\left|\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}}\right|$ artırılan miktara bağlı olarak hesaplanır. Burada artırımın ve azaltımın yapılacağı zaman dilimlerinin sürelerinin farklı olabileceği gözönüne alınmıştır. Denklem (20)'de bulunan azaltım miktarı, (21)'de hesaplanan miktardan büyük olmamalıdır. Denklem (21)'de hesaplanan değer ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimin zaman dilimindeki azaltılması gereken yakıt miktarının maksimum değerini göstermektedir. Mümkün olan çözümün sağlaması için (19) ve (21) verilen yakıt miktarları aynı olmalıdır. Benzer şekilde, eğer $\Delta A_{GT,kj_{k+}}$ teriminin katsayısı pozitif ise, $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}} < 0$ ve $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}} > 0$ olarak (23), (24), (25)'teki şartları sağlayacak şekilde seçilmelidir.

$$\left|\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}}\right| = \alpha_T (A^{(g)}_{GT,kj_{k+}} - A^{min}_{GT,k}) \tag{23}$$

$$\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}} = \left(\frac{t_{j_{k+}}}{t_{j_{k-}}}\right) \times \left|\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}}\right| \tag{24}$$

$$\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}} \le (A^{max}_{GT,k} - A^{(g)}_{GT,kj_{k-}}) \tag{25}$$

Aynı zamanda seçilen $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}}$ ve $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}}$ değerleri yardımıyla $A^{(g+1)}_{GT,kj_{k+}}$ ve $A^{(g+1)}_{GT,kj_{k-}}$ değerleri (26) ve (27) yardımıyla hesaplanmaktadır. Buradaki $A^{(g+1)}_{GT,kj_{k+}}$ ve $A^{(g+1)}_{GT,kj_{k-}}$ sembolleri sırasıyla *k.* ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimin *(g+1).* iterasyonunda j_{k+} ve j_{k-} zaman dilimlerinde harcayacağı saat başına yakıt miktarlarını göstermektedir.

$$A^{(g+1)}_{GT,kj_{k+}} = A^{(g)}_{GT,kj_{k+}} + \Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}} \tag{26}$$

$$A^{(g+1)}_{GT,kj_{k-}} = A^{(g)}_{GT,kj_{k-}} + \Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}} \tag{27}$$

Adım-4: ***Adım-3***'de bulunan $\Delta P^{(g)}_{Gs,nj}$ değişimleri ile ***Adım-2***'de bulunan bu değişimlere ait katsayılar çarpılır ve bu çarpımların mutlak değeri hesaplanır. Benzer şekilde, ***Adım-3***'de bulunan $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k+}}$, $\Delta A^{(g)}_{GT,kj_{k-}}$ değişimleri ile ***Adım-2***'de bulunan katsayıları çarpılır. Sonra bunların aralarındaki farkın mutlak değeri hesaplanır. Elde edilen $S\{\boldsymbol{N}_s\} \times j_{max}$ tane normal termik birimlere ait değişim içerisinden mutlak olarak en büyüğü seçilir. Bu terim $\Delta P_{Gs,aj_a}$ büyüklüğünü içeren terim olsun. Yine elde edilen $S\{\boldsymbol{N}_T\}$ adet ham enerji kaynağı kısıtlı termik birime ait değişim farkları içerisinden mutlak olarak en büyüğü seçilir. Bu fark terimi $\Delta A_{GT,bj_{b+}}$ ve $\Delta A_{GT,bj_{b-}}$ büyüklüklerini içersin. Sonuçta bu iki terim içinden mutlak olarak en büyüğü (en fazla azalma sağlayanı) seçilir. Eğer toplam maliyette en fazla azalmayı tespit edilen normal termik birim sağlıyorsa, bu birimin yeni aktif güç üretim değeri (28)'den hesaplanmaktadır.

$$P^{(g+1)}_{Gs,aj_a} = P^{(g)}_{Gs,aj_a} + \Delta P^{(g)}_{Gs,aj_a} \tag{28}$$

Eğer normal termik birimin değeri değiştirilmiş ise, sadece j_a zaman aralığında yeni $P^{(g+1)}_{Gs,aj_a}$ değeri kullanılarak bir yük akışı yapılır ve $P^{(g+1)}_{Gs,sal\,j_a}$, $\beta^{(g+1)}_{Gs,nj_a}$, $\forall n \in \boldsymbol{N}_s$, $\beta^{(g+1)}_{GT,kj_a}$, $\forall k \in \boldsymbol{N}_T$, $F^{(g+1)}_{toplam}$ değerleri hesaplanır. Eğer ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimin değeri değiştirilmiş ise, j_{b+} ve j_{b-} zaman aralıklarında değiştirilmesi gereken $A_{GT,bj_{b+}} = A_{GT,b}(P^{(g+1)}_{GT,bj_{b+}})$ ve $A_{GT,bj_{b-}} = A_{GT,b}(P^{(g+1)}_{GT,bj_{b-}})$ değerleri bulunur. Bu değerler kullanılarak bulunan yeni $P^{(g+1)}_{GT,bj_{b+}}$ ve $P^{(g+1)}_{GT,bj_{b-}}$ ile yük akışı yapılır. $P^{(g+1)}_{Gs,sal\,j_{b+}}$, $P^{(g+1)}_{Gs,sal\,j_{b-}}$ ve $\beta^{(g+1)}_{Gs,nj_{b+}}$, $\beta^{(g+1)}_{GT,kj_{b+}}$, $\beta^{(g+1)}_{Gs,nj_{b-}}$, $\beta^{(g+1)}_{GT,kj_{b-}}$, $\forall n \in \boldsymbol{N}_s, \forall k \in \boldsymbol{N}_T$, $F^{(g+1)}_{toplam}$ değerleri hesaplanır.

Adım-5*:* Durma kriteri denklem (16)'dan kontrol edilir. Kriter sağlanıyorsa, iterasyon işlemine son verilir. Çözüm elde edilmiştir. Eğer durma kriteri sağlanmıyorsa, $g = g + 1$ alınarak ***Adım-2***'ye gidilir. Problemin çözümüne devam edilir.

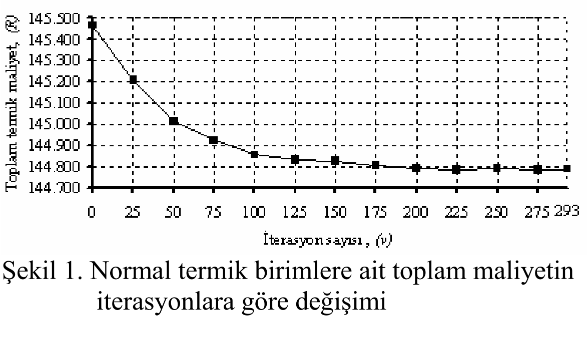
5. ÖRNEK PROBLEM ÇÖZÜMÜ

Örnek problem çözümü sayfa kısıtı nedeniyle özet şeklinde verilmiştir. Sunum sırasında metodun uygulandığı elektrik enerji sistemine ait şekil ve çözümüne ait tablolar daha geniş biçimde verilecektir.

Çözüm tekniği 5 normal ve 2 ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimin bağlı olduğu 16 baralı sisteme uygulanmıştır. Uygulamada altı eşit zaman diliminden $(t_j = 4h,\ j = 1,\ldots,6)$ oluşan bir günlük işletim süresi dikkate alınmıştır. Normal termik birimlere ait saat başına maliyet eğrileri ve ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin saat başına harcadıkları ısı eğrileri ikinci dereceden polinomlar şeklinde alınmıştır. Örnekte ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerce altı zaman dilimi boyunca toplam harcanması gereken toplam gaz miktarı $A_{toplam} = 50000 \quad ccf$ ve denklem (16)'daki durma kriteri $TOL_{\Delta F_{toplam}} = 5 \times 10^{-3}\ R$ olarak alınmıştır. Kullanılan gazın ft^3 başına verdiği ısı enerjisi ortalama bir değer olarak 1100 *Btu/ft*^{3}, gazın fiyatı ise 2,0 *R/ccf* olarak alınmıştır. Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlere ait saat başına maliyet eğrilerini bulmak için, bu birimlere ait saat başına harcanan ısı değerlerini veren eğriler 1,8182 *R/MBtu* katsayısı ile, saat başına harcanan yakıt miktarını gösteren eğrileri bulmak için ise 0,909 *ccf/MBtu* katsayısı ile çarpılmıştır.

Metodla yapılan çözümde 293 iterasyon sonunda çözüme ulaşılmıştır. Bu iteratif işlem boyunca yapılan yük akış sayısı 376 olarak elde edilmiştir. Gradyent metoda dayalı teknikle yapılan çözümde eğer ham enerji kaynağı kısıtlı bir termik birimin çıkış gücü değiştirilirse bir iterasyonda iki yük akış hesaplaması yapılır. Bunun nedeni, harcanan gaz miktarı istenen minimum miktarda sabit kaldığından bir zaman diliminde üretim biriminin çıkış gücü arttırılırken diğer bir zaman diliminde (aynı miktarda gaza karşılık gelecek şekilde) azaltılmaktadır. Bu durum her iki zaman diliminde de yük akış hesaplamasını gerektirmektedir. Bu nedenle 293 iterasyonda 376 yük akışı gerçekleştirilmiştir.

Ele alınan örnek elektrik enerji sisteminde seçilen başlangıç değerleri ile hesaplanan normal termik birimlere ait toplam maliyet 145463,77 *R*'dır. 293 iterasyon sonunda elde edilen aynı maliyet değeri ise 144787,55 *R* olarak hesaplanmıştır. Çözüm işlemi süresince her 25 iterasyondaki normal termik birimlere ait toplam maliyetin değişimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Normal termik birimlere ait toplam maliyetin iterasyonlara göre değişimi

Çözüm noktasındaki toplam maliyet, daha önce verilen normal termik birimlere ait toplam maliyet değerine harcanan toplam gazın maliyeti ilave edilerek $F_{toplam} = 144787{,}55 + 2 \times 50000 = 244787{,}55 \quad R$ olarak hesaplanmıştır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada salınım bara ceza faktörleri kullanılarak ham enerji kaynağı kısıtlı termik birim içeren kayıplı bir sistemin (olası termik ve yakıt kısıtları altında) belirli bir işletim süresi boyunca toplam termik maliyeti minimize edilmiştir. Optimizasyon algoritması 15 baralı bir örnek sistem üzerinde denenmiştir. Kullanılan metod optimizasyon işlemine olası bütün kısıtların sağlandığı çözümle başlamıştır. İşletim süreci boyunca mümkün olan çözümü sürdürerek yeni bir mümkün olan çözümle sonuca ulaşmıştır. Bu nedenle Şekil 1'den görüldüğü üzere toplam termik maliyet giderek azalmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Wood A. J., Wollenberg B. F., "Power generation operation and control ", New York-Wiley, 1996.

[2] Fadıl S., Yaşar C., "Tek Bölgeli Enterkonnekte Sistemlerde Kısa Dönem Hidrotermal Koordinasyon Problemini Çözmek için Önerien Puseydo Su Fiyatı ve Spot Elektrik Fiyatını Kullanan Bir Aktif Güç Dağıtım Tekniği" Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi, 8-14 Eylül 1997, sayfa: 536-539, ANKARA.

[3] Fadıl S., Yaşar C., "An Active Power Dispatch Technique Using Pseudo Spot Price of Electricity for a Power System Area Including Limited Energy Supply Thermal Units", ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS, Vol: 24 : pp 87-95, 2002.

[4] Fadıl S., Ergun U., "Solution to Lossy Short-Term Hydrothermal Coordination Problem with Limited Energy Supply Units by Using Genetic Algorithm", Eleco'99, International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1-5 December 1999, ELECTRICAL proceeding pp:234-238, Bursa, TURKEY.