

# AÇIK ARTIRMALI EKONOMİK YÜK DAĞITIM PROBLEMİ İÇİN FARKLI BİR YAKLAŞIM

Adem KÖK<sup>(1)</sup>

Tankut YALÇINÖZ<sup>(2)</sup>

<sup>1</sup>Niğde Tedaş, Niğde, ademkok@yahoo.com

<sup>2</sup>Niğde Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, tyalcinoz@nigde.edu.tr

*Anahtar Kelimeler : Artırmalı Ekonomik Yük Dağıtımı, Ardışıl Kuadratik Programlama, Optimizasyon*

## ÖZET

Enerji sistemlerinin yapısı günümüzde enerji sektörünün özelleştirilmesi ve daha büyük bir enerji sistemine ihtiyacın getirdiği baskı nedeniyle büyümüş ve karmaşık hale gelmiştir. Özellikle enerji sektörünün özelleştirmesi sonucu daha ekonomik olarak enerji sisteminin işletilmesi ve ucuz elektrik üretimi çok önemli konular olmuştur. Bu makalede açık artırmalı ekonomik yük dağıtım problemi için Ardışıl Kuadratik Programlama (SQP) çözümü önerilmiştir. Önerilen metotla ekonomik yük dağıtım problemi 2, 6, 20 ve 40 jeneratörlü sistemler için çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar önerilen metodun pratik güç sistemli ekonomik yük dağıtım problemlerini çözmek için kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu çalışmada 2 ve 6 grupluk sistemler için farklı fiyat fonksiyonlarının kullanılması durumunda önerilen metodun davranışı incelenmiştir.

## 1. GİRİŞ

Enerji sektörü, özelleştirmeden sonra daha ekonomik olarak enerji sisteminin işletilmesi ve ucuz elektrik üretimi konusunda daha dikkatli olmuşlardır. Enerji sistemlerinde işletim planlaması minimum maliyetin bulunması için önemlidir. İşletim planlaması genel olarak; ekonomik yük dağıtım, bakım programının yapılması, en iyi grup belirleme (unit commitment), reaktif gücün dağıtım, spot fiyatın belirlenmesi gibi konulardan oluşur. [1-3]

Bu problemler optimizasyon yöntemleri ile çözülmektedir. Enerji sistemlerinin ekonomik yük dağıtım problemi, büyük ölçekli doğrusal ve doğrusal olmayan sınırlamalardan meydana gelir. Ekonomik yük dağıtım problemi yüke, enerji sisteminin fiziksel limitlerine ve grupların limitlerine bağlı olarak maliyeti minimize etme işleminden oluşur. Ekonomik yük dağıtımında her 3 ile 5 dakika aralığında optimal şekilde yükü karşılayabilmek için her gruba düşen gücün belirlenmesi gerekir. Burada en iyi grup belirleme işlemi sonucu müsait grupların içerisinde seçilmiş bulunan n adet grubun enerji sistemine bağlı olduğu varsayılır. [1-3]

Ekonomik yük dağıtım konusu enerji sisteminin en önemli araştırma konularından biri olmuştur. Bu konuda geçmişte bir çok araştırma yapılmış ve farklı metodlar ile bu problemin çözülmesine çalışılmıştır. [2-7]

Klasik ekonomik dağıtım algoritmasının güvenilirliği fiyat fonksiyonunun “En yüksek çıkış için, en yüksek artan fiyat” olmasıdır. Fakat elektrik piyasasının serbestleştirilmesi sonucunda, fiyat fonksiyonunun yerine satıcıların açık artırmalı fiyat fonksiyonunun kullanılması gerekmektedir. Burada yalnızca fiyat fonksiyonu değil aynı zamanda piyasa stratejisinde dikkate alınmalıdır. Böylece yeni açık artırmalı ekonomik yük dağıtımında, açık artırmalı fiyat fonksiyonunun “En yüksek çıkış için, en düşük artan fiyat” olması, klasik ekonomik yük dağıtım algoritması ile arasındaki en önemli farktır. [4]

Kullanılan grubun giriş çıkış karakteristiği seçilecek metodu da doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada doğrusal olmayan karakteristiğe sahip gruplar incelenmiştir. Bu makalede ekonomik yük dağıtım problemleri Matlab Optimizasyon alet kutucuğunda bulunan Ardışıl Kuadratik Programlama algoritması kullanılarak çözülmüştür.

## 2. PROBLEMİN FORMULASYONU

Bu çalışmada giriş-çıkış karakteristiği ikinci dereceden bir denklemlerle ifade edilmiştir. Bu kısımda satıcıların açık artırmalı fiyat fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (1)$$

Burada

$P_i$  : i' nci Jeneratörün çıkış gücü

$F_i(P_i)$  : jeneratörün  $P_i$  gücünü üretebilmesi için gereken fiyat,

$a_i, b_i, c_i$  : i' nci Jeneratörün fiyat katsayılarıdır.

Artırmalı fiyat, açık artırmalı fiyat fonksiyonunun ilk türevi olarak tanımlanabilir. Buda aşağıda verilmiştir.

$$IC_i(P_i) = b_i + 2 * c_i * P_i \quad (2)$$

Burada  $IC_i(P_i)$  satıcıların açık artırma artımsal fiyatıdır. Fiyat fonksiyonu jeneratörlerin giriş-çıkış eğrilerine göre belirlenir. Fakat elektrik piyasası serbestleştirilmesi ile birlikte satıcıların birinci amacı daha fazla kazanç sağlamaktır. Bu nedenle satıcının açık artırma fiyat fonksiyonunu, yalnızca üretimin fiyat fonksiyonu değil, aynı zamanda piyasa stratejisinde etkiler. [4]

Açık artırmalı dağıtım problemi formülasyonunda, en düşük açık artırma fiyatı; satıcıların minimum açık artırma fiyatlarının toplamına eşittir. Burada minimizasyon yapılırken bazı kısıtlamaların dikkate alınması gerekir. En basit yapılı ekonomik yük dağıtımında kısıtlamalardan bazıları şunlardır: jeneratörlerin üretim limitlerinin dikkate alınması ve tüketilen enerjinin dengelenmesi gibi. Toplam jeneratörlerin işletme maliyeti matematiksel olarak aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\text{Min} \sum_{P_i}^n F_i(P_i) = \text{Min} \sum_{P_i}^n (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad (3)$$

Yukarıda denklem (3) ile verilen amaç fonksiyonu (maliyet fonksiyonu) aşağıdaki kısıtlamalara bağlı olarak çözülür.

*Güç Eşitlik Denklemi :*

$$\sum_{i=1}^n P_i - P_D - P_L = 0 \quad (4)$$

Burada iletim hattının kaybı basit olarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$P_L = \sum_{i=1}^n B_i P_i^2 \quad (5)$$

Burada n grup sayısı,  $P_D$  toplam talep,  $P_L$  iletim kaybı ve  $B_i$  iletim hattı kaybının katsayılarıdır.

*Jeneratörlerin Çıkış Kapasitesi :*

$$P_{\min,i} \leq P_i \leq P_{\max,i} \quad (6)$$

Burada  $P_{\min,i}$  i'nci jeneratörün minimum çıkış gücü ve  $P_{\max,i}$  i'nci jeneratörün maksimum çıkış gücüdür.

Burada ekonomik yük dağıtım problemi, fiyat fonksiyonları yerine satıcıların açık artırmalı fiyat fonksiyonları kullanılmıştır. En iyi optimal çözüm için gerekli bazı şartlar aşağıda verilmiştir:

Satıcıların kontrat miktarı aşağıdaki koşulları sağlamalıdır.

1)  $\sum_{i=1}^n P_{\min,i} > P_D$  ve  $\sum_{i=1}^n P_{\max,i} < P_D$  olması durumunda uygun çözüm bulunamaz.

2) Eğer satıcıların kontrat miktarı aşağıdaki gibi ise  $\sum_{i=1}^n P_{\min,i} = P_D$  her satıcının satacağı miktar minimum üretim miktarı kadar olur.

3) Eğer satıcıların kontrat miktarı aşağıdaki gibi ise  $\sum_{i=1}^n P_{\max,i} = P_D$  her satıcının satacağı miktar maksimum üreteceği kadar olur.

4)  $\sum_{i=1}^n P_{\min,i} < P_D < \sum_{i=1}^n P_{\max,i}$  koşulu sağlarsa

Kuhn-Tucker koşulları sağladığında optimum sonuçlar bulunmuş olur.

### 3. ARDIŞIL KUADRATİK PROGRAMLAMA ALGORİTMASI

Ardışıl kuadratik programlamada, doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin çözümü, basitleştirilmiş problemlerin düzenli olarak kuadratik programlama tarafından çözülmesi sonucu elde edilir. Bu nedenle doğrusal olmayan kısıtlamalar doğrusal hale getirilir ve amaç fonksiyonu ikinci dereceden denkleme dönüştürülür [8]. Powell [9] Hessian matris yerine simetrik matris kullanılmasını önermiştir. Bu yaklaşık Hessian matris her iterasyonda BFGS (Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno) metodu kullanılarak yeniden hesaplanır. Çizgi boyunca araştırma yapılarak değişkenlerin yeni değerleri elde edilir. Aktif set metodu kullanarak bütün kısıtlamalar yerine çalışma serisi (working set) olarak seçilen daha az miktarda kısıtlama göz önüne alınır. Çalışma serisi çözüm sırasında aktif olacağı tahmin edilen kısıtlamalardan oluşur. Aktif set yönteminin en büyük üstünlüğü, verimliliği ve hızı artırmaktır. Ardışıl kuadratik programlama metodu, eklendirilmiş (augmented) Lagrangian metottan ve penaltı metotların daha verimli ve güvenli olduğu değişik makalelerde ispat edilmiştir [10].

Bir ikinci dereceden amaç fonksiyonu ve kısıtlamalar aşağıdaki gibi verilsin:

$$\min_x (x^T Hx + cx)$$

$$h(x) = 0,$$

$$g(x) \leq 0$$

Burada x değişkenleri, H hessian (katsayı) matrisini, h(x) eşitlik kısıtlamasına ait denklem ve g(x) de

eşitsizliğe ait denklemi gösterir. Burada yeni  $x$  değeri şu şekilde hesaplanır.

$$x^{(t+1)} = x^{(t)} + \alpha d^{(t)}$$

Araştırma yönü  $d^{(t)}$  hesaplanır ve amaç fonksiyonu aktif kısıtlamalar limitlerinde kalmak üzere minimize edilir. Burada  $\alpha$  atlama mesafesidir.

Grace [11] Matlab Optimizasyon alet kutucuğunda bulunan ardışıl kuadratik programlama algoritmasının nasıl uygulanacağını açıklamaktadır. Burada bizim amacımız ardışıl kuadratik programlamanın alt programı  $fmincon$  ile sınırlı optimizasyon problemlerini çözmektir.

#### 4. SAYISAL SONUÇLAR

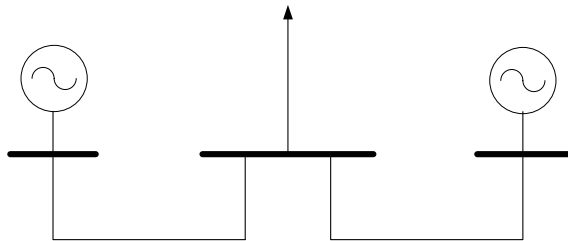
Bu makalede açık artırmalı ekonomik yük dağıtım problemleri Matlab Optimizasyon alet kutucuğunda bulunan Ardışıl Kuadratik Programlama algoritması kullanılarak çözülmüştür. Burada önerilen metotla ekonomik yük dağıtım problemi 2, 6, 20 ve 40 jeneratörlü test sistemleri için çözülmüştür. Farklı fiyat fonksiyonlarına sahip test sistemlerindeki davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada iletim kayıpları ihmal edilmiştir.

##### 4.1 Örnek 1

Üç baralı ve iki jeneratörlü bir enerji sistemi Şekil 1 de verilmiştir. Bu örnek için jeneratörlere ait fiyat fonksiyonları ve minimum/maksimum çıkış güçleri aşağıda verilmiştir.

$$F_1 = 2.5 + 0.25 * P_1 + 0.0014 * P_1^2 \quad 20 < P_1 < 100$$

$$F_2 = 5 + 0.18 * P_2 + 0.0018 * P_2^2 \quad 20 < P_2 < 100$$



Şekil.1 3 Baralı bir enerji sistemi

Huang ve Zhao [4] önerdikleri genetik algoritma (GA) sonuçları ile burada önerilen metodun (SQP) sonuçları karşılaştırılmıştır. Burada toplam talep 100 MW olarak alınmıştır. Tablo 1' den de görüleceği üzere sonuçların aynı olduğu görülmüştür.

Tablo 1 İki gruplu test sisteminin sonuçları

| Metot | P1(MW) | P2(MW) | Fiyat(\$/h) |
|-------|--------|--------|-------------|
| GA    | 45.3   | 54.7   | 36.93       |
| SQP   | 45.31  | 54.69  | 36.93       |

##### 4.2 Örnek 2

Güç sistemleri serbestleştirilmesinde açık artırma fiyat fonksiyonu konveks veya konkav olabilir. Güç sistemleri serbestleştirilmesinde satıcılar açık artırma fiyat fonksiyonuna "En yüksek çıkış, en düşük artan fiyat" olması ile açık artırmalı ekonomik yük dağıtım problemi tanımlanır. Şekil 1' de üç baralı ve iki jeneratörlü enerji sisteminde açık artırma fiyat fonksiyonun konkav olması durumunda jeneratörlere ait fiyat fonksiyonları aşağıdaki gibi olduğunu düşünelim.

$$F_1 = 2.5 + 0.55 * P_1 - 0.0012 * P_1^2 \quad 20 < P_1 < 100$$

$$F_2 = 5 + 0.58 * P_2 - 0.0010 * P_2^2 \quad 20 < P_2 < 100$$

Bu durumda genetik algoritma ile elde edilen sonuçlar ile SQP'nın sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 2' de verilmiştir. Burada da toplam talep 100 MW'tır. Fiyat fonksiyonlarının konkav olması durumunda da önerilen metotla iyi sonuçlar bulunmuştur.

Tablo 2 Konkav fiyat fonksiyonlu 2-gruplu sistemin sonucu

| Metot | P1(MW) | P2(MW) | Fiyat(\$/h) |
|-------|--------|--------|-------------|
| GA    | 80     | 20     | 55.02       |
| SQP   | 80     | 20     | 55.02       |

##### 4.3 Örnek 3

Örnek 3' de önerilen metod 6 gruplu bir enerji sistemine uygulanmıştır. Bu örnek için jeneratörlere ait fiyat fonksiyonları ve minimum/maksimum çıkış güçleri aşağıdaki gibidir.

$$F_1 = 0.001562 P_1 + 7.92 P_1 + 561.0 \quad 100 < P_1 < 600$$

$$F_2 = 0.00194 P_2 + 7.85 P_2 + 310.0 \quad 100 < P_2 < 400$$

$$F_3 = 0.00482 P_3 + 7.97 P_3 + 78.0 \quad 50 < P_3 < 200$$

$$F_4 = 0.00139 P_4 + 7.06 P_4 + 500.0 \quad 140 < P_4 < 590$$

$$F_5 = 0.00184 P_5 + 7.46 P_5 + 295.0 \quad 110 < P_5 < 440$$

$$F_6 = 0.00184 P_6 + 7.46 P_6 + 295.0 \quad 110 < P_6 < 440$$

Bu örnekte farklı yük değerlerine karşılık jeneratörlerin ürettikleri güç değerleri ve fiyat değeri bulunmuştur. Toplam talep güçleri olarak 800 MW, 1200 MW, 1800 MW ve 2238 MW lık güçler için

grupların çıkış güçleri toplam üretim fiyatı Tablo 3 de gösterilmiştir. Talep gücü artırılırsa çıkış gücü ve fiyat da artmıştır.

Tablo 3 6-gruplu enerji sisteminin sonuçları

| Çıkış Gücü   | Talep (MW) |          |          |          |
|--------------|------------|----------|----------|----------|
|              | 800        | 1200     | 1800     | 2238     |
| 1. Grup (MW) | 100.00     | 123.76   | 248.00   | 361.93   |
| 2. Grup (MW) | 100.00     | 117.68   | 217.71   | 309.45   |
| 3. Grup (MW) | 50.00      | 50.00    | 75.18    | 112.10   |
| 4. Grup (MW) | 305.62     | 448.43   | 588.04   | 590.00   |
| 5. Grup (MW) | 122.66     | 230.06   | 335.53   | 432.25   |
| 6. Grup (MW) | 122.18     | 230.06   | 335.53   | 432.25   |
| FİYAT (\$/h) | 8227.09    | 11477.09 | 16579.33 | 20465.24 |

Tablo 4 Konkav fiyat fonksiyonlu 6-gruplu bir enerji sisteminin sonuçları

|              |              |          |
|--------------|--------------|----------|
| Çıkış Gücü   | 1. Grup (MW) | 600.00   |
|              | 2. Grup (MW) | 400.00   |
|              | 3. Grup (MW) | 50.00    |
|              | 4. Grup (MW) | 385.24   |
|              | 5. Grup (MW) | 182.37   |
|              | 6. Grup (MW) | 182.39   |
| FİYAT (\$/h) |              | 15238.42 |

#### 4.4 Örnek 4

Bu örnekte 6-gruplu sistemde bazı satıcıların fiyat fonksiyonlarını konkav vermesi durumunda sistemin davranışı incelenmiştir. Önerilen metod konkav fiyat fonksiyonlu bir enerji sistemine uygulanmıştır. 6 gruplu sistemin fiyat fonksiyonları ve minimum/maksimum çıkış güçleri aşağıda verilmiştir.

$$F_1 = -0.001562P_1 + 7.92 P_1 + 561.0 \quad 100 < P_1 < 600$$

$$F_2 = -0.00194 P_2 + 7.85 P_2 + 310.0 \quad 100 < P_2 < 400$$

$$F_3 = 0.00482 P_3 + 7.97 P_3 + 78.0 \quad 50 < P_3 < 200$$

$$F_4 = 0.00139 P_4 + 7.06 P_4 + 500.0 \quad 140 < P_4 < 590$$

$$F_5 = 0.00184 P_5 + 7.46 P_5 + 295.0 \quad 110 < P_5 < 440$$

$$F_6 = 0.00184 P_6 + 7.46 P_6 + 295.0 \quad 110 < P_6 < 440$$

Buradan da görüldüğü gibi bir ve iki nolu grupların fiyat fonksiyonları örnek 3 den farklıdır. Bu örnekte talep 1800 MW olduğunda elde edilen sonuçlar Tablo 4 de verilmiştir. Buradan da görüleceği üzere önerilen metod bu sistemde kolaylıkla çözmektedir.

#### 4.5 Örnek 5

Buraya kadar ki örnekler küçük sistemlerdeki önerilen metodun davranışını veriyordu. Bu örnekte büyük sistemlerde önerilen metodun cevabı incelenecektir. SQP metod ile 20 gruplu ve 40 gruplu sistemler çözülmüştür. 20 gruplu sistemin verileri referans [5] de ve 40 gruplu sistemin verileri de referans [12] de bulunabilir.

Tablo 5 de 20 ve 40 gruplu sistem için sonuçlar gösterilmiştir. Buradanda görüldüğü gibi önerilen metod büyük sistemler içinde iyi sonuçlar vermektedir. İşletme süresi 40 grupluk sistemler için bir kaç saniye çevresinde olmaktadır.

Tablo 5 20 ve 40 gruplu sistemlere ait sonuçlar

| Grup sayısı | Talep (MW) | Fiyat (\$/h) |
|-------------|------------|--------------|
| 20          | 4600       | 63401.27     |
| 40          | 9500       | 128424.26    |

## 5. SONUÇ

Bu makalede açık artırmalı ekonomik yük dağıtım problemi için ardışıl kuadratik programlama çözümü önerilmiştir. Önerilen metotla ekonomik yük dağıtım problemi 2, 6, 20 ve 40 jeneratörlü sistemler için çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar önerilen metodun pratik güç sistemlerini de çözebildiğini göstermiştir. İşletme süresi 40 grupluk sistemler için bir kaç saniye olması önerilen metodun pratik sistemlerde kullanılabileceğinin bir kanıtıdır. Bu çalışmada konkav fiyat fonksiyonuna sahip olan sistemlerde çözülmüş ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. İleride ki çalışmalarda bu yöntem ile daha karmaşık problemlerin çözülmesi amaçlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Wood A.J. and Wollenberg B.F., Power Generation Operation and Control, John Wiley & Sons, New York 1996.
- [2] Chowdhury B.H. and Rahman S., A review of recent advances in economic dispatch, IEEE Trans. on Power Systems; Vol. 5, No 4, pp. 1248-1259, 1990.
- [3] Talaq J.H., El Hawary F. and El Hawary M.E., A Summary of environmental / economic dispatch

algorithms, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, pp. 1508-1516, 1994.

- [4] Huang G. and Zhao Q., An Auction-Based Dispatch Algorithm for Deregulated Power Systems, IEEE Power Engineering Society Winter meeting, Vol.2 pp. 1220-1225, 23-27 Jan. 2000.
- [5] Yalcinoz T. and Altun H., Comparison of simulation algorithms for Hopfield neural network: an application of economic dispatch, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 8, No. 1, pp. 67-80, 2000.
- [6] Chen C.L and Chen N., Direct Search Method for Solving Economic Dispatch Problem Considering Transmission Capacity Constraints, IEEE Trans. on Power Systems., Vol. 16, No. 4, 2001
- [7] Song Y.H., Wang G.S., Wang P.Y., Johns A.T., Environmental/ economic dispatch using fuzzy logic controlled genetic algorithms, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, pp. 377-382, July 1997.
- [8] Gill P.E., Murray W. and Wright M.H., Practical optimization, Academic Press, London, 1981.
- [9] Powell M.J.D., Algorithms for Nonlinear Constraints That Use Lagrangian Functions, Mathematical Programming, Vol. 14, pp. 224-248, 1978.
- [10] Chat-Uthai C. et. al., Nonlinear Constrained Optimization Techniques for Magnetostatic Problems, Proc. of the Int. Symposium on Advanced Computational and Design Techniques in Applied Electromagnetic Systems, Seoul, Korea, 1994.
- [11] Grace A., Optimization Toolbox: for Use With MATLAB, The MathWorks Inc, 1990.
- [12] P.H. Chen and H.C. Chang, Large-scale economic dispatch approach by genetic algorithm, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 10 No. 4, pp. 1919-1926 1995.