

TÜRKİYE'DEKİ 22 BARALI 380 kV'LUK GÜÇ SİSTEMİ İÇİN EKONOMİK DAĞITIM VE OPTİMAL GÜÇ AKIŞI YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Mehmet KURBAN*, Ümmühan BAŞARAN FİLİK*

Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 26470/Eskişehir

Geliş Tarihi : 15.03.2007

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye'deki 380 kV'luk enerji iletim hatlarıyla birbirine bağlı EÜAŞ (Elektrik Üretim Anonim Şirketi) tarafından işletilen 8 tane termik santral bulunan 22 baralı 380 kV'luk güç sistemi için santrallerin en düşük maliyetle yük talebini karşılaması amacıyla ekonomik dağıtım ve optimal güç akışı yöntemleri kullanılmış ve bulunan sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları tablo ve şekillerle verilmiştir. Yapılan ekonomik dağıtım ve optimal güç akışı (OGA) analizleri, MATLAB®'de geliştirilen yazılımlarla gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bu yazılımlar, grafiksel kullanıcı ara yüzü (GUI) oluşturularak farklı güç sistemleri için güç akışı, optimal güç akışı ve ekonomik dağıtım analizleri yapabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan tüm veriler, TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) ve EÜAŞ'tan alınmıştır.

Anahtar Kelimeler : Güç akışı, Optimal güç akışı, Ekonomik dağıtım, MATLAB®.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF ECONOMIC DISPATCH AND OPTIMAL POWER FLOW METHODS FOR 22-BUS 380-kV POWER SYSTEM IN TURKEY

ABSTRACT

In this paper, the economic dispatch and optimal power flow (OPF) methods for the purpose of supplying the load demand with minimum cost is used for 22-bus 380-kV power system in Turkey which consists of 8 thermal plants operated by EUAS (Electricity Generation Co. Inc.) and the results found are analyzed comparatively. The results of analysis are given in tables and figures. The analysis made is implemented by the software using MATLAB®. Furthermore, the software can be used for different power systems by using the graphical user interface (GUI). All data used in this study is taken from TEIAS (Transmission System Operator of Turkey) and EUAS.

Key Words : Power flow, Optimal power flow, Economic dispatch, MATLAB®.

1. GİRİŞ

19. yüzyılın sonlarında bulunan elektrik enerjisi, öncelikli olarak aydınlatmaya amacıyla kullanılmış ve daha sonraları kullanım alanı genişledikçe bu enerjiye duyulan ihtiyaç ve talep artmıştır. Bu artan talebi en uygun şekilde karşılayabilmenin yolu,

ileriye dönük planların yapılmasıyla mümkündür. Bu nedenle, elektrik enerji sistemlerinde ekonomik dağıtım ve optimal güç akışı analizlerini uygulamanın önemi artmıştır. Bu yöntemlerin başarısı, mevcut sistemin istatistiksel verilerinin doğru ve düzenli tutulmasına bağlıdır. Güç sisteminin tasarımı ve işletilmesi oldukça karmaşık bir problemdir. Bilgisayar teknolojisindeki

gelişmeler sonucunda güç sistemlerinin, oluşturulan yazılımlarla simülasyonu yapılmaktadır.

Ekonomik dağıtım analizinin amacı, en düşük maliyetle talep edilen enerjinin karşılanmasıdır. Böylece, güç sistemlerindeki sermaye, kar olarak geri dönmektedir. Optimal güç akışı analizi ise çeşitli kısıtlamalar altında optimal çözüm bulmaktadır. Ekonomik dağıtım ve optimal güç akışı analizleriyle ilgili olarak yapılan başlıca çalışmalar şunlardır: Hermann ve Tinney tarafından yapılan çalışmada, optimal güç akışı çözüm yöntemlerine değinilmiş gradient yöntemiyle problemlerin çözümüne yer verilmiştir (Dommel ve Tinney, 1968). Rashed ve Kelly tarafından yapılan çalışmada, Lagrange çarpanları, hessian ve jacobian matrisleri ile geliştirilen algoritmaya yer verilmiştir (Rashed ve Kelly, 1974). Happ tarafından yapılan çalışmada, klasik ekonomik dağıtım yöntemi ve optimal ekonomik dağıtım yöntemleri karşılaştırılmıştır (Happ, 1977). Burchett, Happ, Viarath ve Wirgau tarafından yapılan çalışmada optimal dağıtım için, güç akışı yönteminin uygulanmasına yer verilmiştir (Burchett ve ark., 1982). Lukman ve Blackburn tarafından yapılan çalışmada, güç sistemlerinde kayıpların minimuma indirilmesiyle ilgili çalışmalara yer verilmiştir (Lukman ve Blackburn, 2001). Zhiqiang, Zhijian ve Chuanwen tarafından yapılan çalışmada, istatistiksel çözümler kullanılarak, ekonomik dağıtım ve optimal güç akışı problemlerinin çözümüne yer verilmiştir (Zhiqiang ve ark., 2002).

Bu çalışmada, Türkiye'deki 380 kV'luk enerji iletim hatlarından meydana gelen EÜAŞ (Elektrik Üretim Anonim Şirketi)'a bağlı 8 tane termik santralden oluşan 22 baralılı sistem için ekonomik dağıtım ve optimal güç akışı analizleri uygulanarak sistemin en düşük maliyetle, talebi karşılaması sağlanmış ekonomik dağıtım analizi ve optimal güç akışı analizi sonuçları grafik ve tablolarla verilmiştir. Bütün bu çalışmalar, MATLAB®'da geliştirilen yazılımla gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım, grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI) kullanılarak farklı güç sistemleri için güç akışı, ve ekonomik dağıtım ve optimal güç akışı analizleri yapabilmektedir.

2. EKONOMİK DAĞITIM ANALİZİ

Sermayenin kar olarak geri dönebilmesi için güç sistemlerinde üretim birimlerinin ekonomik yüklenmesi oldukça önemlidir. Güç üretim ve dağıtımında ekonomik kullanım iki alt bölüme ayrılmaktadır. Bunlardan biri, ekonomik yüklenme diğeri ise minimum kayıptır (Grainger ve Stevenson, 1994). Ekonomik dağıtımın amacı, üretilen enerjisi

eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarını da sağlayacak şekilde üretim birimleri arasında paylaşmaktır (Dommel ve Tinney, 1968).

Sistemin toplam maliyeti (F_T), her bir birimin maliyeti (F_1, \dots, F_N) toplamına eşittir. Sistemde santrallerin çıkış güçlerinin (P_i) toplamı, talep edilen güç (P_R) ile iletim kayıplarının (P_L) toplamına eşit olmak zorundadır. Sınır denklemlerinin içine iletim kayıpları girdiğinde ekonomik yüklenme problemi daha da karmaşık bir şekle dönüşecektir. Sırasıyla maliyet fonksiyonu ve sınır denklemi şöyle ifade edilebilir:

$$\text{Min} F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_N \quad (1)$$

$$P_R + P_L - \sum_{i=1}^N P_i = \phi = 0 \quad (2)$$

Lagrange fonksiyonunun her bir güç çıkışına göre türevi alındığında, iletim şebekelerindeki kayıplar göz önünde bulundurulmalıdır. Kayıplar, şebeke empedansından ve şebekeden akan akımdan kaynaklanmaktadır. Lagrange fonksiyonunun her bir güç çıkışına göre türevi alındığında, N tane eşitlik oluşur. Bu N tane eşitlik, sınır denklemleriyle birleştirilirse şu şekilde koordinasyon denklemleri oluşmaktadır:

$$\mathcal{L} = F_T + \lambda \Phi \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{\partial F_i}{\partial P_i} - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} + \lambda \frac{dP_L}{dP_i} = \lambda \quad (5)$$

$$P_R + P_L - \sum_{i=1}^N P_i = 0 \quad (6)$$

B kayıp katsayıları, tek bir referans bara kullanılarak hesaplanmıştır. B kayıp katsayıları matrisi, kayıp ve artımsal kayıp hesaplamaları için kullanılır. Bu sistemdeki iletim kayıpları aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır (Grainger ve Stevenson, 1994).

$$P_L = \sum_i \sum_j P_i B_{ij} P_j + \sum_i B_{i0} P_i + B_{00} \quad (7)$$

Burada,

P: Bütün generatör baralarının MW olarak vektörü,
 B_{ij} : P ile aynı boyutta kare matris,
 B_{i0} : P ile aynı uzunlukta olan vektör,
 B_{00} : Sabit değer (Wood, J. ve Wollenberg, B., 1996).

Hatlarda meydana gelen kayıplar I^2R kullanılarak da hesaplanabilir. Fakat B kayıp katsayıları verilen generatör güçleri için, iletim kayıplarını hızlıca ele almaya imkan tanıyarak, optimizasyon için minimum kayıp miktarını hesaplamaya yardım eder (Sullivan, 1985).

3. OPTİMAL GÜÇ AKIŞI YÖNTEMİ

Optimal güç akışı yöntemi ilk olarak Carpentier tarafından bulunmuştur. Bu yöntem, doğrusal olmayan çok büyük bir matematik programlama problemidir ve algoritmalar geliştirilerek bu problemin çözümü gerçekleştirilir. Bunun için, çok değişik matematiksel yöntemler kullanılır. Literatürde kullanılan en önemli beş yöntem aşağıda verilmiştir:

- Lambda Öteleme Yöntemi-Eşit artan yakıt kriteri olarak da adlandırılır (EICC) (Wood ve Wollenberg, 1996). Kayıplar [B] matrisi ile gösterilir. Ekonomik dağıtım yöntemini temel alır.
- Gradient Yöntemi - Bağımlı kısıtlamalar için, penaltı fonksiyonlarını belirler (Dommel ve Tinney, 1968). Bu yöntem çok yavaş yakınsar ve eşitsizlikleri çözmek zordur.
- Newton Yöntemi - Çok hızlı yakınsayan bir yöntemdir (Sun ve ark., 1984).
- Doğrusal Programlama Yöntemi - Doğrusal olmayan yakıt maliyeti eğrisinin doğru denklemleri haline getirilmesi ile çözüme ulaşılır (Alsac ve ark., 1990).
- İç Nokta Yöntemi - Bu yöntemde eşitsizlik kısıtlamaları kolayca hesaplanabilir (Wu ve ark., 1993).

Bu çalışmada çok hızlı yakınsadığından dolayı, Newton tabanlı optimal güç akışı yöntemi kullanılmıştır. Newton Yöntemi, çözüme hızlı yakınsadığından dolayı oldukça iyi bir algoritmadır. Bu yöntemde sisteme ilk olarak verilen değerler oldukça önemlidir. Çünkü; bu değerler, sonuca daha hızlı yakınsamayı sağlarlar. Genel olarak, problem aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

Min $f(x)$ (Amaç Fonksiyonu)

Amaç, $h(x)=0, i=1,2,\dots,m$ (Eşitlik Kısıtlamaları)
 $g(x)\leq 0, i=1,2,\dots,n$ (Eşitsizlik Kısıtlamaları)

Burada m tane eşitlik, n tane eşitsizlik kısıtlaması vardır. Değişkenlerin sayısı x vektörünün boyutuna eşittir. Problemin çözümü için Lagrange Fonksiyonunun oluşturulması gerekmektedir.

$$L(z) = f(x) + \mu^T h(x) + \lambda^T g(x) \quad (8)$$

Bu ifadede, $z=[x \ \mu \ \lambda]^T$. μ ve λ Lagrange çarpanlarını göstermektedir. $h(x)$ eşitlik, $g(x)$ ise eşitsizlik kısıtlamalarını göstermektedir. Lagrange ifadesinin birinci türevleri gradient vektörünü, ikinci türevleri ise Hessian matrisini göstermektedir.

$$\nabla L(z) = \left[\frac{\partial L(z)}{\partial z_i} \right] \quad (9)$$

$$\nabla^2 L(z) = \left[\frac{\partial^2 L(z)}{\partial z_i \partial z_j} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L(z)}{\partial x_i \partial x_j} & \frac{\partial^2 L(z)}{\partial x_i \partial \mu_j} & \frac{\partial^2 L(z)}{\partial x_i \partial \lambda_j} \\ \frac{\partial^2 L(z)}{\partial \mu_i \partial x_j} & 0 & 0 \\ \frac{\partial^2 L(z)}{\partial \lambda_i \partial x_j} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

(10) ifadesinden de görüldüğü gibi Hessian matrisi elemanlarının çoğu sıfırlardan oluşan (sparse) bir matristir. Genel olarak, Newton yönteminde Hessian matrisi simetrik bir matristir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir

$$[H] = \begin{bmatrix} W & J^T \\ J & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Optimizasyon teorisine göre, Kuhn-Tucker'ın optimallik şartları aşağıdaki koşullar altında gerçekleşir.

$$\begin{aligned} \nabla_x L(z^*) &= \nabla_x L([x^* \ \mu^* \ \lambda^*]) = 0; \\ \nabla_\lambda L(z^*) &= \nabla_\lambda L([x^* \ \mu^* \ \lambda^*]) = 0; \\ \nabla_\mu L(z^*) &= \nabla_\mu L([x^* \ \mu^* \ \lambda^*]) = 0; \end{aligned} \quad (12)$$

$\lambda_i^* \geq 0$ (Eşitsizlik kısıtlamaları varsa)
 $\lambda_i^* = 0$ (Eşitsizlik kısıtlamaları yoksa),
 $z^* = [x^* \ \mu^* \ \lambda^*]$ optimal çözümün sağlandığı noktadır.

Böylece, $\nabla_z L(z^*)$ eşitliğinin çözümü optimal çözümü verir. Bir üretim biriminin ikinci dereceden maliyet fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$C_{P_i} = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (13)$$

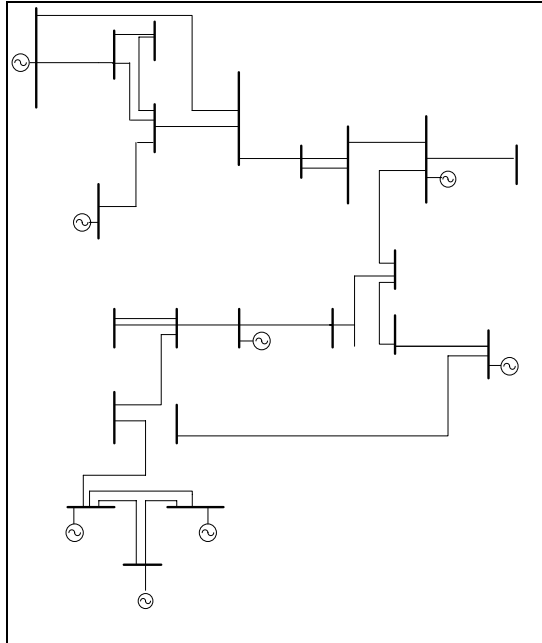
Sistemin toplam maliyet fonksiyonu şöyle yazılabilir:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad (14)$$

$f(x)$ fonksiyonu sistemin toplam maliyetini minimum yapmak için kullanılır. Eşitlik kısıtlamaları; baralara giren güçle çıkan gücün dengede olduğunu gösterir kısıtlamalardır (Muritthi M.G., 1996). Eşitsizlik kısıtlamalarından bazıları, üretim birimlerinin minimum-maksimum güç kısıtları, bara gerilimi gibi kısıtlardır.

4. SİSTEM VE PARAMETRELERİ

Sistem modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Sistem 22 baradan meydana gelmektedir. Bu baralardan 8 tanesi üretim barası ve 14 tanesinde yük barasıdır. Sistemin tepe yük değeri 4000 MW olarak alınmıştır. Bu sistem için kullanılan baraların kodları ve isimleri Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Türkiye'deki 380 kV'luk 22 baralı sistem

Tablo 1. 22 Baralı Sistemin Bara Kodları ve İsimleri.

Bara Kodu	Bara İsmi	Bara Kodu	Bara İsmi	Bara Kodu	Bara İsmi
1	Hamitabat	9	Bursa San	17	BursaGaz
2	Unimar	10	T. Şalt	18	S.ömer
3	Habibler	11	BalıkesirII	19	SomaB
4	İkitelli	12	AliğaII	20	Y.köy
5	Alibeyköy	13	İzmir D	21	K.köy
6	Karabiga	14	Uzundere	22	Yatağan
7	Ümraniye	15	Işıklar	-	-
8	T.Ören	16	Ambarlı	-	-

Oluşturulan sistemde 8 tane termik santral bulunduğundan EÜAŞ'tan alınan az sayıda artan yakıt maliyet değerleri kullanılarak MS Excel programında eğri uydurma yöntemiyle uygun

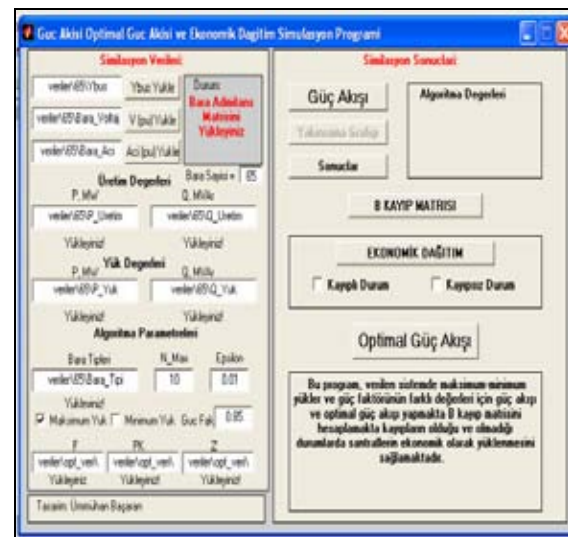
maliyet eğrileri oluşturulmuştur (Santraller Enformasyon ve Değerlendirme Müdürlüğü, 2002 ve Eren ve Aktaş, 2004). Sistemde bulunan üretim birimleri, bu birimlerin maliyet eğrileri ve alınan minimum-maksimum güç değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Üretim Birimlerinin Maliyet Fonksiyonu ve Limit Değerleri.

Santraller	Maliyet Fonksiyonu (\$/h)	Santrallerin Limit Değerleri (MW)
Hamitabat	$0.0168P_1^2 + 7.0663P_1 + 6595.5$	$190 \leq P_1 \leq 1120$
Bursa DG	$0.0106P_3^2 + 5.682P_3 + 6780.5$	$318 \leq P_3 \leq 1432$
Ambarlı	$0.0127P_2^2 + 7.2592P_2 + 7290.6$	$245 \leq P_2 \leq 1350$
Seyitömer	$0.0139P_4^2 + 3.1288P_4 + 1564.4$	$150 \leq P_4 \leq 600$
SomaB	$0.0168P_5^2 + 6.2232P_5 + 5134.1$	$210 \leq P_5 \leq 990$
Yeniköy	$0.021P_6^2 + 3.3128P_6 + 1159.5$	$110 \leq P_6 \leq 420$
Kemerköy	$0.0137P_7^2 + 3.2324P_7 + 1697$	$140 \leq P_7 \leq 630$
Yatağan	$0.0147P_8^2 + 3.472P_8 + 1822.8$	$140 \leq P_8 \leq 630$

5. SİMÜLASYON VE KARŞILAŞTIRMA

Program için Şekil 2'de gösterildiği gibi MATLAB®'da bir arayüz tasarlanmıştır ve öncelikle sistem girdileri programa yüklenmiştir. Gücün baz değeri, 100 MVA olarak alınmıştır. Arayüz simülasyon verileri ve simülasyon sonuçları olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Sistemin verileri; bara admitans matrisi, bara gerilimlerinin genlikleri-açılı, aktif, reaktif güç üretim değerleri, her bir baranın çektiği aktif ve reaktif yükler, bara tipleri, üretim birimlerinin maliyet eğrileri ve sınır güçleri, başlangıç z değerleri ve en yüksek öteleme sayısıdır. Simülasyon verileri daha önceden oluşturulan veriler klasörüne kaydedilmektedir.



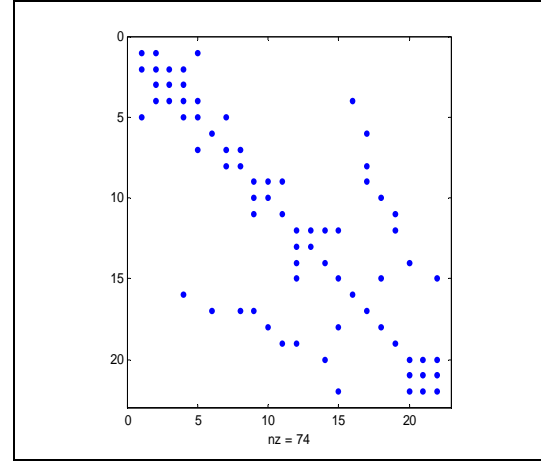
Şekil 2. Güç akışı, optimal güç akışı, ekonomik dağıtım programlarının arayüzü.

Simülasyon sonuçları kısmında, güç akışı çalıştırılarak, algoritma değerlerinde programın her öteleme sonucunda yakınsama değerleri gösterilmektedir. Yakınsama grafiğine basıldığında, güç akışı programları için yakınsama grafikleri çizilmektedir. Programın sonuçları matlab ekranında gösterilmektedir. Program farklı güç faktörü değerleri ve minimum-maksimum yük durumunda güç akışı yapabilmektedir. Aynı zamanda, sistemde kayıpların olduğu ve olmadığı durumlarda santrallerin ekonomik olarak yüklenmesini sağlayarak sistemin minimum üretim maliyetini hesaplayabilmektedir.

5. 1. Kayıplı Durumda Ekonomik Dağıtım

Direnç (R), endüktif reaktans (X) ve kapasitif reaktans (B)/2 değerleri kullanılarak, 22 baralı sisteme ait bara admitans matrisi oluşturulmuştur. Bu matris 22x22 boyutundadır. Şekil 3'te bara admitans matrisinin sıfırdan farklı elemanlarının

bulunduğu noktalar gösterilmiştir. Sisteme ait özellikler Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Bara admitans matrisinin sıfırdan farklı elemanlarının noktaları.

Tablo 3. 22 Baralı Sistemin Özellikleri.

Bara Kodu	Bara Tipi	Bara Ger. (pu)	B.Açı	Yük		Üretim	
				P _{yük} (MW)	Q _{yük} (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
1	Salınım B.	1.015	0	0	0	0	0
2	Yük B.	1	0	0	0	0	0
3	Yük B.	1	0	236	146.25	0	0
4	Yük B.	1	0	433	268.34	0	0
5	Yük B.	1	0	236	146.259	0	0
6	Yük B.	1	0	0	0	0	0
7	Yük B.	1	0	172.8	107.2	0	0
8	Yük B.	1	0	264.63	163.6	0	0
9	Yük B.	1	0	304	188.4	0	0
10	Yük B.	1	0	141	87.38	0	0
11	Yük B.	1	0	205	127.04	0	0
12	Yük B.	1	0	277.2	171.66	0	0
13	Yük B.	1	0	248.7	153.69	0	0
14	Yük B.	1	0	292	180.96	0	0
15	Yük B.	1	0	229	141.92	0	0
16	Ger.K. B.	1.015	0	0	0	680	0
17	Ger. K. B.	1.0172	0	0	0	601	0
18	Ger. K. B.	1.0111	0	204	126.4	430	0
19	Ger. K. B.	1.017	0	178.1	110.3	530	0
20	Ger. K. B.	1.012	0	215.9	133	390	0
21	Ger. K. B.	1.012	0	18	11.15	520	0
22	Ger. K. B.	1.0251	0	344.7	213.2	490	0

ΔP ve ΔQ değerleri için programın yakınsama grafiği Şekil 4'de ve program sonuçları Tablo 4'de gösterilmiştir.

Programın sonucunda, üretilen toplam aktif güç 4127.27003 MW ve toplam yük miktarı, 4000.030 MW olarak hesaplanmıştır. Bu durumda sistemdeki toplam kayıp miktarı 127.240035 MW'dır.

Bu kısımda öncelikle, güç akışı analizi sonuçları kullanılarak ve Tablo 3 ve Tablo 4 deki veriler

yardımıyla sistemin B kayıp katsayıları hesaplanmış ve MATLAB® da yazılan program kullanılarak santraller ekonomik olarak yüklenmiştir. Ekonomik Dağıtım Analizinin akış diyagramı Şekil 5'de verilmiştir.

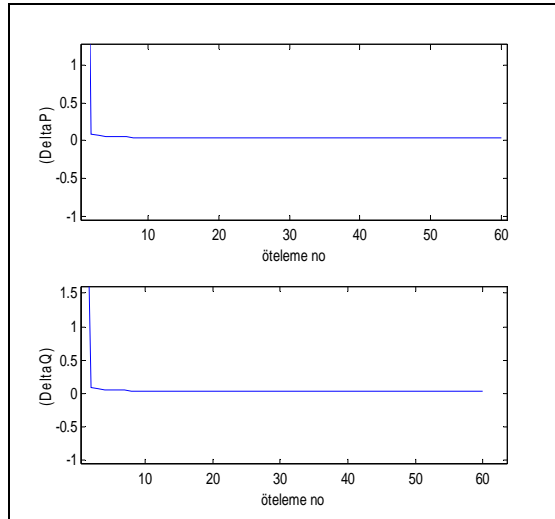
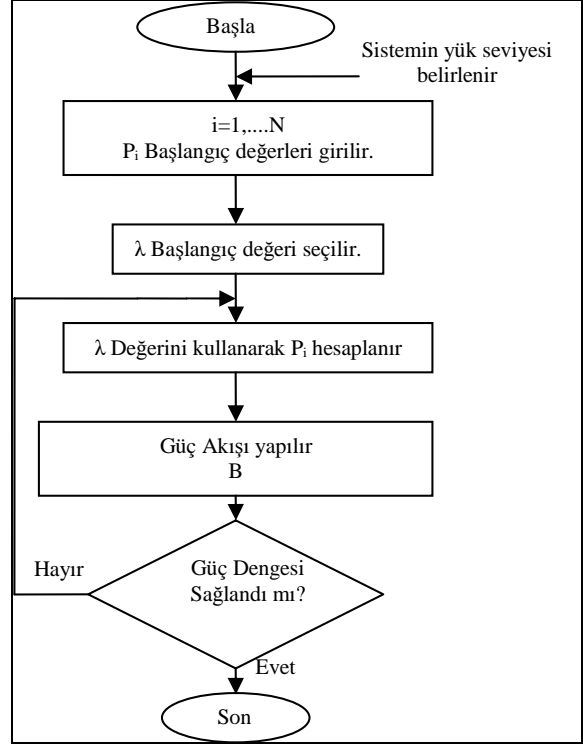
Şekil 6'da ötelemeler sonucu sistemin artan yakıt maliyeti değerinin değişimi gösterilmiştir.

Yapılan bu analizde, sistemin 7. öteleme sonucunda dengeye ulaştığı ($\epsilon=10^{-6}$) görülmüştür. Bu denge

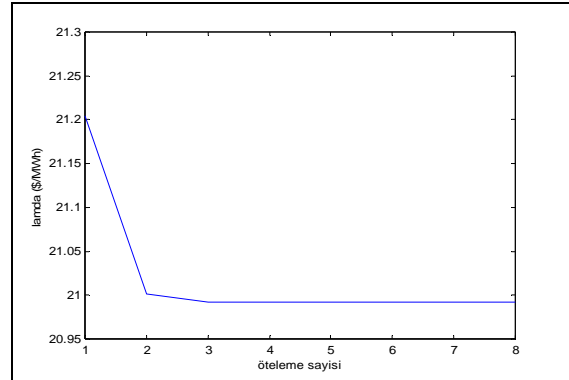
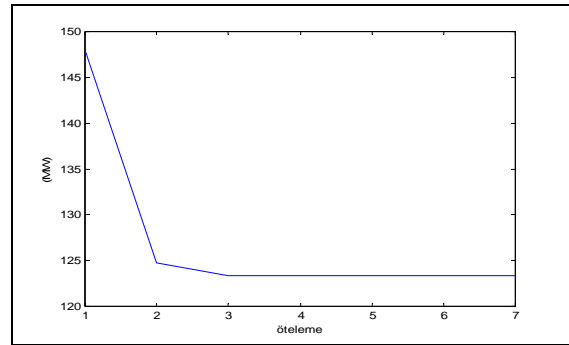
anında sistemin artan yakıt maliyeti değeri, 21.0444 \$/MWh olarak bulunmuştur. Şekil 7'de ötelemeler sonucu sistemin kayıp miktarının değişimi gösterilmiştir.

Tablo 4. 22 Baralı Sistemin Güç Akışı Sonuçları

Bara Kodu	Bara Gerilimi (pu)	Bara Açısı (pu)	P Üretim (MW)	Q Üretim (MVar)
1	1.01500	0.00000	466.2700	64.2453
2	1.00285	-1.8792	0.00000	0.00000
3	0.99061	-2.8574	0.00000	0.00000
4	0.99354	-2.5062	0.00000	0.00000
5	0.98713	-2.9217	0.00000	0.00000
6	1.03467	2.87973	0.00000	0.00000
7	0.97638	-3.4697	0.00000	0.00000
8	0.97473	-3.3879	0.00000	0.00000
9	1.00978	2.39910	0.00000	0.00000
10	1.00626	2.93105	0.00000	0.00000
11	1.00460	1.85364	0.00000	0.00000
12	0.97667	1.38559	0.00000	0.00000
13	0.97646	1.36569	0.00000	0.00000
14	0.97215	2.28022	0.00000	0.00000
15	0.98854	2.63408	0.00000	0.00000
16	1.01500	-0.7424	680.0000	366.131
17	1.01720	2.96440	601.0000	120.823
18	1.01117	3.89522	430.0000	110.656
19	1.01700	3.12377	530.0000	350.420
20	1.01200	9.20447	390.0000	77.7127
21	1.01200	9.73322	520.0000	-181.48
22	1.02510	8.65977	490.0000	408.333

Şekil 4. ΔP ve ΔQ değerlerinin yakınsama grafiği.

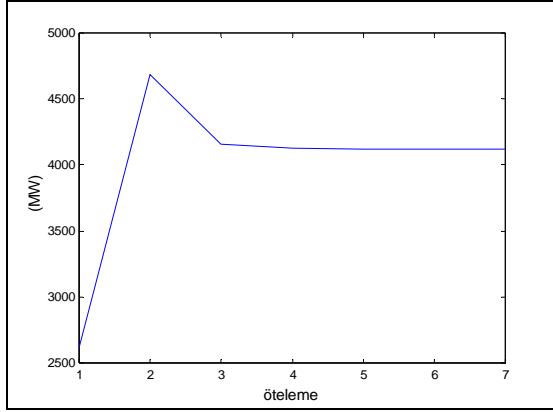
Şekil 5. Ekonomik dağıtım analizinin akış diyagramı.

Şekil 6. Sistemin λ değerinin öteleme sayısına göre değişimi.

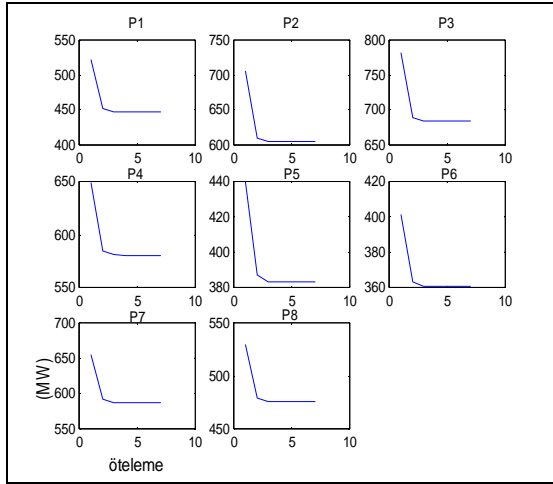
Şekil 7. Sistemdeki kayıp miktarının öteleme sayısına göre değişimi.

Burada, sistemde ilk durumda 147.99 MW olan kayıp miktarının ötelemelerle birlikte azaldığı ve denge durumunda 123.3359 MW değerine indiği görülmüştür.

Kayıpların azalmasına bağlı olarak ötelemeler sonucu sistemdeki toplam üretilen gücün değiştiği görülmüştür. Buna bağlı olarak da her ötelemelerde santrallerin de çıkış güçleri değişmiştir. Şekil 8'de toplam üretilen gücün değişimi ve Şekil 9'da santrallerin çıkış güçlerinin ötelemeler sonucu değişimi grafiklerle gösterilmiştir.



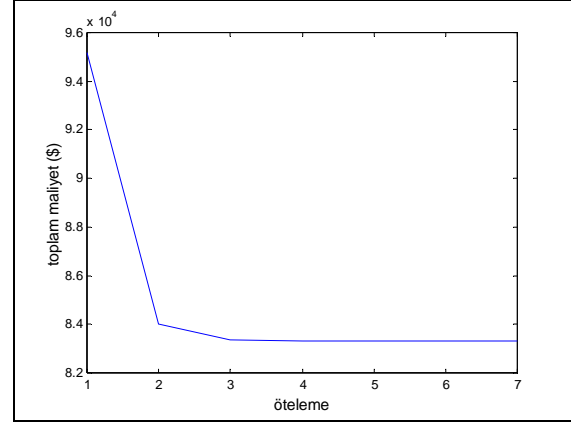
Şekil 8. Sistemdeki toplam güç miktarının öteleme sayısına göre değişimi.



Şekil 9. Sistemdeki her bir santralin çıkış gücünün öteleme sayısına göre değişimi.

Şekil 9'da santrallerin ilk durumda yüklendikleri güç değerlerinin, ötelemelere bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni sistemde kayıp miktarının ötelemeler sonucu, azalmasına bağlı olarak toplam üretilen gücün düşmesi ve santrallerin çıkış güçlerinin dengeye gelebilmek için azalmasıdır. Ötelemeler sonucu santrallerin toplam üretim maliyetlerinin değişimi Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu şekilde ilk durumda 95188 \$ olan

üretim maliyetinin denge durumunda 83324 \$ olduğu görülmüştür. İlk duruma göre sistemin maliyeti 11864 \$ azalmıştır.



Şekil 10. Sistemin toplam maliyetinin öteleme sayısına göre değişimi

Santrallerin yüklendikleri güçler ve ceza faktörü değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Hamitabat ve Ambarlı termik santrallerinde ceza faktörü 1'in üstünde diğer birimlerde 1'in altındadır. Ceza faktörünün 1 değerinden büyük olması üretilen güce karşılık, kayıp miktarının arttığını göstermektedir.

Sonuçta maliyeti düşük olan santraller Seyitömer, Yeniköy, Kemerköy ve Yatağan 4000 MW olan bu yükten daha fazla pay almışlar ve böylece sistemin maliyeti azaltmışlardır.

Tablo 5. Santrallerin Yüklendikleri Güçler ve Ceza (Penaltı) Faktörü Değerleri.

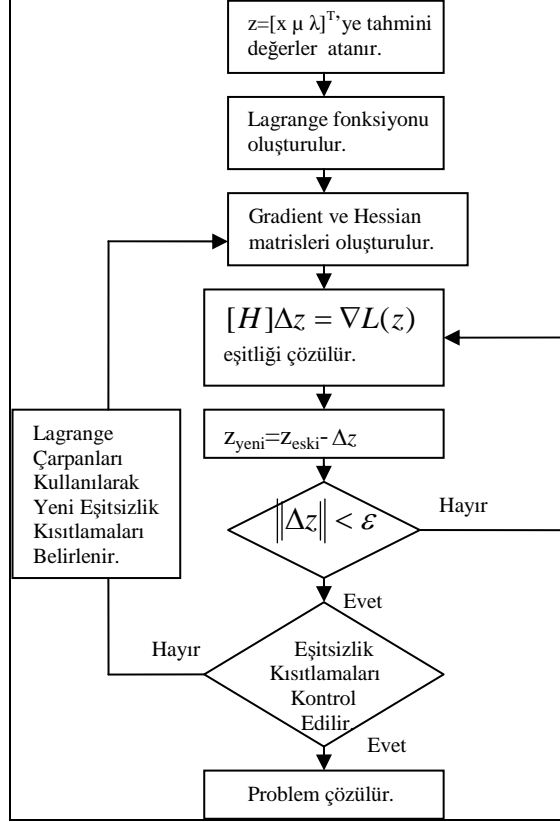
Bara Kodu	Üretilen Güç (MW)	Ceza Faktörü	Bara Kodu	Üretilen Güç (MW)	Ceza Faktörü
1	447.2240	1.0767	19	383.4078	0.9361
16	604.4796	1.0825	20	360.7573	0.9150
17	683.6929	0.9704	21	587.4598	0.9191
18	580.5828	0.9347	22	475.7339	0.9097

5. 2. Optimal Güç Akışı

Sisteme ait maliyet fonksiyonları, üretim baralarının kısıtlamaları ve tüm baralara ait bara gerilimlerinin kısıtlamaları kullanılarak, sistemin toplam üretim maliyetini minimuma indirilmek amacıyla optimal güç akışı yapılmıştır. Bunun için, hızlı yakınsadığından dolayı Newton tabanlı optimal güç akışı yöntemi kullanılmıştır. Newton yönteminin algoritması Şekil 11'de verilmiştir.

İlk olarak, amaç fonksiyonu eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları kullanılarak, sistemin Lagrange denklemi oluşturulmuştur. Sisteme ait maliyet eğrilerinin denklemleri ve üretim birimlerinin kısıtlamaları Tablo 7'de verilmiştir. Diğer bir

eşitsizlik kısıtlaması olarak bara gerilimlerinin limit değerleri $0.95 \leq V_k \leq 1.05$ eşitsizliğine uygun olarak alınmıştır. Bu durumda, sistemin Lagrange fonksiyonu şöyle ifade edilir:



Şekil 11. Newton yöntemi akış diyagramı

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \sum_{i=1}^{N_g} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) + \mu_{pk} (P_k) + \mu_{Qk} (Q_k) + \\ & \lambda_{P_{gih}} (P_{gi} - P_{gimaks}) + \lambda_{P_{gil}} (P_{gi\min} - P_{gi}) + \\ & \lambda_{V_{kh}} (V_k - V_{kmaks}) + \lambda_{V_{kl}} (V_{k\min} - V_k) \end{aligned} \quad (15)$$

Sistemde 8 tane üretim birimi olduğundan dolayı, önce bu birimler için maliyet fonksiyonları oluşturulmuştur. 22 bara için eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları, $(\mu_{pk}(P_k), \mu_{Qk}(Q_k), \lambda_{V_{kh}}(V_k - V_{kmaks}), \lambda_{V_{kl}}(V_{k\min} - V_k))$ ve üretim birimlerinin sınır değerleri olan eşitsizlikler $\lambda_{P_{gih}}(P_{gi} - P_{gimaks}), \lambda_{P_{gil}}(P_{gi\min} - P_{gi})$ yazılmıştır. Daha sonra sistemin Hessian ve Gradient matrisleri oluşturulmuştur. Gradient vektörü oluşturulurken, Lagrange fonksiyonunun birinci dereceden türevleri alınmıştır. Her bir blok için hesaplanan türev değerlerinden bazıları şunlardır:

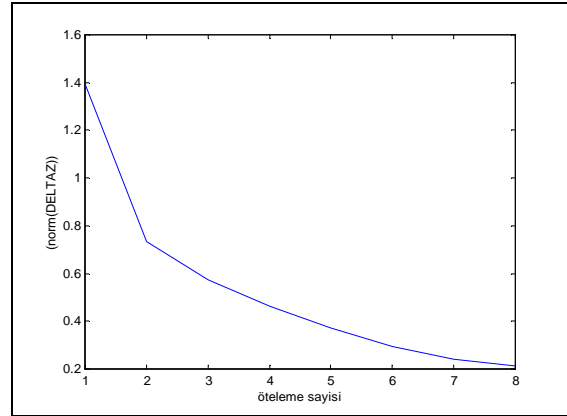
$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{gi}}, \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial V_k}, \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \delta_k}, \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mu_{pk}}, \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mu_{Qk}}, \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_{P_{gil}}} \quad (16)$$

Hessian matrisi oluşturulurken Lagrange fonksiyonunun ikinci dereceden türevleri alınmıştır. Her bir blok için hesaplanan türev değerlerinden bazıları şunlardır:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial P_{gi}^2}, \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial V_i \partial V_j}, \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial V_i \partial \delta_j}, \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial V_j \partial \delta_i}, \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial V_j \partial V_i}, \\ & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \delta_i \partial \mu_{pk}}, \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \delta_i \partial \mu_{Qk}}, \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial P_{Gk} \partial \mu_{pk}}, \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial P_{gi} \partial \lambda_{P_{gil}}}, \end{aligned} \quad (17)$$

Hessian matrisi, bu problem için 22x22 blokdan oluşmaktadır. Bu blokların her biri 9x9 büyüklüğündedir. Bu durumda, Hessian matrisinin boyutu 198x198, Gradient vektörü ve Δz değerleri de 198x1 boyutundadır. Burada, sistem için kullanılan eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarının sayısına bağlı olarak her bir alt matrisin boyutu 9x9 olmaktadır.

Sisteme verilen ilk değerler kullanılarak yeni Z değerleri oluşturulmuştur. İstenen sınırlar bulununcaya kadar her ötelemelerde Hessian ve Gradient matrisler tekrar hesaplanmıştır. Sonuç olarak, kısıtlamalar altında sistemin maliyetinin minimum olmasını sağlayacak üretim değerleri, bara gerilimlerinin genlikleri ve açıları bulunmuştur. Bulunan bu değerler kullanılarak, reaktif güç üretim değerleri hesaplanmıştır. Şekil 12'de $\|\Delta z\|$ değerinin ötelemeler sonucu değişimi gösterilmiştir.



Şekil 12. $\|\Delta z\|$ Değerinin Ötelemeler Sonucu Değişim Grafiği

Yazılan programın çalıştırılması sonucunda üretim baralarının çıkış güçleri, bara gerilimlerinin genlikleri ve açıları ve reaktif güçleri hesaplandı. Tablo 6'da bulunan bara gerilim değerleri gösterilmiştir. Burada, OGA sonucunda bara gerilimlerinin genlikleri verilen kısıtlar arasında bulunmuştur.

Tablo 6. OGA Sonucu Bara Gerilim Genlikleri ve Sınır Değerleri.

Bara Kod	V_{min} (pu)	V (pu)	V_{maks} (p.u)	Bara Kod	V_{min} (pu)	V (pu)	V_{mak} (p.u)
1	0.95	1.0318	1.05	12	0.95	1.0362	1.05
2	0.95	1.0302	1.05	13	0.95	1.0372	1.05
3	0.95	0.9957	1.05	14	0.95	0.9523	1.05
4	0.95	0.9884	1.05	15	0.95	0.9737	1.05
5	0.95	0.9226	1.05	16	0.95	1.0293	1.05
6	0.95	0.9900	1.05	17	0.95	1.0301	1.05
7	0.95	0.9901	1.05	18	0.95	1.0338	1.05
8	0.95	0.9828	1.05	19	0.95	1.0397	1.05
9	0.95	0.9898	1.05	20	0.95	1.0220	1.05
10	0.95	0.9898	1.05	21	0.95	1.0308	1.05
11	0.95	0.9856	1.05	22	0.95	1.0152	1.05

Tablo 7'de baraların çıkış güçleri ve sınır değerleri gösterilmiştir. Bu tabloda görüldüğü gibi, OGA sisteme uygulanması sonucunda, üretim baralarının çıkış güçleri verilen kısıtlar arasında bulunmuştur.

Tablo 7. OGA Sonucu Üretim Baralarının Çıkış Güçleri ve Sınır Değerleri.

Bara Kodu	P_{gmin} (MW)	P_g (MW)	P_{gmaks} (MW)
1	190	456.6099	1120
16	245	569.1207	1350
17	318	584.3354	1432
18	150	573.3901	600
19	210	378.5413	990
20	110	417.2529	420
21	140	564.9352	630
22	140	574.1627	630

Tablo 8'de OGA, sonucunda bulunan bara gerilimlerinin genlikleri ve açıları, aktif ve reaktif güç değerleri gösterilmiştir.

Tablo 8. 22 Baralı Sistemin Optimal Güç Akışı Sonuçları

Bara Kodu	Bara Ger. (pu)	Bara Aç (deg)	P Üretim (MW)	Q Üretim (MVar)
1	1.0318	0.1735	456.6099	-13.5773
2	1.0302	-11.5521	0.000	0
3	0.9957	-0.3026	0.000	0
4	0.9884	0.1454	0.000	0
5	0.9226	0.2449	0.000	0
6	0.9900	-0.0189	0.000	0
7	0.9901	0.5987	0.000	0
8	0.9828	0.8508	0.000	0
9	0.9898	-0.0155	0.000	0
10	0.9898	-0.0168	0.000	0
11	0.9856	-0.0883	0.000	0
12	1.0362	-0.1117	0.000	0
13	1.0372	-0.1150	0.000	0
14	0.9523	2.6102	0.000	0
15	0.9737	1.3954	0.000	0
16	1.0293	-14.424	569.1207	238.6361
17	1.0301	-20.116	584.3354	316.7794
18	1.0338	-14.371	573.3901	128.1644
19	1.0397	-7.5849	378.5413	47.6939
20	1.0220	-7.8718	417.2529	-2.4031
21	1.0308	-8.5453	564.9352	5.2944
22	1.0152	-8.7161	574.1627	12.5533

Bulunan üretim değerleri sonucunda, sistemde toplam 4000 MW yük olduğunda, santraller toplam çıkış güçleri 4118.3 MW'dır. Bu durumda sistemdeki kayıp miktarı 118.3 MW olur. Sistemin toplam üretim maliyeti, OGA sonucu bulunan, üretim birimlerinin çıkış güçleri kullanılarak, 83258\$ olarak hesaplanmıştır.

Ekonomik dağıtım ve optimal güç akışı analizlerinin maliyet değerleri çekilen yük miktarının aynı olduğu durum için karşılaştırıldığında, optimal güç akışı analizi sonucunda sistemin maliyeti 66 \$/h azaldığı sonuçlardan görülmüştür.

6. SONUÇLAR

Ekonomik dağıtımın analizi uygulamasında her ötelemede artan yakıt maliyeti, kayıp miktarı, sistemdeki toplam güç, her santralin çıkış gücü ve sistemin toplam maliyetinin değişimi grafiklerle gösterilmiştir.

Optimal güç akışı analizinde üretim birimlerinin maliyet fonksiyonları ve üretim kısıtlamaları, tüm baralara ait bara gerilim genlikleri kısıtlamaları kullanılarak, sistemin toplam üretim maliyetini minimuma indirilmiştir. Sisteme ait maliyet eğrilerinin denklemleri ve üretim birimlerinin kısıtlamaları ve bara gerilimlerinin genliklerinin limit değerleri kullanılarak sistemde optimal güç akışı analizi yapılmıştır.

Ekonomik dağıtım ve optimal güç akışı analizleri sonucunda, maliyeti düşük olan santraller Seyitömer, Yeniköy, Kemerköy ve Yatağan yükten daha fazla pay almışlar ve böylece sistemin maliyeti azaltmışlardır. Ekonomik dağıtım analizi sonucunda sistemin toplam maliyeti 83324 \$, optimal güç akışı analizi sonucunda ise 83258\$ olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu analizlerin sonuçları karşılaştırıldığında, optimal güç akışı analizinden bulunan toplam

maliyet değerinin ekonomik dağıtım analizine göre 66 \$/h azaldığı görülmüştür.

7. KAYNAKLAR

Alsac, O., Bright, J., Prais, M. and Stoot, B. 1990. "Further Developments in LP-Based Optimal Power Flow," IEEE Transactions on Power Systems, 5.

Burchett, R.C., Happ, H.H., Viearath, D.R. and Wirgau, K.A. 1982. "Devopments in Optimal Power Flow ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 101.

Dommel, H. W. and Tinney, W. F. 1968. "Optimal Power Flow Solutions," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 87.

Eren, Z. ve Aktaş, K. .2004. 2003 Puant (Yaz) yük şartlarında yük akışı, üç faz ve faz toprak kısa devre etüdü, TEİAŞ Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı, Etüd ve Raporlama Müdürlüğü, Ankara.

Grainger, J. J., and Stevenson, W. D. 1994. *Power system analysis*, McGraw-Hill International Editions, Newyork, USA.

Happ, H.H. 1977. "Optimal Power Dispatch- A Comprehensive Survey", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 96.

Lukman, D. and Blackburn, T.R. 2001. "Modified algorithm of load flow simulation for loss minimization in power systems", Australian

Universities Power Engineering Conference, AUPEC2001, Curtin University, 1.

Murithi, M.,G. 1996. "Optimal Power Flow For The High Voltage Network Of The Kenya Power System ", IEEE

Rashed, A.M.H. and Kelly, D.H. 1974. "Optimal Load Flow Solution Using Lagrangian Multipliers And The Hessian Matrix", IEEE

Santraller Enformasyon ve Değerlendirme Müdürlüğü, 2002 Yıllık Faaliyet Raporu. 2002. Termik Santraller ve Maden Sahaları Daire Başkanlığı, Ankara.

Sullivan, R.L. 1985. *Power system planning*, McGraw-Hill International Book Company, USA

Sun, D. I., Ashkey, B., Brewer, B., Hughes, A., and Tinney, W. F. 1984. "Optimal Power Flow by Newton Approach," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 103.

Wood, J. and Wollenberg, B. 1996. *Power generation, operation and control*, Wiley interscience publication, Newyork, USA.

Wu, Y., Debs, A. S., and Marsten, R. E. 1993. "Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows," IEEE Power Industry Computer Applications Conference.

Zhiqiang, Y., Zhijian, H. and Chuanwen, J. 2002. "Economic Dispatch and Optimal Power Flow Based on Chaotic Optimization". Powercon, 4.