Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.
Cilt 24, No 3, 425-434, 2009

J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.
Vol 24, No 3, 425-434, 2009

BİRİM YÜKLENME PROBLEMİNİN ÜÇ FARKLI YÖNTEM KULLANILARAK KARŞILAŞTIRMALI ÇÖZÜMLENMESİ

Mehmet KURBAN ve Ümmühan BAŞARAN FİLİK
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir
mkurban@anadolu.edu.tr, ubasaran@anadolu.edu.tr

(Geliş/Received: 07.05.2008 ; Kabul/Accepted: 21.04.2009)

ÖZET

Bu çalışmada, güç sistemi optimizasyonunda önemli bir konu olan birim yüklenme problemi, dinamik programlama, gevşetilmiş Lagrange ve benzetimli tavlama yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Dinamik programlama yöntemi, minimum maliyeti sağlayan bir zamanlamayı araştırmadan önce tüm kısıtlamaları dikkate alan işlem adımlarında üretilmiş karara bağlı olası birim yüklenme zamanlamalarını değerlendirir. Gevşetilmiş Lagrange yöntemi, matematiksel optimizasyon temelinde çözüm sunan bir yöntemdir. Benzetimli tavlama yöntemi ise, katı bir maddenin yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtılması ve sonra yavaş yavaş soğutularak ortam sıcaklığına adım adım düşürülmesi esasına dayanan ve optimizasyon problemleri için iyi çözümler veren bir yöntemdir. MATLAB® kullanılarak yapılan simülasyonlarda üç farklı çözüm yöntemi için birimlerin çalışma durumları ve toplam maliyet değerleri bulunmuştur. Sonuçlar tablolar halinde verilmiş ve kullanılan yöntemler karşılaştırılmıştır. Birim yüklenme problemi için Türkiye'de Kütahya bölgesinde bulunan dört birimli Tunçbilek termik santrali ele alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan veriler, TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) ve EÜAŞ (Elektrik Üretim Anonim Şirketi) 'tan alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç sistemi optimizasyonu, birim yüklenme, dinamik programlama, gevşetilmiş Lagrange, benzetimli tavlama.

COMPARATIVE SOLUTION OF UNIT COMMITMENT PROBLEM USING THREE DIFFERENT METHODS

ABSTRACT

In this paper, unit commitment problem which is an important subject in power system optimization, is solved by using dynamic programming, Lagrange relaxation, and simulated annealing methods. Dynamic programming method evaluates possible unit commitment schedules associated with decision made in the proceeding step by considering all constraints before searching for a schedule that yields the minimum cost. Lagrangian relaxation method, which is based on mathematical optimization, presents a solution for unit commitment problem. Simulated annealing is a method which refers to the process of heating up a solid to a high temperature followed by slow cooling achieved by decreasing the temperature of the environment in steps and gives feasible solutions for optimization problems. In the simulations made by using MATLAB®, the operation conditions and total costs of the units are found by using three different solving methods. The solutions are given in the tables and methods used are compared. Four-unit in Tuncbilek thermal plant which is in Kutahya region, Turkey, are used as an example for the unit commitment problem. The data used in this paper is taken from (TEPC) Turkish Electric Power Company and (EGC) Electricity Generation Company.

Keywords: Power system optimization, unit commitment, dynamic programming, Lagrange relaxation, simulated annealing.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Birim yüklenme problemi üretim birimlerinin arasında hangi birimin serviste ne kadar süre ve periyotta kalacağını belirlemek amacıyla uygulanan bir yöntemdir. Güç sistemleri analizlerinde önemli yere sahip olan bu problemin amacı, minimum maliyetle talep edilen gücün belirlenen kısıtlar altında karşılanmasıdır [1-2].

Birim yüklenme problemini çözmek için matematiksel programlama ve sezgisel yaklaşımlara dayalı çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Birim yüklenme problemi, amaç fonksiyonu ve kısıtları konveks olmayan, kombinasyonel ve çözümü oldukça zor olan bir problemdir. Literatürde, problemin çözümü ile ilgili yapılan başlıca çalışmalar şunlardır: Dinamik programlama [3-4], sezgisel yöntem [5], benzetimli tavlama yöntemi [6-8], evrimsel algoritma [9], genetik algoritma [10-11], kısıtlandırılmış lojik programlama [12] ve gevşetilmiş Lagrange yöntemi'dir [13-15].

Dinamik programlama, güç sistemleri problemleri için önemli çözüm yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, bir dizi karar verme işlemini optimize eden bir matematiksel işlem bütünüdür. Temel olarak bu yöntem, problemin veya problemin bir kısmının parçalara bölünmesi, bu parçaların çözülmesi ve bu çözümlerin depolanması şeklinde bir çözüm yaklaşımı getirmektedir. Gevşetilmiş Lagrange yöntemi, çok değişkenli bir fonksiyonun minimalleştiricilerini veya maksimalleştiricilerini bulmak amacıyla uygulanır.

Benzetimli tavlama yöntemi, akıllı-sezgisel yöntemlerden biridir. Güç sistemlerinde karmaşık problemleri çözmek için doğrusal, doğrusal olmayan, dinamik, tamsayı ve karmaşık tamsayı programlama teknikleri, kombinasyonel yöntemlerin parçası olarak uygulanmaktadır.

Sezgisel yaklaşımlardan olan benzetimli tavlama yöntemi, kombinasyonel optimizasyon problemlerinin çözümünde iyi sonuçlar verebilmektedir. Bu yöntem, asimtotik olarak global optimum çözüme yakınsar.

Bu çalışmada birim yükleme problemi, dinamik programlama, gevşetilmiş Lagrange ve benzetimli tavlama yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Bu yöntemlerin sonuçları karşılaştırmalı olarak tablolarda verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre benzetimli tavlama yöntemini kullanılarak bulunan toplam maliyet değerinin diğer yöntemlere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Zaman açısından bir kıyaslama yapıldığında ise gevşetilmiş Lagrange yöntemi, diğer yöntemlere göre problemin çözümüne daha kısa zamanda ulaşabilmektedir. Yapılan bu çalışmalarda, Türkiye'de Kütahya bölgesinde bulunan dört birimden oluşan Tunçbilek termik santraline ait veriler kullanılmıştır.

2. BİRİM YÜKLENME PROBLEMİ (UNIT COMMITMENT PROBLEM)

Birim yüklenme problemi, güç sistemlerinin optimizasyonunda önemli problemlerden biridir. Problem, amaç fonksiyonu, sistem ve birim kısıtlarından oluşmaktadır. Bu problem genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [16]:

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\left[F_i(P_i^t)+BM_{i,t}\right]U_i^t \qquad (1)$$

Sistem kısıtları: Bu kısıtlar yük dengesi ve dönme rezervi kısıtlarını göstermektedir.
Yük Dengesi Kısıtı: Sistemde tahmin edilen yük değeri, birimlerin çıkış güçlerinin toplamına eşit olmalıdır:

$$\sum_{i=1}^{N}u_i(t)P_i(t)=P_{yük}(t) \qquad (2)$$

Dönme Rezervi Kısıtı: Sistemin güvenilirliği için yeterli dönme rezervi olması gerekmektedir. Sistemlerde genellikle dönme rezervi değeri, $P_{yük}(t)$ değerinin %10'u olarak alınmaktadır.

$$P_{yük}(t)+P_r(t)-\sum_{i=1}^{N}P_{i,maks}U_i^{\,t}\le 0 \qquad (3)$$

Birim Kısıtları: Her bir birim üretim limit değerlerini sağlamalıdır.

$$U_i^{\,t}P_i^{\min}\le P_i^t\le U_i^{\,t}P_i^{maks}, i=1,2,..,N,\ t=1,2,..,T \qquad (4)$$

Probleminin çözümü için, amaç fonksiyonunun belirlenen kısıtlar altında minimum değeri bulunmaya çalışılır. Problem incelendiğinde amaç fonksiyonu, birimlerin devrede olup olmama durumuna göre 1 veya 0 değerlerini almaktadır. Böylece, $U_i(t)$ değişkeninin 1 veya 0 değerini almasına bağlı olarak problem süreksiz ve amaç fonksiyonunun konveks olmayan bir yapıya dönüşebilmektedir. $U_i(t)$ değişkeninin 0 olduğu durumda problem süreksiz bir fonksiyon olmaktadır. Benzer şekilde, kısıt fonksiyonlarına bakıldığında ((2) (3), (4) numaralı denklemler), denklemlerde $U_i(t)$ ifadesinin bulunması problemin kısıtlarının da konveks olmadığı görülmektedir.

3. BİRİM YÜKLENME PROBLEMİ İÇİN ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ (SOLVING METHODS FOR UNIT COMMITMENT PROBLEM)

3.1 Birim Yüklenme Probleminin Dinamik Programlama Yöntemi ile Çözümü (Solving Unit Commitment Problem by Dynamic Programming Method)

Dinamik programlama, sistem analizi alanında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve çok aşamalı karar verme problemlerinde kullanılabilir. Bu yöntem, özellikle karar aşamasının zaman periyodunda olan problemlere çok uygundur. Periyotlar birbirine bağlıdır ve bir zaman döneminde alınan kararlar sonraki karar verme aşamalarını etkilemektedir. Problem, alt problemlere bölünür ve her bir alt problem için optimal bir çözüm bulunur, n sayıda karar verme aşamalarına sahip bir problem, n sayıda ve her biri tek bir karar değişkenine sahip problemlere bölünür. Hesaplama süresi, bir problem içindeki değişkenlerin sayısına bağlı üssel büyürken, alt problemlerin sayısına bağlı olarak doğrusal büyür. Problemin tümü bir sistem ve alt problemler de basamak olarak düşünülebilir. Dinamik programlamada basamaklar, genellikle bir zaman aralığını temsil eder. Bir sistemin her bir basamağında, problemin çözüm aşamalarına karşılık gelen birden fazla durum vardır. Durumlar, tamamlanmamış çözümleri gösterir. Karar verici, her bir basamakta, o basamak için en iyi kararı vermelidir. Bir karar, sistemi bir durumdan diğerine taşır. Bir sistemi bir durumdan diğerine taşıyan her bir aşamaya basamak denir [17]. Dinamik programlama genellikle ileri doğru ve geriye doğru dizilimler şeklinde uygulanır. Bu yöntem, güç sistemleri problemleri için önemli yöntemlerden biridir.

Dinamik programlama algoritması, başlangıç anından son zamana kadar uygulanır ve başlangıç anına döner. İleri dinamik programlama algoritmasının birim yüklenme probleminde bazı avantajları vardır. Başlangıç koşulları kolayca belirlenir ve gerekli olduğu kadar hesaplamalar yapılır. İleri dinamik programlama algoritması Şekil 1 'de verilmiştir.

Bu algoritma için kullanılan maliyet fonksiyonu şu şekildedir:

$$F_{maliyet}(K,I) = \min_{L} \begin{bmatrix} P_{maliyet}(K,I) \\ +S_{maliyet}(K-1,L:K,I) \\ +F_{maliyet}(K-1,L) \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5) numaralı denklemde;

$F_{maliyet}(K,I)$ = (K,I). duruma ulaşmak için en düşük toplam maliyeti,

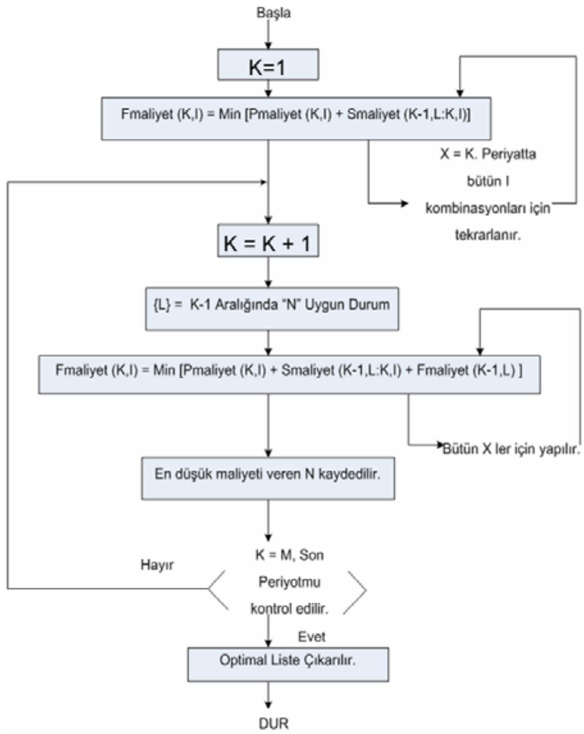
$P_{maliyet}(K,I)$ = (K,I). durumun üretim maliyetini,

$S_{maliyet}$ (K-1,L:K,I) = (K-1,L). durumdan (K,I). duruma ulaşmak için geçiş maliyetini

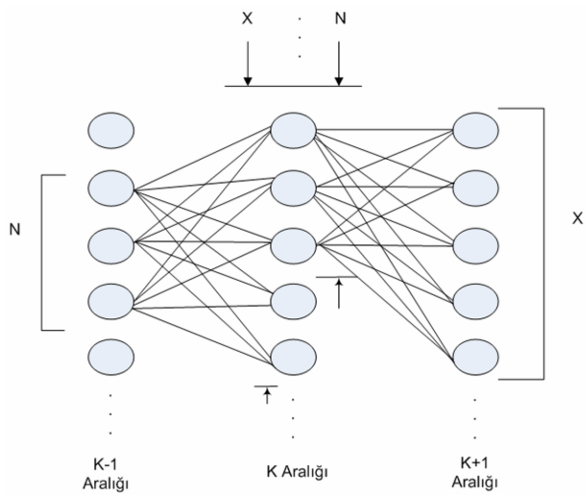
göstermektedir.

Bu yöntemde, 'uygun durumlar' öncelik listesine göre uygun olarak önem sırasına göre sıralanır. Bu sıralamadan en uygun N tanesi seçilir ve bu N durum için geçiş maliyetleri hesaplanır.

Problemin çözümünde kısıt olarak, yük dengesi ve birimlerin üretim limit değerlerini sağlaması alınmıştır. Şekil 1'deki algoritmada X, herbir periyottaki durum sayısını ve N, her bir adımdaki yol veya alternatif sayısını göstermektedir. Bu değişkenler kullanılarak hesaplama kontrolü yapılır. X'in veya N'in maksimum sayısı 2^{n-1}'dir. Şekil 2'de N=3 ve X=5 için dinamik programlama algoritmasının arama yolları gösterilmiştir.



Şekil 1. İleri dinamik programlama yöntemi akış şeması (Unit commitment via forward dynamic programming) [18]



Şekil 2. Dinamik programlama yönteminin N=3 ve X=5 için kısıtlı arama yolları (Restricted search paths in dynamic programming aAlgorithm with N=3 and X=5) [18]

Bu çalışmada, ileri dinamik programlama yaklaşımı kullanılmıştır ve öncelik sıralama listesine göre uygun olan durumlar belirlenmiştir.

3.2 Birim Yüklenme Probleminin Gevşetilmiş Lagrange Yöntemi ile Çözümü (Solving Unit Commitment Problem by Lagrange Relaxation Method)

Dinamik programlama yöntemi büyük boyutlu güç sistemlerinin çözümünde bazı dezavantajlara sahiptir. Bunun nedeni, her bir periyotta kombinasyon sayılarının test edilmesidir. Gevşetilmiş Lagrange yöntemi bu dezavantajları genel olarak çözebilmektedir. Optimizasyon problemlerini çözmenin diğer bir yolu 'ikil (dual) çözüm' olarak bilinir. Lagrange çarpanları da 'ikil değişkenler'olarak adlandırılır. Gevşetilmiş Lagrange yöntemi de temel olarak ikil optimizasyon yöntemine dayanır. U_i (t)=0 ise, t.periyotta i. birim devrede değil, U_i (t)=1ise, t.periyotta i. birim devrede anlamına gelmektedir.

Gevşetilmiş Lagrange yöntemi ile çözümde amaç fonksiyonunu denklem (1) deki gibi tanımlanır. Bu durumda Lagrange fonksiyonu şu şekilde olur:

$$L(P,U,\lambda) = F(P_i^t, U_i^t) + \sum_{t=1}^{T} \lambda^t (P_{yük}^t - \sum_{i=1}^{N} P_i^t, U_i^t) \quad (6)$$

problem çözülürken kısıtlar altında Lagrange fonksiyonu minimize edilmelidir ve bu her bir birim için ayrı ayrı uygulanmalıdır. Problemde yük dengesi birbirini etkileyen (coupling) bir kısıttır. Bu nedenle bir birim diğer bir birimin çalışmasını etkiler. Gevşetilmiş Lagrange yöntemi, birim yüklenme problemini 'gevşetilmiş' veya 'birbirini etkileyen' kısıtlarını geçici olarak ihmal ederek çözer. Bu ikil optimizasyon yöntemi ile yapılır. İkil yöntem Lagrange çarpanlarına göre diğer kısıtlar minimumlaştırılırken maksimum yapılarak optimum değere ulaşırlar. Bu durumda ikil fonksiyonun denklemleri şöyledir:

$$q^*(\lambda) = \underset{\lambda^t}{maks}\, q(\lambda) \quad (7)$$

$$q(\lambda) = \min_{P_i^t, U_i^t} L(P,U,\lambda) \quad (8)$$

problemin çözümü iki adımda yapılmaktadır:

1. q(λ)'yı maksimum değere taşıyan λ^t 'ler bulunur.
2. λ^t 'nin 1. adımda bulunduğu ve sabit olduğu varsayılır. Lagrange'nn minimalleştiricisi p(t) ve u (t) değerleri ayarlanarak bulunur.

Lagrange fonksiyonunun aşağıdaki şekilde minimalleştiricisi bulunabilir.

$$L = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\left[F_i(P_i^t) + BM_{it}\right]U_i^t + \sum_{t=1}^{T}\lambda(P_{yük}^t - \sum_{i=1}^{N}P_i^t U_i^t) \quad (9)$$

eşitlik yeniden düzenlenirse şu ifade elde edilir:

$$L = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\left[F_i(P_i^t) + BM_{it}\right]U_i^t + \sum_{t=1}^{T}\lambda^t P_{yük}^t - \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\lambda^t P_i^t U_i^t \quad (10)$$

Burada, $\lambda P_{yük}^t$ ifadesi sabit olduğundan ihmal edilebilir. Bu durumda eşitlik şu şekilde olur:

$$L = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\left[F_i(P_i^t) + BM_{i,t}\right]U_i^t - \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\lambda^t P_i^t U_i^t \quad (11)$$

(11) eşitliğinde, bir birim diğer bir birimden ayrılabilmiştir. Bu durumda denklem şöyle ifade edilebilir:

$$\sum_{i=1}^{N}\left[F_i(P_i^t) + BM_{i,t}\right]U_i^t - \lambda^t P_i^t U_i^t \quad (12)$$

(12) eşitliği her bir birim için ayrı ayrı çözülür. Lagrange ifadesinin minimalleştirilmesi için bütün periyotlarda herbir üretim biriminin en küçük değeri aşağıdaki ifadeler kullanılarak bulunur:

$$\min q(\lambda) = \sum_{i=1}^{N} \min\left\{\sum_{i=1}^{N}\left[F_i(P_i^t) + BM_{it}\right]U_i^t - \lambda^t P_i^t U_i^t\right\} \quad (13)$$

$$\min[F(P_i^t) - \lambda^t P_i^t] \quad (14)$$

(14) denkleminde verilen fonksiyonun minimalleştiricisini bulmak için şu ifadeler kullanılır:

$$\frac{d}{dP_i^t}\min[F(P_i^t) - \lambda^t P_i^t] = \frac{d}{dP_i^t}F(P_i^t, U_i^t) - \lambda^t = 0 \quad (15)$$

$$\frac{d}{dP_i^t}F(P_i^{(opt)}) = \lambda^t \quad (16)$$

Birim limitleri ve P_i^{opt} ilişkisine bağlı olarak üç durum oluşur:

- $P_i^{(opt)} \le P_i^{\min}$
  $\min[F(P_i^t) - \lambda^t P_i^t] = F(P_i^{\min}) - \lambda^t P_i^{\min}$
- $P_i^{\min} \le P_i^{opt} \le P_i^{(maks)}$
  $\min[F(P_i^t) - \lambda^t P_i^t] = F(P_i^{optn}) - \lambda^t P_i^{opt}$
- $P_i^{(opt)} \ge P_i^{maks}$
  $\min[F(P_i^t) - \lambda^t P_i^t] = F(P_i^{maks}) - \lambda^t P_i^{maks}$

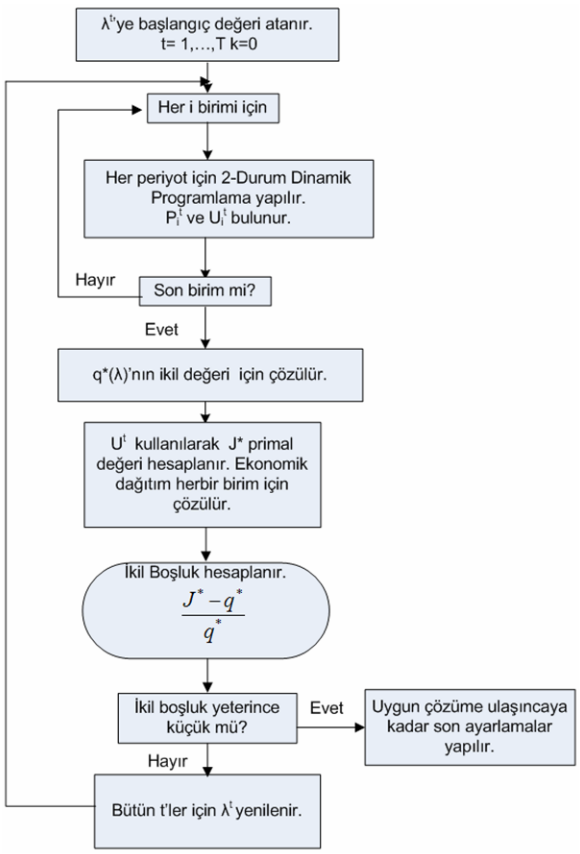
U_i (t) = 0 olduğunda daha düşük değer elde etmenin tek yolu; $F(P_i^t) - \lambda^t P_i^t < 0$ eşitsizliğini kullanmaktır[18]. Birim yüklenme problemi için gevşetilmiş Lagrange yönteminin akış diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir.

q(λ) maksimumlaştırabilmek için λ^t 'nin seçimi ve ayarlanması oldukça önemlidir. Bu nedenle araştırmacılar λ^t 'nin seçimi ve ayarlanmasıyla ilgili çalışmalara devam etmektedirler. Bununla ilgili olarak kullanılan yöntemlerden bazıları 'bisection yöntemi' ve 'linear interpolasyon' yöntemidir [2].

Bu çalışmada λ^t 'nin seçimi ve ayarlanması ile ilgili olarak, gradient arama tekniği kullanılmıştır. λ^t değerleri (17) eşitliği ile hesaplanmıştır:

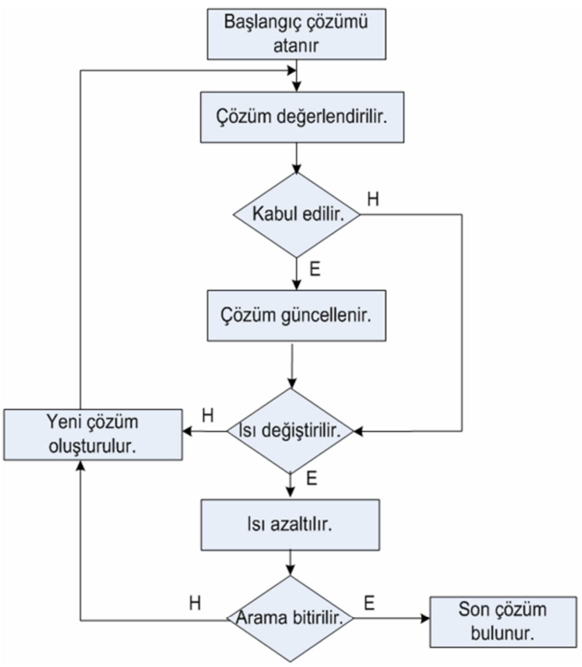
$$\lambda^t = \lambda^t + \left[\frac{d}{d\lambda}q(\lambda)\right]\alpha \quad (17)$$

Gevşetilmiş Lagrange yönteminde (1) eşitliği ve probleme ait kısıtlar ile ifade edilen değer problemin primal değeri (J^*) olarak adlandırılmaktadır. (7) eşitli-



Şekil 3. Gevşetilmiş Lagrange yöntemi ile birim yüklenme probleminin akış diyagramı (Lagrange relaxation procedure for unit commitment)

ği ile gösterilen $q^*(\lambda)$ ifadesi ise ikil değeri göstermektedir. Problemin çözümüne ne kadar yakınsandığı relative duality gap (bağıl ikil boşluk) değerine bakılarak karar verilir. Bu değer (18) eşitliği ile hesaplanır:



Şekil 4. Benzetimli tavlama yönteminin akış şeması (Simulated annealing flow diagram)

$$\text{Bağıl ikil boşluk} = \frac{J^* - q^*}{q^*} \tag{18}$$

3.3 Birim Yüklenme Probleminin Benzetimli Tavlama Yöntemi ile Çözümü (Solving Unit Commitment Problem by Simulated Annealing Method)

Benzetimli tavlama yöntemi, ilgilenilen fonksiyonun rasgele hesaplamalarına dayalıdır, fonksiyonun tüm yüzeyini inceler ve aşağı-yukarı yönlü hareketlerle yerel minimumlar arası geçişlere izin vererek yerel minimum tuzaklarından kurtulup, fonksiyonun global minimumunu bulmaya çalışır ve bu yöntem, özel tanımlanmış komşuluk yapısına ve algoritmanın yerel minimum tuzaklarından kurtulup global minimum değerlere ulaşmasını sağlayacak iyi tanımlanmış bir tavlama programına ihtiyaç duyan stokastik bir algoritmadır. En iyi sonuca ulaşabilmek için, kontrol parametresi olan sıcaklığa ilişkin soğuma fonksiyonları oluşturulmuştur [7].

Kombinasyonel optimizasyon tabanlı güç sistemleri için farklı çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Araştırmacılar, farklı teknikler kullanarak amaç fonksiyonunu minimum yapmaya çalışmışlardır. Sezgisel yaklaşımlarda genel olarak iki temel yaklaşım vardır: Ayrıştırma ve ilerleyen öteleme teknikleri. Ayrıştırma yönteminde, problem alt problemlere ayrılır. Gerçekte çok iyi çözümler elde edilebilir. Fakat bu üstünlük bütün güç sistemi analizi problemlerine uygulanamaz. İlerleyen öteleme tekniklerinde ise, bu yöntemler genellikle minimum noktalara takılabilir [7].

Benzetimli tavlama yöntemi, yüksek bir sıcaklık değerinde yeni bir konfigürasyondan başlar. Her bir hesaplama adımında mevcut çözümün komşuları arasından çok sayıda çözüm üretilir. Yeni çözümler belirlenen kriterlere göre kabul edilir veya reddedilir. Bu yöntem, yerel optimada sıkışırsa, Boltzman faktörü hesaplanır. Rassal sayı Boltzman faktöründen küçükse, yeni konfigürasyon tutulur, değilse bu taşımadan önce yeni konfigürasyon diğer adım için kullanılır. Hesaplama adımlarından sonra sıcaklık belirlenen bir fonksiyona göre azaltılır. Algoritma istenen iterasyona ya da sıcaklık minimum değerine ulaştığında veya istenen çözüme ulaşıldığında sonlandırılır. Bu yöntemin en temel gösterimi Şekil 4'te verilmiştir. Bu yöntem, temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, başlangıç durumuna getirme, seçim-bitirme ve güncelleme adımlarıdır. İlk olarak, başlangıç çözümüne karar verilir ve mevcut çözüm sonucunun en iyi sonuç olarak ataması yapılır. Seçim ve sonlandırma aşamasında önce ulaşılan değerler başta belirlenen parametrelerle karşılaştırılarak seçilen bu değere göre sonlandırma veya devam kararı alınır, devam edilecekse belirlenen kurallar doğrultusunda yeni çözüm bulunur. Son aşama olan güncelleme aşamasında seçilen yeni çözümün değeri en iyi değer olarak atanır ve seçim-sonlandırma aşamasına geri dönülür.

Denge durumunda verilen konfigürasyon olasılığı P_{cong}, Boltzman dağılımıdır.

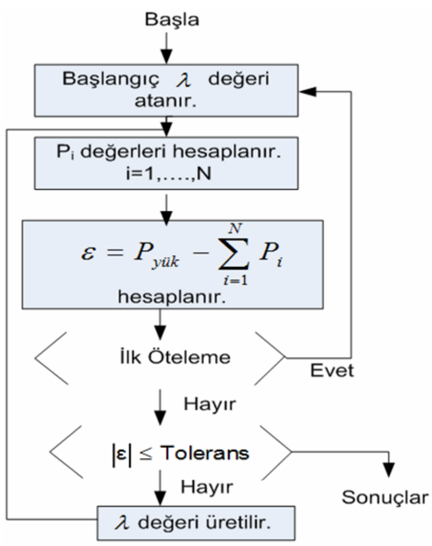
$$P_{confg} = K \cdot \exp^{\frac{-E_{confg}}{C_P}} \qquad (19)$$

(19) denkleminde E_{confg}, verilen konfigürasyonun enerjisini ve K'da sabit değeri göstermektedir. Metropolis, sabit Cp sıcaklığında termal denge noktasına ulaşmak için Monte Carlo simülasyonunu önermiştir [19].

Bu yöntemde, deneme konfigürasyonunu elde etmek için katının akış konfigürasyonu rastgele üretilir. E_c ve E_t sırasıyla, mevcut konfigürasyonların ve deneme konfigürasyonunun enerji seviyelerini gösterir. Eğer $E_c > E_t$ düşük enerji seviyesine ulaşırsa, deneme konfigürasyonu kabul edilir ve bu mevcut konfigürasyon olur. Diğer taraftan, $E_c \leq E_t$ ise, deneme konfigürasyonu mevcut konfigürasyon olarak kabul edilir, olasılığı da $\exp[(E_c - E_t)/C_p]$ olur. Bu işlem, yüksek enerji seviyesinin geçişi reddedilmeyene kadar devam eder. Sonuçta, Boltzman dağılımı olasılıksal değere yakınsadığında, termal dengeye ulaşılır. C_p giderek azalır ve yeni enerji seviyesine ulaşıncaya kadar metropolis simülasyonu devam eder. C_p, sıfıra yaklaştığında düşük enerji konfigürasyonu pozitif olasılıkta olacaktır.

Birim yüklenme problemini benzetimli tavlama yöntemi ile çözebilmek için problemin çözümünde alt problem olarak ekonomik dağıtım analizinin yapılması gerekmektedir. Literatürde kullanılan ekonomik dağıtım analizleri, lamda öteleme yöntemi, birinci ve ikinci derece gradient yöntemidir.

Lamda öteleme yönteminde, lamda bir Lagrange çarpanıdır ve kısıtlandırılmış optimizasyon probleminin çözümünde kullanılır. Birinci derece gradient yönteminde maliyet fonksiyonların birinci türevleri, ikinci derece gradient yönteminde ise ikinci derece türevlerinden faydalanılarak çözüm bulunmaktadır. Lamda-öteleme yöntemi, sistemin λ değerini çözen ve ekonomik dağıtım yapan bir yöntemdir. Lamda, optimizasyon problemini çözerken kullanılır ve Lagrange çarpanı olarak adlandırılır. Bu çalışmada, ekonomik dağıtım yöntemlerinden lamda-öteleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin akış diyagramı Şekil 5'de gösterilmiştir [6].



Şekil 5. Lamda-öteleme yönteminin akış diyagramı (Lamda-iteration flow diagram)

Bu akış diyagramında, P_i, i. birimin çıkış gücünü, ε, tolerans değerine yakınlığı göstermektedir. Bu yöntemde, üretim birimlerinin çıkış güçleri toplamı talep edilen yükle karşılaştırılır, denge sağlanmıyorsa başka lamda değerleri için ötelemelere devam edilir.

Birim yüklenme probleminin çözümünde benzetimli tavlama yöntemini uygulayabilmek için iki tür değişken belirlenmelidir. Birim durumunu gösteren değişkenler ve birimlerin çıkış güçleri. Genel olarak problem iki alt problemden oluşur. Bunlar; kombinasyonel optimizasyon problemi ve doğrusal olmayan optimizasyon problemleridir. Benzetimli tavlama yöntemi kombinasyonal optimizasyon problemlerini çözmek amacıyla uygulanır.

Amaç fonksiyonu olarak (1) eşitliği alınmış ve kısıt olarak da (2) ve (4) no'lu eşitlikler alınmıştır. Benzetimli tavlama yöntemi birim yüklenme problemine uygulaması durumunda Şekil 4'te verilen algoritma şu şekilde olur:

1.Adım: Bütün değişkenler için başlangıç değerleri atılır. Iterasyon numarası K = 0 alınır.
2.Adım: Başlangıçta uygun çözümler rasgele bulunur.
3.Adım: Toplam işletme maliyeti bulunur. Bu, iki adımda yapılır: İlk önce ekonomik dağıtım problemi çözülür. Daha sonra başlangıç maliyetleri hesaplanır.
4.Adım: Başlangıç sıcaklık değeri belirlenir: C_p^k
5.Adım: Denge noktasına ulaşıldıysa algoritma durur. 8. adıma gidilir. Değilse eşitlik kriteri sağlanıncaya kadar 6. ve 7. adımlar aynı sıcaklık değeri için tekrarlanır.
6.Adım: Deneme çözümleri bulunur.
7.Adım: Kabul testi yapılır. Deneme çözümü kabul edilir veya reddedilir.
8.Adım: Durma kriteri sağlanınca durulur, değilse sıcaklık azaltılır. C_p^{k+1}, k= k + 1 olur ve 5. adıma gidilir.

4. UYGULAMALAR VE SİMÜLASYONLAR (APPLICATIONS AND SIMULATIONS)

Birim yüklenme problemi dinamik programlama, gevşetilmiş Lagrange ve benzetimli tavlama yöntemiyle çözülmüştür. Bu çözüm yöntemleri, Tunçbilek termik santraline ait verilere uygulanmıştır. Bu santrale ait bilgiler, Tablo 1'de verilmiştir. Birimlerin Üretim Yük Kapasitesi (ÜYK), Başlangıç Maliyeti (BM) ve Artımsal Yakıt Maliyeti (AYM) değerleri

Tablo 1. Tunçbilek termik santraline ait değerler (Unit characteristics for Tuncbilek thermal plant)

Birim No	ÜYK (MW)		BM ($)	AYM ($/MWh)
	Min	Maks		
1	8	32	60	33.73
2	17	65	240	28.952
3	35	150	550	27.005
4	30	150	550	27.659

Tablo 1'de verilmiştir. Ele alınan problem, yük dengesi kısıtından, birimlerin üretim kapasitesi kısıtlarından ve başlangıç maliyeti kısıtlarından oluşmaktadır. Yük dengesi kısıtı her periyotta talep edilen yükün karşılanabilmesiyle ilgilidir. Birimlerin üretim kısıtları, birimlerin en küçük ve en büyük yük kapasitelerini göstermektedir [20–22].

Birimlerin AYM değerleri EÜAŞ' tan alınmıştır. AYM değeri kullanılarak, minimum çıkış gücünde, maksimum çıkış gücünde ve bu güç değerlerinin ortalamasında ikinci derece fonksiyonun alacağı değerlere bağlı olarak birimlerin maliyet fonksiyonları MS Excel programında eğri uydurma yöntemiyle oluşturulmuştur. Bu fonksiyonlar aşağıda verilmiştir:

$$\text{Birim 1: } y = 0.515\, P_1^2 + 10.86\, P_1 + 149 \tag{20}$$

$$\text{Birim 2: } y = 0.227\, P_2^2 + 8.341\, P_2 + 284 \tag{21}$$

$$\text{Birim 3: } y = 0.082\, P_3^2 + 9.9441\, P_3 + 49 \tag{22}$$

$$\text{Birim 4: } y = 0.074\, P_4^2 + 12.44 P_4 + 38 \tag{23}$$

Bu çalışmada, 24 saatlik zaman dilimi 3'er saatlik periyotlarda incelenmiştir. Talep edilen yük değerlerine göre 8 periyotta en uygun birim kombinasyonları ve sistemin toplam maliyet değerleri hesaplanmıştır. Yapılan bütün çözüm yöntemlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sistemde tahmini talep değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Tahmini talep değerleri (Forecasting load data)

Periyot (P)	Yük (MW)	Periyot (P)	Yük (MW)
1	168	5	313
2	150	6	347
3	260	7	308
4	275	8	231

Problemin amaç fonksiyonu şu şekildedir:

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\left[F_i(P_i^t) + BM_{i,t}\right]U_i^t =$$

$$\begin{bmatrix} (0.515\ P_1^2 + 10.86\ P_1 + 149 + \\ 0.227\ P_2^2 + 8.341\ P_2 + 284 + \\ 0.082\ P_3^2 + 9.9441\ P_3 + 49 + \\ 0.074\ P_4^2 + 12.44 P_4 + 38) + \\ (60 + 240 + 550 + 550) \end{bmatrix} U_i^t \tag{24}$$

Problemin çözümünde ele alınan kısıtlar şunlardır:

1) Yük Dengesi: $\sum_{i=1}^{N} U_i(t) P_i(t) = P_{yük}(t)$, her periyotta tahmini talep değerleri, birimlerin çıkış güçleri toplamına eşit olmalıdır.
2) Birimler, üretim limit değerlerini sağlamalıdır. $U_i^t P_i^{\min} \le P_i^t \le U_i^t P_i^{maks}$

4.1 Dinamik Programlama Yönteminin Uygulanması (Application for Dynamic Programming Method)

Bu yönteminin uygulanması sonucu bulunan uygun kombinasyonlar ve toplam maliyet değeri Tablo 3'te ve birimlerin bulunan bu kombinasyonlara uygun olarak yüklendiği güç değerleri Tablo 4'te görülmektedir.

Tablo 3. Dinamik programlama yöntemi ile her periyotta uygun birim kombinasyonları (Unit commitment schedule for dynamic programming)

P	Yük (MW)	Birim Kombinasyonları
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 0 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	0 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 1 1 1

Tablo 4. Birimlerin yüklendiği değerler (Load values for each plant)

P	Yük	P1	P2	P3	P4
1	168	0	0	87.69	80.30
2	150	0	0	79.15	70.85
3	260	0	0	131.33	128.66
4	275	0	30.01	123.44	121.55
5	313	0	51.27	132.15	129.57
6	347	20.99	53.17	137.42	135.41
7	305	18.63	47.81	122.58	118.97
8	231	0	39.27	98.94	92.77

Dinamik programlama ile birim yüklenme problemini çözmek için ileri dinamik programlama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem çok birimden oluşan problemlerde uygulanırken birim kombinasyonu çok fazla olacağı için problemin çözümü zorlaşır. Bu nedenle her durumda uygun kombinasyonlardan birkaç tanesi seçilerek sistemin maliyet değeri hesaplanır. Birinci periyotta bütün kombinasyonlar için maliyet değeri hesaplanır. Sonraki periyot değerinde bütün uygun kombinasyonlar bulunur. Bu uygun kombinasyonlar için geçiş maliyetleri hesaplanır. En düşük maliyet değerini veren kombinasyonlar kaydedilir. Son periyot değerine kadar hesaplamalar tekrar edilir. Bu şekilde ileri dinamik programlama yöntemi için en düşük maliyet değeri hesaplanmış olur.

Bu problemde, Tablo 3'teki uygun birim kombinasyonlarına göre toplam maliyet 51271 $ olarak bulunmuştur. Problemin dinamik programlama yöntemi ile çözüldüğü bu durumda geçen toplam süre 4.053 saniyedir.

4.2 Gevşetilmiş Lagrange Yönteminin Uygulanması (Application for Lagrange Relaxation Method)

Birim yüklenme problemi konveks olmayan bir problem olduğundan dolayı çözümünde ikil optimizasyon yöntemi uygulanacaktır. Problemin çözümünde izlenilen yöntem şu şekildedir: Başlangıç lamda değeri atanır. Birimlerin çıkış güçleri hesaplanır. Birimin maksimum çıkış gücü değeri hesaplanan bu değerden küçükse birimin çıkış gücü maksimum çıkış gücüne eşit alınır. Birimin çıkış gücü minimum güçten küçükse, birimin çıkış gücü minimum çıkış güç değerine eşit alınır. Diğer durumlarda, bulunan değer birimin çıkış gücü olarak alınır. Bu çıkış güç değerleri için maliyet değeri hesaplanır. Bu hesaplamalar yapılırken birimin başlangıç maliyet değerleri de eklenir. Maliyet değeri sıfırdan büyükse birim çalıştırılmaz, değilse birim çalıştırılır. Bütün birimler için tekrarlanır. Birimlerin çıkış güçleri hesaplandıktan ve devrede olup olmadığına karar verildikten sonra, ikil değer hesaplanır. Bu değer birimlerin başlangıç maliyetleri de dikkate alınarak bulunur. Primal değerle ikil değeri karşılaştırmak için, primal değer hesaplanır. Primal değerle ikil değer arasındaki farkı bulmak için ikil boşluk hesaplanır.

Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları ve toplam maliyet değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Birimlerin bulunan bu kombinasyonlara uygun olarak yüklendiği güç değerleri Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 5. Gevşetilmiş Lagrange yöntemi ile her periyotta uygun birim kombinasyonları (Unit commitment schedule for Lagrange relaxation)

P	Yük (MW)	Birim Kombinasyonları
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 0 1 1
4	275	0 0 1 1
5	313	0 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 1 1 1

Bu tablolar dikkate alındığında gevşetilmiş Lagrange ile problemin çözümünde *primal değer:* 51190$ ve *ikil değer:* 50489$ olarak bulunmuştur. *Bağıl ikil boşluk* değeri bu problem için 0,013'dir. Problemin gevşetilmiş Lagrange yöntemi ile çözüldüğü bu durumda geçen toplam süre 0.062 saniyedir.

Tablo 6. Birimlerin yüklendiği değerler (Load values for each plant)

P	Yük	P1	P2	P3	P4
1	168	0	0	87.69	80.30
2	150	0	0	79.15	70.85
3	260	0	0	131.33	128.66
4	275	0	0	138.44	136.55
5	313	0	51.27	132.15	129.57
6	347	20.99	53.17	137.42	135.41
7	305	18.63	47.81	122.58	118.97
8	231	0	39.27	98.94	92.77

4.3 Benzetimli Tavlama Yönteminin Uygulaması (Application for Simulating Annealing Method)

Benzetimli tavlama yöntemini için ekonomik dağıtım yöntemlerinden lamda-öteleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yönteminde soğutma işlemi parametreleri büyük önem taşımaktadır. Seçilen değişkenlerin değerleriyle algoritma sonucu ilişki içerisindedir. Bu değişkenler; başlangıç sıcaklığı, sıcaklığın ne kadar düşürüleceği ve algoritmanın ne zaman durdurulacağıdır. Benzetimli tavlama yöntemi çözülürken başlangıç sıcaklık değeri 2000 alınmış ve sıcaklık değeri $\alpha = 0.99$ ile çarpılarak azaltılmıştır. Olasılık limit değeri ise 0.6 olarak alınmıştır. Lamda-öteleme yöntemi sonucunda birimlerin yüklendiği güç değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Benzetimli tavlama yöntemi ile problemin çözülmesi sonucunda bulunan birim kombinasyonları ve bütün periyot boyunca bulunan toplam maliyet değeri Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 7. Lamda-öteleme yöntemi sonucu birimlerin yüklendiği değerler (The results of the Lambda iteration method for each unit)

P	Yük	P1	P2	P3	P4
1	168	0	0	87.69	80.30
2	150	10.89	0	73.98	65.12
3	260	15.72	41.21	104.32	98.73
4	275	16.63	43.27	110.03	105.06
5	313	18.93	48.50	124.48	121.08
6	347	20.99	53.17	137.42	135.41
7	305	21.77	0	142.34	140.87
8	231	0	0	117.57	113.42

Tablo 8. Benzetimli tavlama yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları (Unit commitment schedule for simulated annealing)

P	Yük (MW)	Birim Kombinasyonları
1	168	0 0 1 1
2	150	1 0 1 1
3	260	1 1 1 1
4	275	1 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 0 1 1
8	231	0 0 1 1

Bu problemde ele alınan kısıtlar doğrultusunda toplam maliyet 50481$ olarak bulunmuştur. Problemin benzetimli tavlama yöntemi ile çözüldüğü bu durumda geçen toplam süre 64.47 saniyedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, amaç fonksiyonu ve kısıtları konveks olmayan ve matematiksel yöntemlerle çözümü oldukça zor olan birim yüklenme problemi, dinamik programlama, gevşetilmiş Lagrange ve benzetimli tavlama olmak üzere üç farklı yöntem kullanılarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dinamik programlama yöntemi, problemi parçalara ayırarak çözebilen bir yöntem olduğundan birim yüklenme problemi için uygun bir çözüm sunabilmektedir. Gevşetilmiş Lagrange yöntemi, matematiksel optimizasyon temelinde çözüm sunar. Sezgisel yaklaşımlardan biri olan benzetimli tavlama yöntemi ise matematiksel olarak çözümü zor olan problemlere alternatif olarak uygulanabilen ve yerel minimum noktaları atlayarak çözüme yakınsayan bir yöntemdir. Bu yöntemler maliyet açısından karşılaştırıldığında benzetimli tavlama yöntemi ele alınan kısıtlar doğrultusunda toplam maliyet dinamik programlama yöntemine göre 790$ ve gevşetilmiş Lagrange yöntemine göre de 709$ daha düşüktür. Buna rağmen süre açısından yapılan karşılaştırmada ise benzetimli tavlama yönteminin diğer iki yönteme göre çok daha uzun sürede çözüme ulaştığı görülmüştür. Çözüme en kısa sürede ulaşan yöntem ise gevşetilmiş Lagrange yöntemidir.

SEMBOLLER (Nomenclature)

AYM	:Artımsal yakıt maliyeti.
BM	:i.birimin başlangıç maliyeti.
$F_i(P_i^t)$	:i.birimin t.zamanda yakıt maliyeti.
J^*	:Problemin primal değeri.
P	:Periyod
P_i^{maks}	:i.birimin maksimum çıkış gücü değeri.
P_i^{min}	:i.birimin minimum çıkış gücü değeri.
P_i^{opt}	:i.birimin optimal çıkış gücü değeri.
$P_i(t)$	:i.birimin t.zamanda çıkış gücü.
$P_r(t)$	:t.zamanda sistemin dönme rezervi.
$P_{yük}(t)$	:t.zamanda talep edilen güç.
q^*	:Problemin dual (ikil) değeri.
$U_i(t)$	: i.birimin t.zamanda durumu.
ÜM	:Üretim maliyeti.
TM	:Toplam maliyet.
λ	:Lagrange çarpanı.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Application Survey Paper, **Electrical Generation UC Planning © LINDO Systems**, 2003.
2. James A. Momoh, **Electric Power System Applications of Optimization**, M. Dekker, New York, A.B.D, 405–408, 2001.
3. Snyder W. L., Powell H. D., Rayburn J. C., “Dynamic-programming approach to unit commitment”, **IEEE Transactions on Power Systems**, Cilt 2, No 2, 339-348,1987.
4. Ouyang Z., Shahidehpour S. M., “An intelligent dynamic-programming for unit commitment application”, **IEEE Transactions on Power Systems**, Cilt 6, No 3, 1203 – 1209, 1991.
5. Nayak R., Sharma J.D., “Hybrid neural network and simulated annealing approach to the unit commitment problem”, **Computers and Electrical Engineering**, Cilt 26, No 6, 461-477, 2000.
6. Zhuang F., Galiana F.D., “Unit Commitment by Simulated Annealig”, **IEEE Transactions on Power Systems**, Cilt 5, No 1, 311-318, 1990.
7. Mantawy A. H., Abdel-Magid L, Shokri S, “A Simulated Annealing Algorithm for Unit Commitment”, **IEEE Transactions on Power Systems**, Cilt 13, No 1, 197-204, 1998.
8. Viana A, Sousaz J.P., Matow M., “Simulated Annealing for the unit commitment problem”, **IEEE Porto Power Tech Conference**, Portugal, 10^{th} -13^{th} September2001.
9. Juste K.A., Tanaka E., Haegawa J., “An evolutionary programming solution to the unit commitment problem”, **IEEE Transactions on Power Systems**., Cilt 14, No 4,1452-1459, 1999.
10. Senjyu T, Yamashiro H, Shimabukuro K, Uezato K, “A unit commitment problem by using genetic algorithm based on characteristic classification”, **Proc. IEEE Power Eng. Soc. Trans. Distr. Conference**, Cilt 1, 58-63, 2002.
11. Chuan P.C., Chih W.L., Chun., C.L., “Unit commitment by Lagrangian relaxation and genetic algorithms”, **IEEE Transactions on Power System,** Cilt 15, No 2, 707-714, 2000.
12. Huang K.Y., Yang H.T., Yang C.L., “A new thermal unit commitment approach using constraint logic programming”, **IEEE Transactions on Power System**, Cilt 13, No 3, 936-945, 1998.
13. Vermin S, Imhof K, Mukherjee S, “Implementation of Lagrangian relaxation based unit commitment problem”, Cilt 4, No 4, 1373-1380, **IEEE Transactions on Power System**, 1989.
14. Zhuang F., Galiana F. D., “Towards a more rigorous and practical unit commitment by Lagrange relaxation”, **IEEE Transactions on Power System**, Cilt. 3, No 2, 763-773, 1988.
15. Ongsakul W., N. Petcharaks, “Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation”, **IEEE Transactions on Power System**, Cilt 19, No 1, 620- 628, 2004.
16. El-Saadawi, Tantawi A., Tawfik E., “A Fuzzy Optimisation-Based Approach to Large Scale Thermal Unit Commitment”, **Electric Power Systems Research**, Elsevier, Cilt 72, No 3, 245-252, 2004.
17. Dowd, P A., “Application of Dynamic and Stochastic Programming to Optimize Cut-off

Grades and Production Rates" **Transactions of the Institute of Mining andMetallury**, Cilt 85, A22–31, 1976.
18. Wood A. J., Wollenberg B. F., **Power Generation, Operation, and Control**, 2nd ed. New York: Wiley, 1996.
19. Metropolis, N., Rosenbluth A., Rosenbluth M., Teller A., "Equation of state calculations by fast computing machines", **Journal of Chemical Physics**, Cilt 21, 1087–1092, 1953.
20. Santraller Enformasyon ve Değerlendirme Müdürlüğü **Teaş Faaliyet Raporları**, Ankara 2001.
21. Santraller Enformasyon ve Değerlendirme Müdürlüğü, **2002 Yıllık Faaliyet Raporu**, Termik Santraller ve Maden Sahaları Daire Başkanlığı, Ankara, 2002.
22. Eren, Z. ve Aktaş, K., **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, 2004.