

Kısa dönemli hidrotermal planlama probleminin çözümü için revize hızlı evrimsel programlama yöntemi

Revized fast evolutionary programming technique for short term hydrothermal scheduling

Fatih Mecitoğlu¹, Belgin Türkay², Saim Baran³

Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
İstanbul Teknik Üniversitesi

fatihm85@gmail.com, turkayb@itu.edu.tr, saimbaran@hotmail.com

Özet

Bu çalışma, kısa dönemli bir hidrotermal planlama (HP) probleminin Evrimsel Programlama (EP) ile çözümünü göstermektedir. Hidrotermal planlamanın amacı, hidrolik ve termik ünitelerin üretimlerinin optimum düzeyde gerçekleştirilerek termik ünitelerin yakıt maliyetlerinin sistemin işletme sınırları içerisinde minimize edilmesidir. EP'nin, doğrusal olmayan amaç fonksiyonu ve kısıtları içeren HP probleminin çözümünde optimuma yakın sonuçlar bulmada geleneksel yöntemlere göre daha başarılı olduğu görülmüştür. EP'de rasgele üretilen başlangıç ata (parent) deneme vektörü popülasyonundan Gauss veya Cauchy mutasyonu teknikleri kullanılarak yeni nesil vektörleri üretilmektedir. Üretilen yeni nesil ile ata vektörleri birbiriyle rekabet etmektedir. Popülasyondaki en iyi vektörler yeni iterasyon için ata vektörleri olarak seçilmektedir. İterasyon ilerledikçe optimum sonuca yakınsama artmaktadır. Yapılan çalışmada, mevcut EP algoritmasındaki olasılıksal (stokastik) rekabet yerine rastgele olmayan (deterministik) rekabet kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda sabit bir değer olarak alınan algoritmanın kontrol parametrelerinden ölçekleme katsayısı değişken alınmış ve yakınsama oranı, çözüm zamanı ve başarımlı oranı bakımından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Abstract

This paper presents solution of hydrothermal scheduling (HS) problem by Evolutionary Programming (EP). The purpose of the hydrothermal scheduling is to minimize fuel cost of thermal units by allocating hydro and thermal units optimally, satisfying constraints on system operation. EP performs better than conventional methods in converging to near optimum result in the solution of the HS problem, which consists of nonlinear objective function and constraints. In EP, offsprings are generated from randomly generated initial parent vectors by Gauss or Cauchy mutations. Parent vectors and their offspring vectors compete with each other. Better individuals are selected as new parent vectors for the next iteration. As the iteration make progress, convergence to optimum solution increases. In this study, instead of stochastic competition in

existing EP algorithms, deterministic competition is utilized. The control parameter "scaling factor" is taken as variable instead of constant. Thus, better results have been obtained in convergence rate, solution time and success rate.

1. Giriş

Kısa dönemli hidrotermal planlamanın amacı, 1 gün ila 1 hafta periyodunda, hidrolik ve termik ünitelerin optimum üretim güç değerlerinin bulunarak talep edilen yükün karşılanmasıdır. Hidrotermal planlamada minimize edilmek istenen amaç fonksiyonu, termik ünitelerin toplam yakıt maliyetidir. Kısa dönem hidrotermal planlamada, yük taleplerinin, hidrotermal sisteme ait çeşitli kısıtlar sağlanmak şartıyla, hidrolik ve termik üniteler arasında optimum düzeyde paylaşılması, enerjinin minimum yakıt maliyetiyle ve en az sera gazı salınımıyla üretilmesini sağlar. Pratikteki kısıtlar, generatör-yük dengesi, toplam su deşarjı, su içe akışı (inflow) eşitlikleri ile birlikte; rezervuar su hacmi ile hidrolik ve termik ünitelerin işletme sınırlarına ait eşitsizliklerdir.

Hidrotermal planlama probleminin çözümü için literatürde çeşitli yaklaşımlar bildirilmiştir [1-19]. Lagrange çarpanları ve gradient yöntemlerinden [2] ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. HP probleminde, amaç fonksiyonu doğrusal olmadığı için Lagrange çarpanları ve gradient yöntemleri, amaç fonksiyonun doğrusallaştırılmasını gerektirir. Yapılan doğrusallaştırmalar, optimum olmayan çözümlere yol açarak, zamanla büyük gelir kayıplarının oluşmasına neden olur. Son zamanlardaki araştırmalar, Genetik Algoritma (GA), Evrimsel Strateji (ES) ve Evrimsel Programlama (EP) gibi optimuma yakın çözümler üreten, daha verimli stokastik optimizasyon algoritmalarının uygulanmasına yönelmiştir. Bu algoritmalar doğa esinli algoritmalar olup, doğal seleksiyon ve genetiktekinen benzer süreçler içermektedir. Doğa esinli algoritmalar, geleneksel yöntemlere göre daha esnek ve güçlüdür. EP'de üretim ve seçim yöntemi mutasyon ve rekabettir, GA'da ise mutasyon ve genetik değişimdir (crossover). EP'de işlem zamanından önemli ölçüde tasarruf sağlanmaktadır [1]. Ayrıca, EP'nin GA'dan daha iyi performans sergilediği bildirilmiştir [12]. Yang ve diğerleri [13] HP planlama probleminin çözümünde Gauss mutasyonlu EP'nin yeteneğini göstermiştir. Hota ve diğerleri [14] HP problemini Gauss mutasyonlu EP yöntemi ile çözmüşlerdir. Ancak bu yöntem çok fazla kısıt olmayan

basit problemlerin çözümü için kullanışlıdır. Sinha ve Diğerleri, [1] IFEP'in (Geliştirilmiş Hızlı Evrimsel Programlama) geleneksel yöntemlere göre daha başarılı olduğunu göstermişlerdir.

Yapılan çalışmanın amacı, kısa vadede, talep edilen yükün, minimum yakıt maliyetiyle üretim yapılarak karşılanmasıdır. Sınırlı su kaynaklarının verimli kullanılması, termik ünitelerin yakıt maliyetini ve sera gazı salınımını en aza indirecektir. Bunun için talep edilen gücün hidrolik ve termik üniteler arasında bir üretim planı dahilinde paylaşılması gerekmektedir. Bu çalışmadaki hidrotermal planlama kısa dönemli olup, sadece bir üretim tesisi için yapılmıştır. Ülkemizdeki üretim tesislerinin hepsinde hidrotermal planlama yapıldığında uzun vadede enerji maliyetinden önemli ölçüde kazanç elde edilebileceği görülür. Çalışmanın sonucunda, literatürde kullanılan EP algoritması basitleştirilmiş, aynı zamanda iyileştirilmiştir. Bu iyileştirmelerin sağladığı olumlu test sonuçları verilmiştir.

2. Problemin Formülasyonu

Hidroelektrik ünitelerde yakıt maliyeti bulunmadığı için HP optimizasyonunda amaç, su kaynaklarının mümkün olduğu kadar etkin kullanılarak, toplam termik maliyetin minimize edilmesidir. HP'ye ilişkin matematiksel model bu bölümde verilmiştir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min F = \sum_{j=1}^J f_j(P_{Tj}) \quad (1)$$

Kısıtlar:

Yük dengesi,

$$P_{Tj} + P_{Hj} = P_{Dj} + P_{Kayıpj} \quad (2)$$

Hidrolik üretimin yalnızca su deşarjının bir fonksiyonu olduğu kabul edilirse,

$$P_H = \phi(q) \quad (3)$$

Termik ünitelerin işletme aralığı, kapasite sınırlarıyla kısıtlıdır,

$$P_{T \min} \leq P_{Tj} \leq P_{T \max} \quad (4)$$

Su ünitelerinin işletme aralığı, kapasite ile sınırlıdır,

$$P_{H \min} \leq P_{Hj} \leq P_{H \max} \quad (5)$$

Hidrolik süreklilik denklemi (rezervuardaki su hacminin değişimi)

$$V_{j+1} = V_j - q_j - s_j + r_j \quad (6)$$

Başlangıç ve son rezervuar su hacmi:

$$V(0) = V^0 = V_{ilk}; \quad V(J) = V^J = V_{son} \quad (7)$$

Su deşarj oranı sınırları:

$$q_{\min} \leq q_j \leq q_{\max} \quad (8)$$

Rezervuar depolama limitleri:

$$V_{\min} \leq V_j \leq V_{\max} \quad (9)$$

şeklinde verilir.

3. Hızlı Evrimsel Programlama ile Hidrotermal planlama

Popülasyon sayısı I_p olan su deşarjı başlangıç ata deneme vektörü Q_i , ($i=1, 2, \dots, I_p$), her bir elemanın uygun aralığından rastgele seçilir. Başlangıç ve son rezervuar su hacmine ait kısıtları sağlamak için, bağımlı bir su deşarj oranı, q_d J adet zaman aralığı arasından rastgele olarak seçilir. Bağımsız su deşarjları q_j , $j=1,2,3,\dots,J$, $j \neq d$ için $(J-1)$ boyutlu deneme vektörü olarak alınır. Bu çalışmada, daha önce yapılan çalışmalardan [1,14] farklı olarak, programın basitleşmesi için, bağımlı zaman aralığı rastgele seçilmeyip en son zaman aralığındaki su deşarjı bağımlı olarak ($q_d=q_J$) kabul edilmiştir. $Q_i = [q_1, q_2, \dots, q_{J-1}]$ I_p adet bireyden oluşturulan popülasyonun i . bireyini gösteren deneme vektörüdür.

Her bir başlangıç ata deneme vektörünün j . bileşenlerinin seçimi izin verilen sınırlar içerisinde rasgele olarak seçilir:

$$q_j = rand[q_{\min}, q_{\max}] \quad (10)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, (J-1)$$

Burada $rand[q_{\min}, q_{\max}]$, $[q_{\min}, q_{\max}]$ aralığında düzgün rastgele değişkenini gösterir. Bağımlı zaman aralığındaki deşarj oranı Denklem 6'dan, basitlik açısından taşma ihmal edilerek ($s_j = 0$) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$q_d = q_J = V^0 - V^J - \sum_{j=1}^{J-1} q_j + \sum_{j=1}^J r_j \quad (11)$$

Deşarj oranları hidrolik üretimin bir fonksiyonu olduğundan dolayı, P_{Hj} hidrolik üretim değerleri Denklem 3'ten basit cebirsel yöntemlerle hesaplanır. P_{Tj} termik üretimleri, hesaplanan P_{Hj} ve P_{Dj} talep yükünden Denklem 2'deki gibi hesaplanır. P_{Tj} Termik üretim maliyetinden yakıt maliyeti F hesaplanır. Bölüm 2'de Denklem (2-9)'da verilen kısıtlardan herhangi birinin ihlal edilmesi durumunda kısıt ihlali cezası uygulanır. Bu durumda ata popülasyon için uygunluk fonksiyonu (UYG), yakıt maliyetine kısıt ihlali için verilen ceza eklenerek aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$UYG = F + \sum_{z=1}^{N_c} PF_z \quad (12)$$

$$PF_z = \lambda_z \times [IHLAL_z]^2$$

Yeni nesil, Gauss mutasyonu ve Cauchy mutasyonu veya her ikisi de kullanılarak oluşturulabilir. Yapılan çalışmada, Gauss ve Cauchy mutasyonu birlikte kullanılmıştır.

i) Gauss mutasyonu (CEP): Yeni nesil vektörü Q_i' , her bir Q_i ata vektörden, bu vektörün her bir bileşenine 0 ortalama değerli, ve ata deneme çözümünün ölçekli maliyetiyle orantılı olan bir standart sapmaya sahip rastgele Gauss değişkeni eklenerek aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$Q_i', \quad i = 1, 2, \dots, I_p \text{ için}$$

$$q_j' = q_j + \sigma N(0, 1) \quad j = 1, 2, \dots, J-1 \text{ için} \quad (13)$$

Burada, $N(0, 1)$, 0 ortalama değerli ve standart sapması 1 olan normal Gauss değişkenidir.

ii) *Cauchy mutasyonu (FEP)*:

Yeni nesil aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$Q_i', \quad i=1,2,\dots,I_p$$

$$q_j' = q_j + \sigma C_j(0,1) \quad j=1,2,\dots,J-1 \quad \text{ için} \quad (14)$$

Burada, C_j ölçek parametresi $t=1$ olan, 0'da ortalan ve j 'nin her bir değeri için yeniden üretilen Cauchy rastgele değişkenidir.

iii) *Her bir ata vektörden Gauss ve Cauchy mutasyonu ile üretilen iki yeni nesilden en iyisinin seçilmesiyle (IFEP):* q_j ata vektöründen; q_{1j} Gauss mutasyonu ile, q_{2j}

Cauchy mutasyonu ile aşağıdaki gibi üretilsin:

$$q_{1j} = q_j + \sigma N(0,1)$$

$$q_{2j} = q_j + \sigma C_j(0,1) \quad j=1,2,\dots,J-1 \quad \text{ için} \quad (15)$$

Yeni nesil vektörlerinin amaç fonksiyonlarının değerleri hesaplanmış, küçükten büyüğe sıralanmış ve en iyi bireyler sonraki nesil için ayrılmıştır. σ standart sapmaları ata deneme vektörünün etrafında oluşturulan yeni neslin aralığını belirler. Ölçeklenmiş maliyet için standart sapma ifadesi aşağıdaki gibidir:

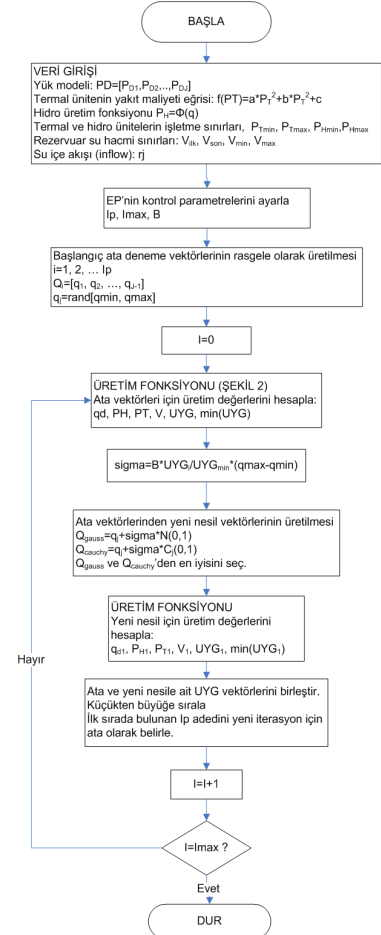
$$\sigma = \beta \times \frac{UYG_i}{UYG_{\min}} (q_{\max} - q_{\min}) \quad (16)$$

$UYG_{\min}$ uygunluk fonksiyonunun I_p deneme çözümleri arasındaki minimum değeridir. β ölçekleme faktörüdür. β ölçekleme faktörü daha önceki çalışmalarda sabit bir katsayı olarak alınmıştı [1,14]. β ölçekleme faktörü Sinha ve diğerleri [1] tarafından 0,01 alınmıştı. Bu çalışmada, β değeri değişken ve iterasyon ilerledikçe azalan özelliktedir. Bu sayede, rastgele olarak belirlenen başlangıç ata popülasyonunun uygunluk fonksiyonunun değeri çok büyük olduğunda dahi, optimum çözüme hızla ulaşılmaktadır.

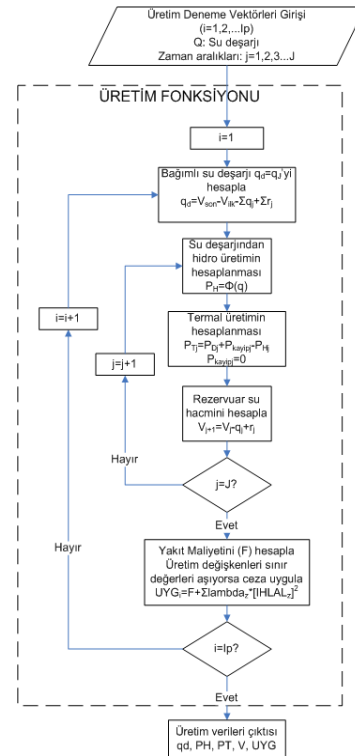
Yeni nesil popülasyonun üretiminden sonra, rekabet ve seçim süreci ile, yeni üretim için hangi çözümlerin alıkonulacağı (iterasyona devam edeceği), hangilerinin eleneceği belirlenir. deneme vektörü Q_i $i=1,2,\dots,I_p$ için buna karşılık gelen yeni nesil vektörü Q_i' hayatta kalmak için birbiriyle rekabet ederler. Yeni nesillerin üretilmesi şeklinde olan iterasyon süreci, rekabet havuzundaki minimum fonksiyon değerlerinin seçilmesi veya çözümde kayda değer bir değişiklik olmaması durumunda sonlanır. Ayrıca belirlenen bir maksimum iterasyon sayısına erişildiğinde de iterasyon sonlandırılabilir. Yapılan çalışmada, maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında durma gerçekleşmiştir.

4. EP Algoritması

Geliştirilen EP algoritmasının akış diyagramı Şekil 1'de görülmektedir. EP programı, ana program ve üretim fonksiyonundan oluşmaktadır. Ana programda, başlangıç ata deneme vektörü üretilir ve belirlenen iterasyon sayısınca, ata vektöründen yeni nesil vektörleri üretilir. Şekil 2'de görülen üretim fonksiyonu ile, ana program içerisinde popülasyonların q_d , UYG , P_H , P_T ve V gibi üretim değişkenleri hesaplanır.



Şekil 1. EP algoritmasının akış diyagramı



Şekil 2. Üretim fonksiyonu

5. Sayısal Testler

Geliştirilen EP algoritmasının performansı önceki çalışmalarda [1, 2, 14] ortak kullanılan bir referans test sisteminde doğrulanmıştır. Yük talebi, Tablo 1’de verilmiştir.

Eşdeğer termik ünite için yakıt maliyeti fonksiyonu :

$$f(P_T) = 0,00184P_T^2 + 9,2P_T + 575 \text{ \$ / h}$$

Burada, $150 \leq P_T \leq 1500 \text{ MW}$ ’tır.

Hidrolik ünitenin su deşarj oranı aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$0 < P_H < 1000 \text{ MW iken: } q = 330 + 4,97P_H \text{ acre - ft / h}^1$$

$$1000 < P_H < 1100 \text{ MW iken:}$$

$$5300 + 12(P_H - 1000) + 0,05(P_H - 1000)^2 \text{ acre - ft / h}$$

Rezervuardaki su hacminin başlangıç ve son değerleri sırasıyla 100000 ve 60000 acre-ft’tir. Rezervuardaki su hacminin her bir zaman aralığındaki minimum ve maksimum değerleri sırasıyla, 60000 ve 120000 acre-ft’tir. Su içe akışı (inflow) 2000 acre-ft/h’tir. Taşma ihmal edilmiştir. Ayrıca su ünitesinden yüke kadar olan elektriksel kayıplar ihmal edilmiştir.

Tablo 1. Test sistemi için yük talebi

Zaman Aralığı No	Gün	Zaman Aralığı	Yük Talebi (MW)
1	1	12:00 -24:00	1200
2		24:00-12:00	1500
3	2	12:00 -24:00	1100
4		24:00-12:00	1800
5	3	12:00 -24:00	950
6		24:00-12:00	1300

6. Simulasyon Sonuçları

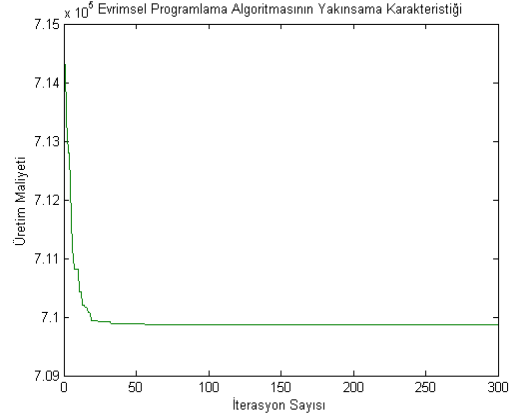
Programlar MATLAB’da hazırlanmış ve komut satırında çalıştırılmıştır. EP algoritmasının yakınsama karakteristiği Şekil 3’te verilmiştir. Sinha ve diğerleri [1] tarafından yapılan çalışmayla karşılaştırma yapabilmek için iterasyona 7.15×10^5 değerine ulaşıldığında başlanmıştır. Test sistemine ait hidrotermal planlama problemi, geliştirilen program ile çözülerek Tablo 2’de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Optimum maliyet 709862,05 \$ olarak elde edilmiştir.

Tablo 3’te yapılan çalışma (RIFEP) ile birlikte, mevcut IFEP, FEP ve CEP algoritmaları ile hazırlanan programların 100 kez çalıştırılması sonucu elde edilen istatistiksel test sonuçları verilmiştir. Geliştirilen program ile daha düşük ortalama maliyet, daha düşük maksimum maliyet elde edilmiştir. Tablo 4’te HP probleminin EP, SA [7], GA[1] ve GS [2] yöntemleriyle çözümünden elde edilen maliyetler karşılaştırılmıştır. Optimum yakıt maliyeti, EP ile elde edilmiştir. Tablo 5’de ise mevcut EP algoritmaları ile, yapılan çalışmanın yakınsama oranları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada, sonuca daha hızlı yakınsama sağlanmıştır.

¹ Acre-foot yaygın olarak kullanılan bir su hacim birimidir. 1 acre’lik alanı kaplayan 1 ft derinliğe sahip su hacmidir (43,560 ft³). 1 acre-ft $1,2335 \times 10^3 \text{ m}^3$ ’e eşittir.

Tablo 2. Elde edilen hidrotermal plan

Zaman Aralığı	Su Deşarjı (acre-ft/h)	Hacim (acre-ft)	Hidrolik Üretim (MW)	Termik Üretim (MW)	Maliyet (\$)
1	1838,82	101934,20	303,58	896,42	709862,05
2	3330,66	85966,22	603,76	896,24	
3	1342,40	93857,38	203,70	896,30	
4	4821,45	60000,00	903,71	896,29	
5	1130,56	70433,27	161,08	788,92	
6	2869,44	60000,00	510,95	789,05	



Şekil 3. Geliştirilen algoritmanın yakınsama karakteristiği

Tablo 3. Programların 100 kez çalıştırılması sonucu elde edilen ortalama, minimum ve maksimum yakıt maliyetleri

Yöntem	Ortalama Maliyet	Maksimum Maliyet	Minimum Maliyet
RIFEP (Yapılan çalışma)	709862,10	792862,29	792862,05
IFEP [1]	709862,22	709862,98	709862,05
FEP[1]	709864,59	709931,17	709862,05
CEP [1]	709862,65	709868,47	709862,05

Tablo 4. EP, SA, GA ve GS ile elde edilen sonuçlar

Yöntem	Yakıt Maliyeti
EP (Yapılan çalışma)	709862,05
SA [7]	709874,36
GA [1]	709863,56
GS [2]	709877,38

Tablo 5. Yakınsama oranları²

Yöntem	50 İterasyon	100 iterasyon	150 iterasyon
CEP [1]	54,05	43,19	30,88
FEP [1]	92,15	47,16	31,64
IFEP [1]	94,92	47,49	31,66
RIFEP (Yapılan Çalışma)	102,29	51,34	34,25

² Yakınsama oranı, başlangıç deneme çözümü ile belirli sayıda iterasyon sonunda elde edilen maliyetler arasındaki farkın iterasyon sayısına oranıdır.

7. Sonuç

Yapılan çalışma ile bir hidrolik ve termik ünitelerden oluşan bir santralde, talep edilen yükün, su kaynakları en verimli şekilde değerlendirilerek, termik ve hidrolik üniteler tarafından minimum yakıt maliyetiyle karşılanması sağlanmıştır. Su kaynaklarının verimli olarak kullanılması, termik ünitelerin daha az devrede kalmasını sağlayarak yakıt maliyetini minimize etmiştir. Bu durumda, sera gazı salınımı da en aza inmektedir. Hidrotermal planlama probleminin çözümünde evrimsel programlama yöntemi kullanılmıştır. Evrimsel programlama yönteminin literatürde kullanılan şeklinde değişiklikler yapılarak, yakınsama ve başarımları oranı bakımından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada daha önceki çalışmalardaki [1,14] rakip seçimi ve olasılıksal rekabet yerine her bir deneme vektörünün üretim maliyeti hesaplanmış, maliyetler küçükten büyüğe sıralanmış, ilk sıradaki I_p adet çözüm sonraki nesil için yeni ata vektörü olarak seçilmiştir. Olasılıksal rekabet yerine rastgele olmayan rekabetin kullanılması, başlangıç deneme vektörünün değeri ne olursa olsun, optimum sonuca hızla yakınsamayı sağlamaktadır. β ölçekleme faktörü daha önceki çalışmalarda sabit bir katsayı olarak alınmıştı [1,14]. β değerinin sabit alındığı durumda, iterasyon ilerledikçe, büyük bir β değeri ile önceki iterasyonlara göre daha iyi bir popülasyonun üretilmesi pek mümkün olmamaktadır. Bu çalışmada, β değeri değişken ve iterasyon ilerledikçe azalan özelliktedir. Bu sayede, rastgele olarak belirlenen başlangıç ata popülasyonunun uygunluk fonksiyonunun değeri çok büyük olduğunda dahi, optimum çözüme hızla ulaşılmaktadır.

8. Kaynaklar

- [1] Nidul Sinha, R. Chakrabarti, P.K. Chattopadhyay, Fast Evolutionary programming techniques for short-term hydrothermal scheduling. Electric Power System Research 66 (2003) 97-103.
- [2] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation and Control. 1996 ed. New York: John Wiley & Sons, 1984
- [3] K. Kirchmayer, Economic Control of Interconnected Systems, Wiley, New York, 1959.
- [4] O. Nilson, D. Sjelvgren, Mixed integer programming applied to short-term planning of a hydro-thermal system, Proceedings of the 1995 IEEE PICA, Salt Lake City, UT, USA, May 1995, pp. 158-163.
- [5] L. Engles, R.E. Larson, J. Peschon, K.N. Stanton, Dynamic programming applied to hydro and thermal generation scheduling in IEEE tutorial course text, 76CH1107-2-PWR, IEEE, New York, 1976.
- [6] N.R. Jimenez, A.J. Conejo, Short-term hydrothermal coordination by Lagrangian relaxation: solution to the dual problem, in IEEE-PES Winter Meeting, Orlando, FL, USA, 1998, paper PE-333 PWR-0-12-1997.
- [7] K.P. Wong, Y.W. Wong, Short-term hydrothermal scheduling, part-I: simulated annealing approach, IEE Proc. Part-C 141 (5) (1994) 497-501.
- [8] Y.-G. Wu, C.-Y. Ho, D.-Y. Wang, A diploid genetic approach to short-term scheduling of hydrothermal system, IEEE Trans. Power Syst. 15 (4) (2000) 1268-1274.

- [9] T. Back, H.-P. Schwefel, An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization, Evol. Comput. 1 (1) (1993) 1-23.
- [10] D.B. Fogel, An introduction to simulated evolutionary optimization, IEEE Trans. Neural Netw. 5 (1) (1994) 3-14.
- [11] X. Yao, Y. Liu, G. Lin, Evolutionary programming made faster, IEEE Trans. Evol. Comput. 3 (2) (1999) 82-102.
- [12] D.B. Fogel, A comparison of evolutionary programming and genetic algorithms on selected constrained optimization problems, Simulation, June, (1995) 397-404.
- [13] P.-C. Yang, H.-T. Yang, C.-L. Huang, Scheduling short-term hydrothermal generation using evolutionary programming techniques, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. 143 (4) (1996) 371-376.
- [14] P.K. Hota, R. Chakrabarti, P.K. Chattopadhyay, Short-term hydrothermal scheduling through evolutionary programming technique, Electric Power Syst. Res. 52 (2) (1999) 189-196.
- [15] N. Sinha, R. Chakrabarti, P.K. Chattopadhyay, Evolutionary programming techniques for economic load dispatch, IEEE Trans. Evol. Comput. 7 (1) (2003) 83-94.
- [16] D.B. Fogel, Evolutionary computation: Toward a new Philosophy of Machine Intelligence, IEE Press, Piscataway, NJ, 1995.
- [17] L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh, Artificial Intelligence Through Simulated Evolution, Wiley, NY, 1966.
- [18] X. Yao, Y. Liu, Fast Evolutionary Programming, Proceedings of the Fifth Annual Conference on Evolutionary Programming, The MIT Press, Cambridge, MA, 1996, pp. 451-460.
- [19] K. Chellapilla, D.B. Fogel, Two new mutation operators for enhanced search and optimization in evolutionary programming, SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineers and Instrumentation Conference, 3165: Applications of Soft Computing, SPIE Press, pp. 260-269.

Ek A Sembol Listesi

F	toplam üretim maliyeti
UYG_i	i. bireyin uygunluk değeri
UYG_{bas}	İterasyona başlama değeri ($I=0$)
$f_j(P_{Tj})$	P_{Tj} için üretim maliyeti (termik ünitenin j. zaman aralığındaki yakıt maliyeti)
I_p	Popülasyondaki birey sayısı
J	Programlanan zaman aralığı sayısı
P_{Dj}	j. zaman aralığındaki yük talebi
PFz	z. kısıta ilişkin ceza
P_{Hj}	Hidrolik ünitenin j. zaman aralığındaki enerji üretimi
P_{Tj}	Termik ünitenin j. zaman aralığındaki enerji üretimi
$P_{Kayıpj}$	Sistemin j. zaman aralığındaki iletim kayıpları
q_j	hidrolik ünitenin j. zaman aralığındaki su deşarjı
r_j	hidrolik ünitenin rezervuarına j. zaman aralığındaki içe akış oranı
s_j	rezervuardan j. zaman aralığındaki taşma
$IHLAL_z$	Kısıt z'nin ihlal miktarı
V_j	Hidrolik ünitenin j. zaman aralığında rezervuardaki su hacmi
V_{ilk}	hidrolik ünitenin başlangıç rezervuar su hacmi
V_{son}	hidrolik ünitenin rezervuar su hacminin son durumu