σ Journal of Engineering and Natural Sciences
Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi
**Sigma 31, 214-221, 2013**

**Research Article / Araştırma Makalesi**

# SINGLE MACHINE SCHEDULING PROBLEMS WITH TIME-DEPENDENT LEARNING EFFECTS

**Tamer EREN***

*Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, KIRIKKALE*

**Received/Geliş: 16.03.2012 Revised/Düzeltme: 25.05.2012 Accepted/Kabul: 20.06.2012**

**ABSTRACT**

In traditional scheduling problems, most literature assumes that the processing time of a job is fixed. However, there are many situations where the processing time of a job depends on the starting time or the position of the job in a sequence. In such situations, the actual processing time of a job may be more or less than its normal processing time if it is scheduled later. This phenomenon is known as the ‘‘learning effect’’. In this study, we introduce a time-dependent learning effect into a single-machine scheduling problems. We consider the following objective functions: (i) maximum tardiness, (ii) number of tardy jobs (iii) maximum tardiness subject to the number of tardy jobs (iv) number of tardy jobs subject to maximum tardiness. A non-linear programming model are developed for problems which belongs to NP-hard class. Also the model is tested on an example. According to the best of our knowledge, no works exists on the optimal solutions for four problems were examined.
**Keywords:** Scheduling, maximum tardiness, number of tardy jobs, time-dependent learning effect, non-linear programming model.

## ZAMANA-BAĞIMLI ÖĞRENME ETKİLİ TEK MAKİNELİ ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ

**ÖZET**

Çizelgeleme literatürünün çoğunda işlerin işlem zamanları sabit kabul edilmiştir. Ancak işlerin işlem zamanlarında, başlama zamanı veya pozisyonuna bağlı olarak azalma görülebilmekterdir. Bu olgu literatürde öğrenme ekisi olarak bilinmektedir. Bu çalışmada zamana-bağımlı öğrenme etkili tek makineli çizelgeleme problemleri ele alınacaktır. Ele alınan problemlerin amaç fonksiyonları: (i) maksimum gecikme, (ii) geciken iş sayısı (iii) geciken iş sayısı kısıtı altında maksimum gecikme (iv) maksimum gecikme kısıtı altında geciken iş sayısı. NP-zor yapıda olan problemleri çözmek için doğrusal-olmayan programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model bir örnek üzerinde uygulanmıştır. İncelememize göre bu çalışma ile ele alınan dört problem için ilk defa optimal çözümler bulunmuştur.
**Anahtar Sözcükler:** Çizelgeleme, maksimum gecikme, geciken iş sayısı, zamana-bağımlı öğrenme etkisi, doğrusal olmayan programlama modeli.

## 1. GİRİŞ

Çizelgeleme literatürüne bakıldığında problemler genellikle, işlem zamanları sabit kabul edilme varsayımına dayanmaktadır. Halbuki işin işlem zamanı işin başlama zamanına veya işin pozisyonuna bağlı olarak azalabilmektedir. Bu olgu literatürde öğrenme etkisi olarak

* teren@kku.edu.tr, tel: (318) 357 3576 / 1011

bilinmektedir. Literatürde öğrenme etkisi zamana-bağımlı ve pozisyona bağımlı olmak üzere iki grupta ele alınmıştır. Birinci grupta işin işlem zamanı işin başlama zamanına bağımlı olarak azalma varsayımına dayanırken, diğerinde ise pozisyonuna göre işlem zamanları azaldığı kabul edilmiştir[1]. Bu çalışmada da ilk gruba giren tek makineli dört çizelgeleme problemi, zamana-bağımlı öğrenme etkili durumda ele alınmıştır.

Öğrenme etkisi ile ilgili ilk çalışma Biskup [2] tarafından tek makineli çizelgeleme problemleri için yapılmıştır. Biskup [2] çalışmasında toplam akış zamanını, teslim tarihinden sapma problemlerini incelemiştir. Moshiev [3] yaptığı çalışmada maksimum tamamlanma zamanının yine SPT (en kısa işlem zamanı) kuralı ile çözüldüğünü göstermiştir. Araştırmacı çok ölçütlü iki problemi ele almıştır. Bunlardan birincisi tamamlanma zamanı ve tamamlanma zamanınından sapmayı enküçükleme, diğeri ise teslim tarihi atama problemidir. Bu iki problemin atama modeli ile $O(n^3)$ zamanda çözüldüğünü göstermiştir. Ayrıca Moshiev [3] klasik durumda (öğrenme etkisiz) eniyi çözümü bulan yöntemlerin, öğrenme etkili olduğunda maksimum gecikme için EDD ve minimum geciken iş sayısı problemi için Moore [4] algoritması ile çözülmesi durumunda eniyi çözümü garanti etmediğini göstermiştir. Moshiev ve Sidney [5] yaptıkları çalışmada ise tek makineli çizelgelemede ortak teslim tarihli geciken iş sayısını minimize etmek için atama problemi ile $O(n^3 \log n)$ zamanda çözmüşlerdir. Maksimum gecikme problemini ise Zhao vd. [6] ve Wu vd. [7] özel durumlarda $O(n \log n)$ zamanda çözüldüğünü göstermişlerdir. Eren ve Güner [8] ise yaptıkları çalışmada toplam gecikme problemini ele almışlar ve problem için matematiksel programlama modeli önermişlerdir. Ayrıca büyük boyutlu problemler için tabu arama ve tavlama benzetimi sezgiselleri geliştirmişlerdir. Eren [9] yaptığı çalışmada hazırlık ve taşıma zamanlarının öğrenme etkili olduğu tek makineli çizelgelemede geciken iş sayısını ortak teslim tarihi durumunda minimize etmek için atamam modeli ile polinom zamanda çözülebileceğini göstermiştir. Bahsedilen tüm çalışmalar pozisyona bağımlı öğrenme etkisi ile yapılmıştır. Zamana-bağımlı öğrenme etkisi ile ilgili ilk çalışma ise Kuo ve Yang [10,11] tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında maksimum tamamlanma zamanı ve toplam tamamlanma zamanını enküçükleme probleminin SPT kuralıyla eniyi çözümlerin bulunabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca Kuo ve Yang [12] yaptıkları diğer bir çalışmada ise tek makineli grup çizelgeleme probleminde maksimum tamamlanma zamanı ve toplam tamamlanma zamanı problemlerinin yine SPT kuralı ile çözülebileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmada Kuo ve Yang [10]'ın modeli kullanılmıştır. Shantikumar [13], Nelson vd. [14], Lung [15], Liao vd. [16], Gupta ve Ramnarayanan [17], Gupta vd. [18] yaptıkları çalışmalarda tek makineli çizelgeleme problemlerinde maksimum gecikme ve geciken iş sayısı problemlerini klasik durumda (öğrenme etkisiz) optimal çözümlerini bulmuşlardır. Eren [19] öğrenme etkili tek makineli 4 çizelgeleme problemini ele almıştır. Ele alınana problemler; toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı, maksimum gecikme, geciken iş sayısı ve ağırlık geciken iş sayısıdır. Problemleri çözmek için doğrusal olmayan programlama modelleri önerilmiştir. Eren [20,21] çalışmasında logaritmik işlem zaman tabanlı öğrenme etkili tek makineli çizelgeleme probleminde toplam erken bitirme ve toplam gecikmeyi [20] bir diğer çalışmasında aynı öğrenme fonksiyonu ile geciken iş sayısını [21] ele almıştır. Ayrıca Eren [22] zamana-bağımlı öğrenme etkili çizelgeleme probleminde geciken iş sayısı ve gecikme aralığı ölçütünün ele almış ilk olarak geciken iş sayısı kısıtı altında gecikme aralığı problemlerini incelemiştir.

Bu çalışmada zamana-bağımlı öğrenme etkili problemler ele alınmıştır. Ele alınan problemler;

(i) maksimum gecikme,
(ii) geciken iş sayısı
(iii) geciken iş sayısı kısıtı altında maksimum gecikme
(iv) maksimum gecikme kısıtı altında geciken iş sayısıdır.

Problemleri çözmek için doğrusal olmayan programlama modeli geliştirilmiş ve geliştirilen model örnekle gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada klasik durumda maksimum gecikmeyi optimal çözen EDD (en kısa işlem zamanı) kuralı ve geciken iş sayısını minimize eden Moore algoritmasının [4], zamana-bağımlı öğrenme etkili durumda optimal çözümü garanti etmediğide gösterilmiştir. Bu çalışmada ele alınan problemler literatürde ilk defa ele alınmış ve çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ele alınan problemler tanımlanacaktır. Üçüncü bölümde ise problem için önerilen doğrusal olmayan programlama modelleri verilecektir. Ayrıca verilecek model örnek üzerinde gösterilecektir. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları verilecek ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulacaktır.

## 2. PROBLEMİN TANIMLANMASI

Pozisyona bağlı öğrenme etkisinde işlerin işlem zamanları değil, tekrar sayısı dikkate alınmıştır. Eğer öğrenme etkisi, işlerin işlem zamanlarına bağlı ise zamana-bağımlı öğrenme etkisi ile ifade edilmektedir. Kuo ve Yang [10] tarafından model şu şekilde tanımlanmıştır: Tek makineli *n* işli çizelgeleme problemi ele alınmıştır. $p_j$, *j* işinin işlem zamanını, $p_{jr}$ ise $p_j$ işinin *r*. posizyondaki işlem zamanını göstermektedir ve $p_{jr} = p_j\left(1 + p_{[1]} + p_{[2]} \ldots + p_{[r-1]}\right)^a = p_j\left(1 + \sum_{l=1}^{r-1} p_{[l]}\right)^a$ dir. Öğrenme indeksi $a < 0$ dır ve öğrenme oranının iki tabanına göre logaritmasıdır. $d_j$ ve $C_j$ ise *j* işinin teslim tarihi ve tamamlanma zamanıdır. Maksimum gecikme $T_{\max} = \max_{j=1}^{n}\left\{C_j - d_j ; 0\right\}$ şeklinde ifade edilmektedir. $U_r$ *r*. posizyondaki iş gecikmişse 1, gecikmediyse 0 olduğunu göstermektedir. Toplam geciken iş sayısı, $n_T = \sum_{r=1}^{n} U_r$ ile tanımlanmaktadır. Tek makinede dört problem ele alınmıştır: Birinci problem, maksimum gecikme $\left(1/ p_{jr} = p_j\left(1 + \sum_{l=1}^{r-1} p_{[l]}\right)^a / T_{\max}\right)$, ikinci problem geciken iş sayısını $\left(1/ p_{jr} = p_j\left(1 + \sum_{l=1}^{r-1} p_{[l]}\right)^a / n_T\right)$, üçüncü problem, geciken iş sayısı kısıtı altında maksimum gecikme $\left(1/ p_{jr} = p_j\left(1 + \sum_{l=1}^{r-1} p_{[l]}\right)^a / T_{\max} : n_T\right)$, dördüncü problem maksimum gecikme kısıtı altında geciken iş sayısını $\left(1/ p_{jr} = p_j\left(1 + \sum_{l=1}^{r-1} p_{[l]}\right)^a / n_T : T_{\max}\right)$ minimize etme problemleridir.

## 3. DOĞRUSAL OLMAYAN MATEMATİKSEL PROGRAMLAMA MODELLERİ

Önerilen modellerde, parametreler, karar değişkenleri ve matematiksel model aşağıda verilmiştir.

### 3.1. Parametreler

| | | |
|---|---|---|
| $j$: | iş indeksi | $j = 1,2,...,n$ |
| $p_j$ : | $j$ işinin işlem zamanı | $j = 1,2,...,n$ |
| $d_j$ : | $j$ işinin teslim tarihi | $j = 1,2,...,n$ |
| $a$: | öğrenme indeksi | $a < 0$ |

### 3.2. Karar Değişkenleri

| | | |
|---|---|---|
| $Z_{jr}$ : | Eğer $j$ işi $r$. pozisyonda işlem görmek için çizelgelenmişse 1, aksi halde 0, $j = 1,2,...,n$ | $r = 1,2,...,n$ |
| $U_r$ : | $r$. pozisyondaki iş gecikiyorsa 1, aksi halde 0, | $r = 1,2,...,n$ |
| $p_{[r]}$: | $r$. pozisyondaki işin işlem zamanı | $r = 1,2,...,n$ |
| $d_{[r]}$: | $r$. pozisyondaki işin teslim tarihi | $r = 1,2,...,n$ |
| $C_r$ : | $r$. pozisyondaki işin tamamlanma zamanı | $r = 1,2,...,n$ |
| $T_{\max}$ : | maksimum gecikme | |

### 3.3. Problem 1: Maksimum Gecikmeyi Minimize Eden Doğrusal Olmayan Programlama Modeli

Maksimum gecikme problemi klasik durumda EDD (en kısa işlem zamanı) kuralı ile optimal çözümü bulunabilirken zamana-bağımlı öğrenme etkili durumda ise optimal çözümünü EDD kuralı garanti etmemektedir.

**Sayısal örnek 1:**

Tek makinede 4 işli bir problemin işlem zamanları ve teslim tarihleri saat olarak Çizelge 1'de verilmiştir. Zaman-bağımlı öğrenme etkisi $a = -0.50$ değerine göre EDD kuralı ile maksimum gecikme 1-2-3-4 sıraması ile 4.26 saat olurken, optimal değer 3-1-2-4 sıralaması ile 2.80 saat bulunmuştur. Örnekte de görüldüğü gibi EDD kuralı zamana-bağımlı öğrenme etkili durumda optimal çözümü garanti etmemektedir.

**Çizelge 1.** Sayısal örnek-1 verileri

| $j$ | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| $p_j$ | 7 | 8 | 1 | 9 |
| $d_j$ | 5 | 6 | 7 | 8 |

Problemin optimal çözümünü bulmak için aşağıdaki matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Model; $6n$ kısıtlı, $n^2$ , 0-1 değişken sayısı ve $3n+1$ değişkenlidir.

Amaç fonksiyonu:

$$Min\ T_{max} \tag{1}$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^{n} Z_{jr} = 1 \qquad r = 1,2,...,n \tag{2}$$

$$\sum_{r=1}^{n} Z_{jr} = 1 \qquad j = 1,2,...,n \qquad (3)$$

$$p_{[r]} = \sum_{j=1}^{n} Z_{jr} p_j \qquad r = 1,2,...,n \qquad (4)$$

$$d_{[r]} = \sum_{j=1}^{n} Z_{jr} d_j \qquad r = 1,2,...,n \qquad (5)$$

$$C_r \geq C_{r-1} + p_{[r]}(1 + \sum_{l=1}^{r-1} p_{[l]})^a \qquad r = 1,2,...,n \qquad (6)$$

$$T_{\max} \geq C_r - d_{[r]} \qquad r = 1,2,...,n \qquad (7)$$

$Z_{jr}$: 0 $veya$ 1 $C_0 = 0$ ve diğerleri negatif olmayan değişkenler

$j = 1,2,...,n.$ $r = 1,2,...,n.$

Kısıt (2), *r*. pozisyona sadece bir tek işin atanmasını, Kısıt (3), her bir işin sadece bir kez çizelgelenmesini ifade etmektedir. Kısıt (4) ve Kısıt (5) sırasıyla *r*. pozisyondaki işin işlem zamanı ve teslim tarihini göstermektedir. Kısıt (6), *r*. pozisyondaki işin tamamlanma zamanının bir önceki işin tamamlanma zamanı ve *r*. pozisyondaki işin işlem zamanından büyük veya eşit olmasını göstermektedir. *r*. pozisyondaki işin gecikmesinin, tamamlanma zamanı ve teslim tarihi arasındaki farktan büyük veya eşit olduğunu da Kısıt (7) tanımlamaktadır.

### 3.4. Problem 2: Geciken İş Sayısını Minimize Eden Doğrusal Olmayan Programlama Modeli

Geciken iş sayısı problemi klasik durumda Moore algoritması [4] ile optimal çözümü bulunabilirken zamana-bağımlı öğrenme etkili durumda ise optimal çözümünü garanti etmediği Sayısal örnek-2'de gösterilmektedir.

**Sayısal örnek 2:**

Tek makinede 4 işli bir problemin işlem zamanları ve teslim tarihleri saat olarak Çizelge 2'de verilmiştir. Zaman-bağımlı öğrenme etkisi $a = -0.50$ değerine göre Moore algoritması [4] ile geciken iş sayısı 1-3-4-2 sıraması ile 1 olurken, optimal değer 4-1-2-3, 4-1-3-2, 4-2-1-3, 4-3-1-2 sıralamaları ile 0 bulunmuştur. Örnekte de görüldüğü gibi Moore algortiması [4] zamana-bağımlı öğrenme etkili durumda optimal çözümü garanti etmemektedir.

**Çizelge 2.** Sayısal örnek-2 verileri

| $j$ | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| $p_j$ | 50 | 75 | 100 | 25 |
| $d_j$ | 51 | 60 | 65 | 67 |

Problemin optimal çözümünü bulmak için aşağıdaki matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Model; 6*n* kısıtlı, $n^2$ , 0-1 değişken sayısı ve $4n$ değişkenlidir.

Model 2'de Kısıt (2)-(6)'in yanı sıra, işin gecikme olup olmamasını ifade eden Kısıt (9) eklenmiştir.

Amaç fonksiyonu:

$Min\ \sum_{r=1}^{n} U_r$ (8)

Kısıtlar:
Kısıt (2)-(6)

$C_r - d_r \leq MU_r$ $r = 1,2,...,n.$ (9)

$U_r$: 0 $veya$ 1, $C_0 = 0$ ve diğerleri negatif olmayan değişkenler

$j = 1,2,...,n.$ $r = 1,2,...,n.$

### 3.5. Problem 3: Geciken İş Sayısı Kısıtı Altında Maksimum Gecikmeyi Minimize Eden Doğrusal Olmayan Programlama Modeli

Model 2 çözüldükten sonra bulunan $U_r = k$ değeri probleme kısıt (10) olarak eklenecektir.

Amaç fonksiyonu:
Denklem (1)
Kısıtlar:
Kısıt (2)-(6)
Kısıt (9)

$U_r = k$ (10)

$Z_{jr}$ $ve$ $U_r$: 0 $veya$ 1, $C_0 = 0$ ve diğerleri negatif olmayan değişkenler

$j = 1,2,...,n.$ $r = 1,2,...,n.$

### 3.6. Problem 4: Maksimum Gecikme Kısıtı Altında Geciken İş Sayısını Minimize Eden Doğrusal Olmayan Programlama Modeli

Model 1 çözüldükten sonra bulunan $T_{max} = l$ değeri probleme kısıt (11) olarak eklenecektir.

Amaç fonksiyonu:
Denklem (8)
Kısıtlar:
Kısıt (2)-(6)
Kısıt (9)

$T_{max} = l$ (11)

$Z_{jr}$ $ve$ $U_r$: 0 $veya$ 1, $C_0 = 0$ ve diğerleri negatif olmayan değişkenler

$j = 1,2,...,n.$ $r = 1,2,...,n.$

**Sayısal Örnek-3:**

Tek makinede 10 işli bir problemin işlem zamanları ve teslim tarihleri saat olarak Çizelge 3'de verilmiştir. Zaman-bağımlı öğrenme etkisi $a = -0.50$ değerine göre ele alınan tüm problemler için optimal değer ve sıralama bulunacaktır.

**Çizelge 3.** Sayısal örnek-3 verileri

| $j$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $p_j$ | 8 | 8 | 3 | 1 | 6 | 1 | 8 | 8 | 7 | 5 |
| $d_j$ | 7 | 11 | 18 | 19 | 13 | 14 | 2 | 12 | 7 | 12 |

**Çözüm:**

Problem GAMS 22.5 [23] paket programı ile çözüldüğünde bulunan sonuçlar Çizelge 4'de verilmiştir.

**Çizelge 4.** Sayısal örnek-3'ün en iyi çözüm sonuçları

| Problem | Optimal sıralama | Amaç fonksiyonu | |
|---|---|---|---|
| | | $T_{max}$ | $n_T$ |
| Problem-1 | 4-6-7-9-10-1-5-2-8-3 | 4.33 | |
| Problem-2 | 3-6-9-10-2-4-8-5-7-1 | | 2 |
| Problem-3 | 4-6-3-9-10-2-8-5-7-1 | 11.43 | 2 |
| Problem-4 | 6-4-7-10-9-1-3-5-8-2 | 4.33 | 5 |

Çizelge 4'de görüldüğü gibi Problem 1'de maksimum gecikme değeri $T_{max} = 4.33$ saat bulunurken, Problem 2'de geciken iş sayısı $n_T = 2$ bulunmuştur. Problem 3'de geciken iş sayısı $n_T = 2$ kısıtı altında maksimum gecikme $T_{max} = 11.43$ bulunurken, problem 4'de maksimum gecikme $T_{max} = 4.33$ kısıtı altında geciken iş sayısı $n_T = 5$ bulunmuştur.

## 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada zamana-bağımlı öğrenme etkili tek makineli çizelgelemede 4 tane problem ele alınmıştır. Bu problemler (i) maksimum gecikme, (ii) geciken iş sayısı (iii) geciken iş sayısı kısıtı altında maksimum gecikme (iv) maksimum gecikme kısıtı altında geciken iş sayısıdır. NP-zor yapıda olan problemleri çözmek için doğrusal-olmayan programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model bir örnek üzerinde uygulanmıştır.

Bundan sonraki çalışmalarda büyük boyutlu problemleri çözmek için sezgisel yaklaşımlar geliştirilebileceği gibi, çok makineli durumlarda dikkate alınabilir.

## REFERENCES / KAYNAKLAR

[1] Biskup D., "A state-of-the-art review on scheduling with learning effects", European Journal of Operational Research, 188(2): 315-329, 2008.

[2] Biskup D., "Single-machine scheduling with learning considerations", European Journal of Operational Research, 115: 173-178, 1999.

[3] Mosheiov G., "Scheduling problems with a learning effect", European Journal of Operational Research, 132: 687-693, 2001.

[4] Moore J.M., "An n job, one machine sequencing algorithm for minimizing the number of tardy jobs", Management Science, 15: 102–109, 1968.

[5] Mosheiov G., Sidney J.B., "Note on scheduling with general learning curves to minimize the number of tardy jobs", Journal of the Operational Research Society, 56: 110–112, 2005.

[6] Wu C.C., Lee W.C., Chen T., Heuristic algorithms for solving the maximum lateness scheduling problem with learning considerations, Computers & Industrial Engineering, 52: 124-132, 2007.

[7] Zhao C.L., Zhang Q.L., Tang H.Y., "Machine scheduling problems with learning effects", Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, Series A: Mathematical Analysis, 11: 741-750, 2004.

[8] Eren T., Güner E., "Minimizing total tardiness in a scheduling problem with a learning effect", Applied Mathematical Modelling, 31: 1351-1361, 2007.

[9] Eren T., “Hazırlık ve taşıma zamanlarının öğrenme etkili olduğu tek makineli çizelgeleme problemi: Geciken iş sayısı minimizasyonu”, International Journal of Engineering Research and Development, 6: 34-36, 2011.

[10] Kuo W.H., Yang D.L., “Minimizing the total completion time in a single machine scheduling problem with a time-dependent learning effect”, European Journal of Operational Research, 174: 1184-1190, 2006.

[11] Kuo W.H., Yang D.L., “Minimizing the makespan in a single machine scheduling problem with a time-based learning effec”, Information Processing Letters, 97: 64–67, 2006.

[12] Kuo W.H., Yang D.L., “Single-machine group scheduling with a time dependent learning effect”, Computers and Operations Research, 33: 2099-2112, 2006.

[13] Shanthikumar J.G., “Scheduling n Jobs on One Machine to Minimize the Maximum Tardiness with Minimum Number Tardy”, Computers and Operations Research**,** 10(3): 255-266, 1983.

[14] Nelson R.T., Sarin R.K., Daniels R.L., “Scheduling with Multiple Performance Measures: The One-Machine Case”, Management Science**,** 32(4): 464-479, 1986.

[15] Lung C.C., Multicriteria Scheduling For A Single Machine: Analysis and Algorithms, Ph.D., Auborn University, 1989.

[16] Liao C.J., Huang R.H., Tseng S.T., “Use of Variable Range in Solving Multiple Criteria Scheduling Problems”, Computers and Operations Research, 19(5): 453-460, 1992.

[17] Gupta J.N.D., Ramnarayanan R., “Single Facility Scheduling with Dual Criteria: Minimizing Maximum Tardiness Subject to Minimum Number of Tardy Jobs”, Production Planning and Control, 70: 127-143, 1996.

[18] Gupta J.N.D., Hariri A.M.A., Potts C.N., “Single-Machine Scheduling to Minimize Maximum Tardiness with Minimum Number of Tardy Jobs”, Annals of Operations Research, 92: 107-123, 1999.

[19] Eren T., “Tek Makineli Çizelgelemede Genel Öğrenme Fonksiyonları: Optimal Çözümler”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(2) 76-80, 2013.

[20] Eren T., “Logaritmik Toplam İşlem Zaman Tabanlı Öğrenme Etkili Tek Makineli Çizelgeleme: Toplam Erken Bitirme Ve Toplam Gecikme Minimizasyonu” Nigde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 1 (2), 61-68, 2012.

[21] Eren T., “Logaritmik toplam işlem zaman tabanlı öğrenme etkili tek makineli çizelgeleme: geciken iş sayısı minimizasyonu”, Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1, 83-88, 2012.

[22] Eren T., “Geciken iş sayısı ve gecikme aralığı ölçütlü zamana-bağımlı öğrenme etkili çizelgeleme probleminin çözümü”, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27 (4), 875-879, 2012.

[23] GAMS 22.5 Development Corporation, Washington, DC USA. GAMS – the solver manuals, GAMS user notes, 2007.