



## SIRA-BAĞIMLI HAZIRLIK ZAMANLI İKİ ÖLÇÜTLÜ ÇİZELGELEME PROBLEMİ: TOPLAM TAMAMLANMA ZAMANI VE MAKSİMUM ERKEN BİTİRME

Tamer EREN<sup>a,\*</sup>, Ertan GÜNER<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, TÜRKİYE

<sup>b</sup>Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

### ÖZET

Bu çalışmada tek makineli sıra-bağımlı hazırlık zamanlı iki ölçütlü çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemden incelenen ölçütler toplam tamamlanma zamanı ( $\sum C$ ) ve maksimum erken bitirmedir ( $E_{\max}$ ). NP-zor sınıfında olan bu problemi çözmek için 0-1 karışık tamsayı programlama modeli önerilmiştir. Önerilen model, 12 işe kadar olan problem setleri için çözülebilmektedir. Büyük boyutlu problemleri çözmek için modifiye edilmiş NEH algoritması, tabu arama temelli sezgisel algoritmalar ve rassal arama yöntemleri kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, sunulan sezgisel yöntemler 1000 işe kadar olan problemlerin çözümlerini bulabilecek etkinliktedir. İncelemelerimize göre ele aldığımız bu iki ölçütlü (toplam tamamlanma zamanı ve maksimum erken bitirme) sıra-bağımlı hazırlık zamanlı problem ( $1/s_{jk} / \alpha \sum C + \beta E_{\max}$ ), ilk defa bu çalışmada ele alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tek makineli çizelgeleme, Sıra-bağımlı hazırlık zamanı, İki ölçüt, 0-1 karışık tamsayı programlama, Sezgisel yöntemler.

## A BICRITERIA SCHEDULING PROBLEM WITH SEQUENCE DEPENDENT SETUP TIMES: TOTAL COMPLETION TIMES AND MAXIMUM EARLINESS

### ABSTRACT

We consider a bicriteria scheduling problem with sequence-dependent setup times on a single machine is considered. The objective function of the problem is minimization of the weighted sum of total completion time and maximum earliness. A 0-1 mixed integer programming model is developed for the problem which belongs to NP-hard class. Results of computational tests show that the proposed model is effective in solving problems with up to 12 jobs. For solving problems containing large number of jobs, modified NEH algorithm, tabu search based heuristic and random search methods are presented. According to computational results, heuristic algorithms are effective in finding problem solutions with up to 1000 jobs. According to the best of our knowledge, no works exists on the minimization of the weighted sum of total completion time and maximum earliness problem with sequence-dependent setup times.

**Keywords:** Single machine scheduling, Sequence-dependent setup times, Bicriteria, 0-1 mixed integer programming, Heuristic methods.

## 1. GİRİŞ

Bir ürün çevriminin üretimini gerçekleştirmek için makine, proses veya tezgahları üzerinde yapılan işlemler hazırlık faaliyetleri olarak ifade edilir. Bunlar gerekli ekipmanların tespiti, temini, ayarlanması, takılması gibi faaliyetlerden oluşur. Hazırlık işlemleri ile ilgili problemler literatürde iki sınıfta ele alınmıştır. Birincisinde, hazırlıklar sadece işlem görecekt işe bağlı olup sıra-bağımsız hazırlık zamanı olarak ifade edilir. Diğerinde ise hazırlık, hem o anda işlem görecekt işe hem de bir önceki işe bağlıdır. Bu durum ise sıra-bağımlı hazırlık zamanı olarak ifade edilir [1]. Sıra-bağımlı hazırlık zamanı uygulamaları ile ilgili örnek olarak matbaa endüstrisi verilebilir. Burada makinenin temizlenmesi ve hazırlanması, en son kullanılan mürekkep rengine, kağıdın boyutuna ve özelliğine bağlıdır. Ayrıca kimya, ilaç, metal endüstrilerinde de sıra-bağımlı hazırlık zamanı uygulamalarına sıkça rastlanmaktadır [2]. Bu çalışmada da iki ölçütlü tek makineli sıra-bağımlı hazırlık zamanlı çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan performans ölçütleri toplam tamamlanma zamanı ve maksimum erken bitirmediir.

Toplam tamamlanma zamanı ölçütü ara stoklarla ilişkili bir gösterge olup bu ölçütün enküçüklenmesiyle ara stoklarda azalmakta ve üretim çevrim hızı artmaktadır. Maksimum erken bitirme ölçütü ise işlerin erken bitmesinden kaynaklanan maliyetleri (stok taşıma maliyeti vb.) önlenmektedir. Bu tip erken bitirme zamanına dayalı ölçütlere olan ilgi özellikle 1980'li yıllarda ortaya çıkan ve uygulaması gittikçe yaygınlaşan tam zamanında üretim felsefesiyle daha da artmıştır [3].

Tek ölçütlü çizelgeleme problemleriyle kıyaslandığında çok ölçütlü çizelgeleme problemlerini çözmek oldukça zordur. Çok ölçütlü çizelgeleme problemlerinin çözümünde genellikle kullanılan iki farklı yaklaşım vardır. Birincisinde, ölçütlerin ağırlıkları eşitse problemin bütün etkin çözümleri üretilir. Daha sonra da çok ölçütlü karar verme teknikleri kullanılarak çözümler arasında ödünleşimler yapılır. İkincisinde ise ölçütlerin ağırlık değerleri farklı olup amaç fonksiyonu bu ölçütlerin ağırlıklı toplamından oluşur ve bu fonksiyonun eniyilenmesi sağlanır [4-6]. Bu çalışmada ikinci yaklaşım dikkate alınmıştır.

Toplam tamamlanma zamanını enküçüklenmesi probleminin sıra-bağımlı hazırlık zamanlı olarak, Bianco vd. [7] kümülatif gezgin satıcı problemine, Fischetti vd. [8] ise postacı problemine benzeterek kesin çözüm veren yöntemler geliştirmişlerdir. Sıra-bağımlı hazırlık zamanlı çizelgeleme probleminde bizim incelemelerimize göre maksimum erken bitirme ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu iki ölçütün yani toplam tamamlanma zamanı ve maksimum erken bitirme  $1/\alpha \sum C + \beta E_{\max}$ , ile ilgili hazırlık zamansız olarak Köksalan vd. [9] ile Karasakal ve Köksalan [10] tarafından ele alınmıştır. Bu problemin sıra-bağımlı hazırlık zamanlı durumu ise incelemelerimize göre ilk defa bu çalışma ile ele alınmıştır.

Tek makineli sıra-bağımlı hazırlık zamanlı çizelgeleme probleminde toplam tamamlanma zamanını enküçükleme problemi  $1/s_{jk} / \sum C$ , NP-zor yapıda olduğundan dolayı [11] ele aldığımız iki ölçütlü sıra-bağımlı hazırlık zamanlı tek makineli çizelgeleme problemi  $1/s_{jk} / \alpha \sum C + \beta E_{\max}$  de, NP-zor yapıda bir problemidir.

İki ölçütlü sıra-bağımlı hazırlık zamanlı problemin çözümü için 0-1 karışık tamsayı programlama modeli önerilmiştir. Ayrıca daha büyük boyutlu problemleri çözmek için sezgisel yaklaşımlar önerilmiş ve 1000 işe kadar olan çözümler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ele alınan problem tanımlanmıştır. Problemin çözülmesi için önerilen 0-1 karışık tamsayı programlama modeli ise Üçüncü bölümde verilmiştir. Dördüncü bölümde, büyük boyutlu problemlerin çözümü için önerilen sezgisel yöntemler anlatılmıştır. Deneysel sonuçlar ise Beşinci bölümde gösterilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar tartışılmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

## 2. PROBLEMİN TANIMLANMASI

İncelediğimiz problemde tek makine üzerinde yapılacak  $n$  tane iş ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) sıfırıncı zamanda işlem için hazırdır.  $p_j, j$  işinin işlem zamanını  $d_j, j$  işinin teslim tarihini  $s_{jk}$  ise  $j$  işi  $k$  işinden önce sıralandığında  $k$  işinin sıraya-bağımlı hazırlık zamanını ifade etmektedir. İşler tek makine üzerinde kesintisiz olarak işlem görmekte olup makine üzerinde birim zamanda sadece tek bir işin işlemi yapılabilir. Bir işin tamamlanma zamanından önce biterse o iş erken bitmiş olur. Yani  $E_j = \max\{d_j - C_j, 0\}$  dir. Burada  $C_j$  ve  $E_j$  sırasıyla,  $j$  işini tamamlanma zamanı ve erken bitmesidir.

Maksimum erken bitirme ise  $E_{\max} = \max_{j=1}^n E_j$  ile tanımlanmaktadır. Bu çalışmada incelenen ölçütlerden birisi toplam tamamlanma zamanı diğeri de maksimum erken bitmedir. Böylece inceleyeceğimiz problem  $1/s_{jk} / \alpha \sum C + \beta E_{\max}$  olarak ifade edilebilir. Çalışmada kullanılan diğer varsayımlar şöyledir: Makine hazırlık zamanları önceden bilinmekte olup işlem zamanına dahil edilmemiş ve sıraya bağımlı olarak değişmektedir. İş kesintisizine izin verilmeyip başlanan bir iş makinede tamamlanmadan başka bir iş başlayamaz ve makinenin çizelgeleme periyodu süresince sürekli çalıştığı varsayılmaktadır.

## 3. ÖNERİLEN 0-1 KARIŞIK TAMSAYILI PROGRAMLAMA MODELİ

Modelde kullanılan parametreler, değişkenler ve önerilen model aşağıda verilmiştir.

### 3.1. Parametreler

- $n$ : iş sayısı  
 $p_j$ :  $j$  işinin işlem zamanı  
 $d_j$ :  $j$  işinin teslim tarihi  
 $s_{jk}$ :  $j$  işi  $k$  işinden önce sıralandığında  $k$  işinin sıraya-bağımlı hazırlık zamanı  
 $B$ : Büyük bir sayı  
 $\alpha$ : Toplam tamamlanma zamanının ağırlık değeri  
 $\beta$ : Maksimum erken bitirmenin ağırlık değeri  $0 < \alpha, \beta < 1$   $\alpha + \beta = 1$

### 2.2. Karar Değişkenleri

- $C_j$ :  $j$  işinin tamamlanma zamanı  
 $Y_{jk}$ :  $\begin{cases} 1 & k, j\text{'den sonra ise} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$   
 $E_{\max}$ : maksimum erken bitirme  $E_{\max} = \max_{j=1}^n (d_j - C_j, 0)$ .

### 2.3. 0-1 Karışık Tamsayılı Programlama Modeli

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Min } \alpha \sum C + \beta E_{\max}$$

Kısıtlar:

$$C_j \geq p_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$C_j - C_k + B[Y_{jk}] \geq s_{kj} + p_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad k = 2, 3, \dots, n \quad k > j \quad (2)$$

$$C_k - C_j + B[1 - Y_{jk}] \geq s_{jk} + p_k \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad k = 2, 3, \dots, n \quad k > j \quad (3)$$

$$E_{\max} \geq d_j - C_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$Y_{jk} \in \{0, 1\}, \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad k = 2, 3, \dots, n \quad k > j \quad (5)$$

Kısıt (1),  $j$  işinin tamamlanma zamanının  $j$  işinin işlem zamanından büyük veya eşit olduğunu göstermektedir. Kısıt (2) ve (3) aynı anda iki işin işlenmesini ifade etmektedir. Kısıt (4),  $j$  işinin erken bitmesi, teslim tarihi ve tamamlanma zamanı arasındaki farktan büyük veya eşit olmasını belirtmektedir. Kısıt (5)'de  $Y_{jk}$  değerinin 0 veya 1 olmasını tanımlamaktadır.

Ele alınan modelin 0-1 değişken sayısı  $n(n-1)/2$ , diğer değişkenlerin sayısı  $(n+1)$  ve kısıt sayısı ise  $n(n+1)$  dir. Burada  $n$  iş sayısını göstermektedir.

#### 4. SEZGİSEL YÖNTEMLER

Verilen 0-1 karışık tamsayı programlama modeli ile ancak küçük boyutlu problemler çözülebilmektedir. Halbuki uygulamalarda daha büyük boyutlu problemleri çözmek gerekebilir. Bunun için akış tipi çizelgeleme problemlerinde çok kullanılan NEH yöntemi [12] tek makineli probleme modifiye edilmiştir. Ayrıca meta sezgisel yöntemlerden olan tabu arama yöntemi ve rassal arama yöntemi de kullanılmıştır.

##### 4.1. Uyarlanan NEH Yöntemi

NEH [12] yöntemi akış tipi çizelgeleme problemlerinde en çok kullanılan sezgisel yöntemlerden biridir. NEH yöntemi ele alınan tek makineli probleme uyarlanmıştır.

Adım 1: Her bir işi için kısmi amaç fonksiyonu  $KAF_j = \alpha \sum_{j=1}^n C_j + \beta E_{\max}$  yi hesapla. Burada  $C_j$ ,  $j$  işinin tamamlanma zamanını  $E_j$ ,  $j$  işinin erken bitmesini,  $E_{\max} = \max_{j=1}^n \{E_j\} = \max\{d_1 - C_1, d_2 - C_2, \dots, d_n - C_n\}$  ise maksimum erken bitirmeyi göstermektedir.

Adım 2: İşleri  $KAF_j$  işlem zamanlarına göre artan sırada sırala.

Adım 3: Adım 2'de oluşturulan listedeki birinci ve ikinci sıradaki işleri seçiniz ve bu iki iş için en uygun sırayı mümkün olan her iki sıra içinde amaç fonksiyon değerlerini hesaplayarak bul. Bu iki işin birbirlerine göre olan pozisyonlarını algoritmanın kalan basamaklarında değiştirme.  $j = 3$  olarak al.

Adım 4: Adım 2'de oluşturulan  $j$ . işi seçiniz ve önceden belirlenen işlerin birbirine göre olan sırasını değiştirmeden en iyi sırayı bir önceki adımda bulunan kısmi sırada mümkün olan bütün  $j$  pozisyonlarına yerleştirerek bul. Bu adımdaki iterasyon sayısı  $j$ 'ye eşittir.

Adım 5:  $n = j$  ise DUR, aksi halde  $j = j + 1$  olarak al ve Adım 4'e git.

##### 4.2. Tabu Arama

İlk olarak Glover [13] tarafından ortaya atılan tabu arama yöntemi, bu çalışmada ele alınan problemin çözümünde kullanılan sezgisel yöntemlerden biridir. Tabu arama yöntemi, eniyi veya eniyeye yakın çözümleri bulmak için çözüm uzayını araştırır. Tabu arama yöntemi kombinatoryal problemlerde kullanılan sezgisel optimizasyon tekniklerinden

birdir. Tabu arama, seçilen herhangi bir başlangıç çözümü ile aramaya başlar. Mevcut çözümün tanımlanan bir hareket mekanizmasına göre komşuluğu oluşturulur ve bu komşuluk içinden en iyi amaç değerine sahip olan çözüm eğer tabu sınıfına girmiyorsa yeni mevcut çözüm olarak seçilir. Yöntemde tabu sınıflarının belirlenmesi için kısa dönemli hafıza (tabu listesi) kullanılır. Belli bir iterasyon seviyesinde veya iyileşme olmadığında arama durdurulur.

Tabu arama yönteminin probleme uyarlanması şu şekildedir:

**Başlangıç çözümü seçimi:** Tabu arama yönteminde iyi bir sonuç elde etmek için iyi bir başlangıç çözümle başlamak genellikle daha iyi sonuçların elde edilmesine imkan verir. Burada da tek makineli çizelgelemede kullanılan belli başlı dağıtım kuralları kullanılacaktır. Başlangıç çözümü bu kurallardan hangisi minimum değeri veriyorsa onunla tabu arama yöntemi başlayacaktır. Bu yöntemler; en küçük işlem zamanı (SPT), en küçük teslim tarihi (EDD), minimum gevşek zaman (MST), minimum hazırlık zamanı (SST) kuralları ile probleme uyarlanan NEH yönteminden en küçük değeri veren başlangıç çözümü olarak seçilmiştir.

**Komşu arama stratejisi:** Komşu arama stratejisi olarak bitişik iş çiftlerinin yer değiştirilmesi (API) kullanılmıştır. API stratejisi ile her iterasyonda ( $n-1$ ) tane komşu üretilmektedir.

**Tabu listesi uzunluğunun belirlenmesi:** tabu listesi uzunluğu iş sayısı  $n$ 'e göre belirlenmiş ve küçük boyutlarda  $n$  olarak alınmıştır.

**Durdurma kriteri:**  $n$  iterasyonda iyileşme olmadığında algoritma durdurulur.

Tabu aramanın parametreleri toplu olarak Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Tabu arama parametreleri.

Parametreler	Değerleri
Başlangıç çözümü	Min{EDD, SPT, MST, SST, uyarlanan NEH}
Tabu listesi uzunluğu	Küçük boyutlarda: $n$
Komşu arama stratejisi	API
Durdurma kriteri	$n$ iterasyonda iyileşmeme

### 4.3. Rassal Arama

Rassal arama yönteminin adımları şöyledir:

- Adım 1: Örnek büyüklüğü kadar rassal çözüm seç.
- Adım 2: En küçük değeri veren sıralamayı bul ve hafızada tut.
- Adım 3:  $n$  iterasyonda iyileşme olmadığında dur. Değilse Adım 1'e dön [14-15].

Rassal arama yönteminin iki parametresi vardır. Bunlardan birincisi, örnek büyüklüğünün seçimi, ikincisi ise durdurma koşuludur. Rassal aramayı, tabu aramaya aynı şartlarda karşılamak için tabu aramadaki koşullar dikkate alınmıştır. Tabu aramada API komşuluğu ile  $n-1$  tane çözümü incelediği için rassal aramada da seçilen örnek büyüklüğü  $n-1$ , durdurma koşulu da  $n$  iterasyonda iyileşmeme koşulu ele alınmıştır.

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

Yapılan çalışmada bütün deneysel testler Pentium IV/2 GHz 512 RAM kapasiteli bilgisayarlar kullanılmıştır. Problemin eniyi çözümlerini bulmak için Hyper LINDO /PC 6.01 [16] paket programı, sezgisel yöntemler için ide C++ Builder kullanılmıştır. Deneysel tasarım şu şekilde yapılmıştır: İşlem zamanları  $p_j$ , ortalaması 100 ve standart sapması 25

olacak şekilde normal dağılımdan üretilmiştir. Hazırlık zamanları  $s_{jk}$ , 0 ile 19 arasında teslim tarihleri  $d_j$ ,  $U \sim [0.40\sum p_j, 0.60\sum p_j]$  ve  $U \sim [0.25\sum p_j, 0.75\sum p_j]$  arasında düzgün dağılımdan üretilmiştir. Toplam tamamlanma zamanı ve maksimum erken bitirme ağırlıkları  $(\alpha, \beta)$  değerleri (0.25,0.75), (0.50,0.50) ve (0.75,0.25) olmak üzere üç farklı alternatifte ele alınmıştır. İş sayıları  $n$ , 6, 8, 10 ve 12 olmak üzere her durumda 10 problem çözülerek sonuçlar elde edilmiştir. Optimal çözümler için ( $n \leq 12$ ) deney seti Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Problemin deneysel seti ( $n \leq 12$ ).

Parametreler	Değerleri
$p_j$	$N \sim (100,25)$
$s_{jk}$	$U \sim [0,19]$
$d_j$	I: $U \sim [0.40\sum p_j, 0.60\sum p_j]$ , II: $U \sim [0.25\sum p_j, 0.75\sum p_j]$
$(\alpha, \beta)$	(0.25,0.75);(0.50,0.50);(0.75,0.25)
$n$	6, 8, 10, 12
Çözülen problem	10
Toplam çözülen problem	$1 \times 1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 10 = 240$

**Tablo 3.** Problemin çözüm sonuçları ( $n \leq 12$ ).

$(\alpha, \beta)$	$n$	teslim tarihi aralığı	Optimal çözüm zamanı	Sezgisellerin hataları (%)		
			CPU (sn)	NEH	Tabu	Rassal
(0.25,0.75)	6	I	0.54	1.07	0.00	16.82
		II	0.44	2.57	0.00	11.78
	8	I	54.78	1.40	0.00	12.48
		II	40.25	2.33	0.00	13.18
	10	I	627.46	1.43	0.00	12.60
		II	429.78	1.29	0.00	16.90
	12	I	5150.12	1.14	0.33	12.82
		II	4665.98	2.15	0.69	13.61
			ortalama	1.67	0.13	13.78
(0.50,0.50)	6	I	1.25	1.02	0.00	15.44
		II	0.89	2.91	0.00	10.93
	8	I	128.77	2.00	0.00	10.19
		II	72.31	1.33	0.00	11.35
	10	I	801.12	1.60	0.00	16.12
		II	766.50	2.73	0.00	13.93
	12	I	6603.87	1.82	0.70	12.39
		II	5970.19	1.28	0.40	16.09
			ortalama	1.84	0.14	13.31
(0.75,0.25)	6	I	1.56	1.51	0.00	10.94
		II	1.47	1.51	0.00	14.45
	8	I	153.47	2.76	0.00	10.95

**Tablo 3.** Problemin çözüm sonuçları ( $n \leq 12$ ). ( Devamı )

$(\alpha, \beta)$	$n$	teslim tarihi aralığı	Optimal çözüm zamanı	Optimal çözüm hataları (%)		
			CPU (sn)	NEH	Tabu	Rassal
(0.75,0.25)	10	II	160.89	1.76	0.00	15.19
		I	1043.12	2.73	0.00	12.23
	12	II	1029.23	1.72	0.00	14.02
		I	7674.10	1.02	0.79	11.87
		II	8682.69	1.14	0.09	15.28
			ortalama	1.77	0.11	13.12
			Genel ortalama	1.76	0.13	13.40

Ele alınan problemin optimal çözüm sonuçları ile uyarlanan NEH, tabu arama ve rassal arama yöntemlerinin hataları ise Tablo 3'de verilmiştir. Optimal çözümlerde görüldüğü gibi çözüm CPU zamanı üssel olarak artmaktadır. Sezgisellerden tabu arama yöntemi diğer sezgisellerden daha iyi sonuç vermiştir. İş sayıları 6, 8, 10 ve 12 için optimal çözümü bulmuştur. Sezgisel yöntemlerin hataları % olarak şu şekilde hesaplanmıştır.

$$\text{Sezgisel yöntem hatası (\%)} = 1 - \frac{\text{Sezgisel çözüm sonucu} - \text{Optimal çözüm sonucu}}{\text{Optimal çözüm sonucu}} \times 100$$

Tablo 3'de görüldüğü gibi problem etkin olarak ancak 12 işe kadar bulunabilmiştir. Daha büyük boyutlu problemlerin çözümü için sezgisel yöntemler kullanılacaktır. Büyük boyutlu problemlerin ( $100 \leq n \leq 1000$ ) deneysel seti Tablo 4'de verildiği gibi 600 problem çözülmüştür.

**Tablo 4.** Problemin deneysel seti ( $100 \leq n \leq 1000$ ).

Parametreler	Değerleri
$p_j$	$N \sim (100,25)$
$s_{jk}$	$U \sim [0,19]$
$d_j$	I: $U \sim [0.40 \sum p_j, 0.60 \sum p_j]$ , II: $U \sim [0.25 \sum p_j, 0.75 \sum p_j]$
$(\alpha, \beta)$	(0.25,0.75);(0.50,0.50);(0.75,0.25)
$n$	100,200,...,1000
Çözülen problem	10
Toplam problem	$1 \times 1 \times 2 \times 3 \times 10 \times 10 = 600$

**Tablo 5.** Sezgisel yöntem sonuçları ( $\alpha, \beta = (0.25,0.75)$ ).

n	tt	Çözüm kalitesi			CPU zamanı (sn)		
		NEH	Tabu	Rassal	NEH	Tabu	Rassal
100	1	14.34	0.00	20.15	0.511	2.393	0.562
	2	12.72	0.00	20.77	0.516	2.452	0.890
200	1	11.85	0.00	21.68	1.291	7.798	1.920
	2	12.52	0.00	22.10	1.180	7.575	1.838

**Tablo 5.** Sezgisel yöntem sonuçları  $(\alpha, \beta) = (0.25, 0.75)$ . ( Devamı )

n	tt	Çözüm kalitesi			CPU zamanı (sn)		
		NEH	Tabu	Rassal	NEH	Tabu	Rassal
300	1	10.53	0.00	22.99	2.914	24.979	6.293
	2	12.52	0.00	24.01	2.696	23.292	6.210
400	1	12.24	0.00	24.53	7.757	84.448	20.967
	2	11.08	0.00	25.60	7.639	82.986	20.313
500	1	12.89	0.00	25.99	16.269	261.040	71.818
	2	14.29	0.00	26.41	15.299	250.392	71.363
600	1	12.70	0.00	26.93	46.034	811.182	247.709
	2	14.40	0.00	28.09	43.045	792.264	229.069
700	1	10.86	0.00	28.37	112.331	2749.418	859.503
	2	12.64	0.00	29.24	106.166	2673.762	787.119
800	1	13.70	0.00	30.03	258.351	9265.529	2752.322
	2	12.56	0.00	30.85	246.127	8965.788	2572.367
900	1	11.08	0.00	31.98	677.893	28243.029	9578.323
	2	14.34	0.00	33.33	663.679	27171.173	8718.107
1000	1	10.26	0.00	34.43	2004.062	85106.345	29245.598
	2	13.20	0.00	36.01	1830.804	81544.369	27324.903
1000	1	11.47	0.00	37.29	5301.279	289579.172	92169.483
	2	13.46	0.00	38.65	4971.679	267333.133	85758.969

Büyük boyutlu problemlerde kullanılan sezgisel yöntemlerde, eniyi sezgisel referans alınarak hataları % olarak şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Çözüm kalitesi \%} = 1 - \frac{\text{Sezgisel çözüm sonucu} - \text{Bulunan eniyi sezgisel çözüm sonucu}}{\text{Bulunan eniyi sezgisel çözüm sonucu}} \times 100$$

Büyük boyutlu problemlerdeki tabu arama parametrelerinin küçük boyutlulardan tek farkı tabu listesi uzunluğu  $n$  yerine  $2\sqrt{n}$  alınmıştır.

Sezgisel yöntemlerin hataları ve çözüm süreleri saniye olarak ağırlıklara göre Tablo 5-7'de gösterilmiştir. Bununla birlikte problem boyutu büyüdükçe sezgisel yöntemlerin çözüm sürelerinin üssel olarak artmaktadır.

Tablo 5-7'de beklenildiği gibi tabu arama yöntemi en iyi sonucu vermiştir. Uyarlanan NEH yöntemi de çözüm kalitesi ve çözüm süresi bakımından iyi sayılabilecek çözümler verdiği görülmüştür. Teslim tarihi (tt) aralığı I ve teslim tarihi aralığı II arasında çözüm kalitesi ve süresi bakımından çok büyük farklılık bulunmadığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca toplam tamamlanma zamanı ve maksimum erken bitirme katsayıları olan  $\alpha, \beta$  değerlerinin farklı değerleri için çözüm sonuçlarında, çözüm kalitesi ve çözüm süresi bakımından çok etki etmediği görülmüştür.

**Tablo 6.** Sezgisel yöntem sonuçları  $(\alpha, \beta) = (0.50, 0.50)$ .

n	tt	Çözüm kalitesi			CPU zamanı (sn)		
		NEH	Tabu	Rassal	NEH	Tabu	Rassal
100	1	13.42	0.00	20.06	0.511	2.294	0.562
	2	14.67	0.00	20.65	0.516	2.365	0.680



**Tablo 6.** Sezgisel yöntem sonuçları  $(\alpha, \beta) = (0.50, 0.50)$ . ( Devamı )

n	tt	Çözüm kalitesi			CPU zamanı (sn)		
		NEH	Tabu	Rassal	NEH	Tabu	Rassal
200	1	14.67	0.00	21.41	1.094	7.673	1.869
	2	14.05	0.00	22.05	1.082	7.463	1.797
300	1	14.91	0.00	22.67	2.420	25.310	5.829
	2	10.85	0.00	23.30	2.271	24.635	5.414
400	1	11.04	0.00	23.94	5.187	88.179	18.027
	2	14.79	0.00	24.70	5.069	84.631	17.103
500	1	12.46	0.00	25.56	10.531	265.604	58.387
	2	10.05	0.00	26.59	9.985	260.115	55.009
600	1	12.88	0.00	27.34	24.573	827.968	196.886
	2	11.50	0.00	28.17	24.538	791.858	183.068
700	1	11.07	0.00	28.98	59.019	2539.682	669.884
	2	10.62	0.00	29.28	55.254	2309.405	628.392
800	1	13.23	0.00	30.36	172.565	8216.858	2047.828
	2	13.36	0.00	30.72	156.742	8167.484	1891.290
900	1	10.44	0.00	31.15	477.125	27571.025	6748.292
	2	14.86	0.00	31.78	433.639	27457.012	6645.136
1000	1	10.62	0.00	32.49	1127.788	88325.686	21200.320
	2	11.09	0.00	34.00	1085.100	87466.271	20173.589
1000	1	11.17	0.00	35.31	2542.457	296646.014	65613.984
	2	14.06	0.00	36.48	2397.052	290761.816	60820.626

**Tablo 7.** Sezgisel yöntem sonuçları  $(\alpha, \beta) = (0.75, 0.25)$ .

n	tt	Çözüm kalitesi			CPU zamanı (sn)		
		NEH	Tabu	Rassal	NEH	Tabu	Rassal
100	1	13.28	0.00	20.50	0.511	2.042	0.562
	2	10.23	0.00	21.01	0.516	2.195	0.791
200	1	13.22	0.00	21.45	1.204	6.192	1.872
	2	10.78	0.00	21.93	1.092	5.588	1.836
300	1	12.58	0.00	22.19	3.475	20.979	6.479
	2	11.67	0.00	22.88	3.295	18.898	5.839
400	1	11.53	0.00	23.18	9.214	64.443	21.608
	2	10.95	0.00	23.95	8.864	63.658	20.388
500	1	10.87	0.00	25.13	18.940	200.797	66.032
	2	14.34	0.00	25.85	18.397	180.831	60.162
600	1	10.86	0.00	26.42	42.043	657.435	219.107
	2	11.21	0.00	27.65	40.792	643.086	215.394
700	1	13.34	0.00	28.02	105.316	2170.805	721.012
	2	13.15	0.00	29.28	95.581	2022.619	701.977

**Tablo 7.** Sezgisel yöntem sonuçları  $(\alpha, \beta) = (0.75, 0.25)$ . ( Devamı )

n	tt	Çözüm kalitesi			CPU zamanı (sn)		
		NEH	Tabu	Rassal	NEH	Tabu	Rassal
800	1	14.28	0.00	30.73	243.500	7329.008	2481.267
	2	13.15	0.00	32.12	221.534	7205.718	2378.505
900	1	11.34	0.00	33.70	542.305	25451.696	8070.607
	2	11.79	0.00	34.84	517.326	25231.757	7397.635
1000	1	12.30	0.00	36.00	1511.823	84630.144	24582.768
	2	11.31	0.00	37.54	1434.731	82954.327	22591.714
1000	1	10.15	0.00	38.02	4463.026	269737.254	73850.987
	2	10.12	0.00	38.56	4286.294	246422.310	68358.501

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada iki ölçütlü tek makineli sıra bağımlı hazırlık zamanlı çizelgeleme probleminde toplam tamamlanma zamanı ve maksimum erken bitirmenin ağırlıklı toplamı problemi ele alınmıştır. Tek ölçütlüde bile NP-zor yapıda olan sıra-bağımlı hazırlık zamanlı problemleri optimal olarak çözmek ancak küçük boyutlu problemlerde mümkün olabilmektedir. Ele alınan iki ölçütlü sıra-bağımlı hazırlık zamanlı problem için ancak 12 işe kadar optimal çözümler önerilen 0-1 karışık tamsayı programlama modeli ile bulunabilmektedir. Uygulamalarda daha büyük boyutlu problemlerle ilgilenmek gerekeceği düşünülerek sezgisel yöntemlere başvurulmuştur. Akış tipi çizelgeleme problemlerde sıkça kullanılan NEH yöntemi tek makineli probleme modifiye edilmiş. Ayrıca meta-sezgisel yöntemlerden tabu arama yöntemi ve rassal arama yöntemi kullanılarak 1000 işe kadar olan problemlerin çözümleri yapılmıştır. Tabu arama yönteminde birden fazla dağıtım kuralı kullanılarak eniyi çözümü veren başlangıç çözüm olarak alınmıştır. Tabu arama yönteminin diğer sezgisellere göre eniyi çözümü verdiği deneysel sonuçlarla gösterilmiştir. Ayrıca uyarlanan NEH yöntemi ile çözüm kalitesi ve çözüm süresi bakımından iyi sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda çok makineli problemler ele alınabilir. Bu çalışmada da görüldüğü gibi optimal olarak ancak çok küçük boyutlar çözülebileceğinden dolayı sezgisel yöntemler üzerinde daha çok durmak gerekebilir. Diğer performans ölçütleriyle de ilgilenilmesi ile çizelgeleme literatürünün daha fazla zenginleşeceği tahmin edilmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Allahverdi A., Gupta J.N.D., Aldowaisan T., A review of scheduling research involving set-up consideration, OMEGA - International Journal of Management Science, 27: 219-239, 1999.
2. Yang W.-H., Liao C.-J., "Survey of scheduling research involving setup times", International Journal of Systems Science, 30 (2): 143-155, 1999.
3. Güner E., Tek makineli sistemler için çok ölçütlü çizelgeleme algoritmaları, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1994.
4. Eren T., Güner E., Tek ve paralel makineli problemlerde çok ölçütlü çizelgeleme problemleri için bir literatür taraması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17 (4): 37-69, 2002.
5. Eren T., Çok ölçütlü akış tipi çizelgeleme problemleri için çözüm yaklaşımları, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. Ankara, 2004.
6. Gupta J.N.D., Palanimuthu N., Chen C.-L., Designing and tabu search algorithm for the two-stage flow shop problem with secondary criterion, Production Planning & Control, 10 (3): 251-265, 1999.
7. Bianco L., Mingozzi A., Ricciardelli S., The travelling salesman problem with cumulative costs, Networks, 23: 81-91, 1993.
8. Fischetti M., Laporte G., Martello S., The delivery man problem and cumulative matroids, Operations Research, 41: 1055-1064, 1993.

9. Köksalan M., Azizoğlu M., Kondakçı S., Minimizing Flowtime and Maximum Earliness on a Single Machine, *IIE Transactions*, 30: 192-200, 1998.
10. Karasakal E.K., Köksalan M., Simulated annealing approach to bicriteria scheduling problems on a single machine, *Journal of Heuristics*, 6 (3): 311-327, 2000.
11. Kan Rinnooy, A.H.G., *Machine Scheduling Problems*, Martinus Nijhoff, The Hague, 1976.
12. Nawaz M., Ensore E.E., Ham I., A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem, *OMEGA*, 11: 91-95, 1983.
13. Glover F., Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers and Operations Research*, 5: 533-549, 1986.
14. Jang J.-S.R., Sun C.T., Mizutani E., *Neuro-fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence*, Prentice Hall, USA, 1997.
15. Fox R. L., *Optimization methods for engineering design*, Addison Wesley Publishing Company, London, 1971.
16. Lindo Systems, Inc, *Hyper LINDO/PC Release 6.01*, Chicago, USA, 1997.