

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SIRA BAĞIMLI VE İŞ TABANLI ÖĞRENME ETKİSİ  
ALTINDA ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ**

**Hazırlayan  
İsmail AKARGÖL**

**Danışman  
Prof. Dr. M. Duran TOKSARI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Aralık 2019  
KAYSERİ**

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SIRA BAĞIMLI VE İŞ TABANLI ÖĞRENME ETKİSİ  
ALTINDA ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan  
İsmail AKARGÖL**

**Danışman  
Prof. Dr. M. Duran TOKSARI**

**Aralık 2019  
KAYSERİ**

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: İsmail AKARGÖL

İmza : 

“Sıra Bağımlı ve İş Tabanlı Öğrenme Etkisi Altında Çizelgeleme Problemleri” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Danışman

İsmail AKARGÖL

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI

Endüstri Mühendisliği ABD Başkanı  
Prof. Dr. Lale ÖZBAKIR

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI danışmanlığında İsmail AKARGÖL tarafından hazırlanan “Sıra Bağımlı ve İş Tabanlı Öğrenme Etkisi Altında Çizelgeleme Problemleri” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

24 / 12 / 2019

**JÜRİ:**

Danışman : Prof. Dr. M. Duran TOKSARI

Üye : Prof. Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN

Üye : Doç. Dr. Özgür DEMİRTAŞ

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 31/12/2019 tarih ve 2019/73-11 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

21 / 12 / 2019  
Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

## TEŞEKKÜR

Bu alıŐma boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. M. Duran TOKSARI'ya teŐekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca; çalıŐmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme en içten teŐekkürlerimi sunarım.

İsmail AKARGÖL

Aralık 2019, KAYSERİ



# SIRA BAĞIMLI VE İŞ TABANLI ÖĞRENME ETKİSİ ALTINDA ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ

İsmail AKARGÖL

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2019

Danışman: Prof. Dr. M. Duran TOKSARI

## ÖZET

Çizelgeleme problemlerinde öğrenme etkisinin kullanımı önemli ölçüde artmaktadır. Bir öğrenme süreci, tek bir öğenin üretimindeki tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak işlem süresindeki azalmaya yansır. Öğrenme etkisi, benzer veya aynı işlemlerin devamlı tekrarlanması neticesinde işlem süresinde meydana gelen azalmayı göstermektedir. Çizelgeleme probleminde öğrenme etkisi kullanıldığında ortak varsayım, tüm işlerin benzer olmasıdır. Oysaki, çizelgelemedeki tüm işlerin değil, bazı işlerin benzer olması daha gerçekçidir. Bu tez çalışmasında çizelgeleme problemi sıra bağımlı ve iş tabanlı olarak ele alınmıştır. Tek makinalı çizelgeleme ortamında maksimum tamamlanma zamanı ( $c_{max}$ ), toplam tamamlanma zamanı ( $\sum C$ ), tamamlanma zamanlarının farklarının toplamı (TADC) çizelgeleme problemleri sıra bağımlı ve iş tabanlı öğrenme etkisi altında çözüm yaklaşımları incelenecektir. Burada matematiksel modelin yanında büyük boyutlu çizelgeleme problemlerinin çözümünde meta sezgisel yaklaşım tekniklerinden biri olan tavlama benzetimi algoritması kullanılacaktır.

Farklı sayıda iş değerleri için rassal olarak üretilen veri setleri üç performans ölçütü için ilk olarak Lingo 17.0 programında çalıştırılmış, daha sonra bu veriler en kısa işlem süresi (Shortest Processing Time - SPT) ve tavlama benzetim algoritması kullanılarak amaç fonksiyon değerleri karşılaştırılmıştır.  $n=10$  iş için nispi hata oranı  $c_{max}$  için 0,007,  $\sum C$  ve TADC için 0,001 iken,  $n=30$  iş için nispi hata oranı  $c_{max}$  için 0,031,  $\sum C$  için 0,075, TADC için 0,099 olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Çizelgeleme, Öğrenme etkisi, SPT, Tavlama Benzetimi, Sıra bağımlı ve iş tabanlı öğrenme etkisi, Maksimum tamamlanma zamanı, Toplam tamamlanma zamanı, Tamamlanma zamanlarının mutlak farklarının toplamı

# SCHEDULING PROBLEMS UNDER THE SEQUENCE DEPENDENT AND JOB BASED LEARNING EFFECT

İsmail AKARGÖL

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, December 2019

Supervisor: Prof. Dr. M. Duran TOKSARI

## ABSTRACT

The use of learning effect in scheduling problems increases significantly. A learning process is reflected in the reduction in processing time as a function of the number of repetitions in the production of a single item. Learning effect indicates a reduction in processing time as a result of repeated repetition of similar or identical operations. When learning effect is used in the scheduling problem, the common assumption is that all jobs are similar. However, it is more realistic that some jobs are similar, not all jobs in scheduling. In this thesis, scheduling problem is handled as sequence dependent and job based. Maximum completion time ( $c_{max}$ ), total completion time ( $\sum C$ ), total absolute difference completion time (TADC) scheduling problems in a single machine scheduling environment will be examined solution approaches under the sequence dependent and job based learning effect. In addition to the mathematical model one of the meta-heuristic approximation techniques, the annealing simulation algorithm will be used to solve large scale scheduling problems.

The randomly generated data sets for different number of job values were first run in the Lingo 17.0 program for the three performance criteria, then the shortest processing time (SPT) and annealing simulation algorithm were used to compare the objective function values. For  $n=10$  has been found 0,007 for  $c_{max}$ , 0,001 for  $\sum C$  and TADC, For  $n=30$  has been found 0,031 for  $c_{max}$ , 0,075 for  $\sum C$  and 0,099 for TADC.

**Keywords:** Scheduling, Learning effect, SPT, Simulated Annealing, Sequence-dependent and job-based learning effect, Maximum completion time, Total completion time, Total absolute difference completion time



## İÇİNDEKİLER

### SIRA BAĞIMLI VE İŞ TABANLI ÖĞRENME ETKİSİ ALTINDA ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
ONAY .....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR ve SİMGELER .....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xi
GİRİŞ .....	1

## 1. BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Çizelgeleme Kavramı.....	5
1.1.1. Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması.....	6
1.1.2. Çizelgeleme problemlerinde Kullanılan öncelik Kuralları .....	7
1.1.3. Çizelgeleme Problemlerinde Kullanılan Öğrenme Etkisi.....	7
1.2. Tavlama Benzetim Metasezgiseli.....	14

## 2. BÖLÜM

### PROBLEMİN TANIMLANMASI VE KULLANILAN YÖNTEMLER

2.1. Problemin Tanımlanması.....	17
2.1.1. Maksimum Tamamlanma Zamanı Minimizasyon Problemi .....	20

2.1.2. Toplam Tamamlanma Zamanı Minimizasyon Problemi .....	21
2.1.3. Tamamlanma Zamanlarının Farkının Toplamı Minimizasyon Problemi (TADC) .....	23
2.2. Önerilen Tabu Tavlama Benzetim Algoritması.....	32
2.2.1. Başlangıç Çözümünün Belirlenmesi.....	32
2.2.2. Komşu Arama Stratejisi.....	33
2.2.3. Tabu Listesi Uzunluğunun Belirlenmesi.....	34
2.2.4. Durdurma Kriteri .....	36
2.3. Problem Çözümünde Önerilen Tavlama Benzetim Algoritması.....	37

### 3. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA ve BULGULAR.....	40
-----------------------------------	----

### 4. BÖLÜM

SONUÇ ve ÖNERİLER.....	48
KAYNAKÇA .....	50
EKLER.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	72

**KISALTMALAR ve SİMGELER**

$p_{j[r]}$	$r$ pozisyonunda çizelgelenmiş $j$ 'inci sıradaki iş süresi
$p_j$	$j$ 'inci sıradaki iş süresi
$j$	çizelgede işlenen işin numarası
$r$	çizelgelenmiş işin pozisyonu
$a_j$	$j$ işinin öğrenme oranı
$b$	öğrenme oranı
$n$	iş sayısı
TADC	Total absolute difference completion time (Tamamlanma zamanlarının farklarının toplamı)
SPT	Shortest processing time (En kısa işlem süresi)
FIFO	First in first out (İlk giren ilk çıkar)
EDD	Earliest due date (En erken teslim tarihi)
API	Adjacent pairwise interchange (Bitişik iş çiftlerinin yer değiştirmesi)

**TABLULAR LİSTESİ**

Tablo 1.1. Çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması .....	6
Tablo 2.1. Benzerlik İlişki Matrisi .....	18
Tablo 2.2. Problemden Kullanılacak Parametre ve Açıklamaları.....	19
Tablo 2.3. Çizelgeleme Problemleri .....	19
Tablo 2.4. Sayısal örnek verileri .....	24
Tablo 2.5. Örnek problemin tüm işler için benzerlik ilişkisi matrisi .....	25
Tablo 2.6. $C_{max}$ için işlerin sıralaması ve konumları .....	26
Tablo 2.7. $\sum C$ için işlerin sıralaması ve konumları.....	28
Tablo 2.8. TADC için işlerin sıralaması ve konumları .....	30
Tablo 2.9. Tabu arama parametreleri .....	37
Tablo 3.1 Matematiksel model ve önerilen algoritma ile elde edilen sonuç çıktıları ve nispi hata oranları .....	46

**ŞEKİLLER LİSTESİ**

Şekil 1.1. Öğrenme Eğrisi Grafiği .....	8
Şekil 1.2. Genel Bir Tavlama Benzetim Algoritması .....	16
Şekil 2.1. $C_{max}$ Problemi Lingo 17.0 Çözüm Ekranı .....	26
Şekil 2.2. $\sum C$ Problemi Lingo 17.0 Çözüm Ekranı.....	28
Şekil 2.3. TADC Problemi Lingo 17.0 Çözüm Ekranı .....	30
Şekil 2.4. Komşu arama stratejisi.....	34
Şekil 2.5. Tabu Listesinin Oluşturulması Örneği.....	36
Şekil 2.6. Önerilen tavlama benzetimi algoritmasının akış şeması.....	39

## GİRİŞ

Çizelgeleme problemlerinde öğrenme etkisinin kullanımı önemli ölçüde artmaktadır. Bir öğrenme süreci, tek bir öğenin üretimindeki tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak işlem süresindeki azalmaya yansır. Çizelgeleme probleminde öğrenme etkisi kullanıldığında ortak varsayım, tüm işlerin benzer olmasıdır. Gerçek hayatta işlerin tamamından ziyade bir kısmının benzer olması daha çok karşılaşılan bir durumdur. Bu nedenle, bu çalışmada geçmiş sıra bağımlı öğrenme etkisine yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen bu yaklaşım, bir işe göre öğrenme etkisinin, daha önce aynı makinada işlenen benzer işlerin sayısına bağlı olduğunu varsayar. Bu tez çalışması önerilen sıra bağımlı ve iş tabanlı öğrenme etkisi altında son işin tamamlanma zamanı (makespan), toplam tamamlanma zamanı, tamamlanma zamanlarının farklarının toplamı çizelgeleme problemlerinin tek makina çizelgeleme ortamında çözüm yaklaşımları sunması amaçlanmaktadır.

Klasik çizelgeleme teorisi, iş işlem süresinin sabit olduğunu varsayar. Ancak, çeşitli gerçek hayattaki üretim sistemlerinde çalışanlar bir öğrenme sürecinden geçer. Çizelgeleme literatüründe, Biskup [1] öğrenme etkisini araştıran ilk araştırmacıdır. Mosheiov [2] bu olgunun ortak terminolojisini "öğrenme etkisi" olarak tanımlamıştır. Biskup [1] ve Mosheiov [2] bir işin işlem süresinin, daha önce aynı makine tarafından işlenen tüm işlerin sayısının bir fonksiyonu olduğunu varsayar. Biskup [1] aşağıdaki modeli gerçek işlem süresi olarak formülize etmiştir:

$$p_{j[r]} = (p_j)r^\alpha \quad j, r = (1, \dots, n) \quad (1)$$

Burada  $p_{j[r]}$ ,  $r$  pozisyonunda çizelgelenen  $j$  işinin gerçek işlem zamanı,  $p_j$  temel işlem zamanı ve  $a$  ( $a < 0$ ) öğrenme endeksidir. Burada  $a$  değeri sıfırdan küçük olan bir parametredir. Bu model iki şekilde kısıtlayıcıdır: (i) tüm işler için aynı öğrenme oranlarını, yani  $r^a$ 'yı kullanır; (ii) mevcut diğer öğrenme eğrisi modelleri için geçerli değildir. Aslında, birçok farklı öğrenme eğrisi modeli önerilmiş ve kullanılmıştır; Böylece daha genel bir model benimsenmeli ki  $p_{jr}$ ,  $r$ 'nin pozitif olmayan bir artış fonksiyonu olmasını gerektirir. Mosheiov ve Sidney [3] öğrenme etkisinin işe bağımlı olabileceğini öne sürmüşler ve aşağıdaki modeli gerçek işlem süresi olarak kabul etmişlerdir:

$$p_{j[r]} = (p_j)r^{a_j} \quad j, r = (1, \dots, n) \quad (2)$$

Burada  $p_{j[r]}$ ,  $r$  pozisyonunda çizelgelenen  $j$  işinin gerçek işlem zamanı,  $p_j$  temel işlem zamanı ve  $a_j$  ( $a_j < 0$ )  $j$  işinin öğrenme endeksidir.  $a_j$  iş bağımlı negatif bir parametredir. Kuo ve Yang [4] öğrenme etkisini zamana bağlı öğrenme etkisi olarak yeni bir versiyonunu sunmuşlardır. Bir işin zamana bağlı öğrenme etkisinin, işin başında çizelgelenen işlerin toplam normal işlem süresinin bir fonksiyonu olduğunu varsayar. Zamana bağlı öğrenme etkisi altında gerçek işlem süresi:

$$p_{j[r]} = (p_j) \left( 1 + \sum_{l=1}^{r-1} p_{[l]} \right)^a \quad j, r = (1, \dots, n) \quad (3)$$

Burada  $p_{j[r]}$ ,  $r$  pozisyonunda çizelgelenen  $j$  işinin gerçek işlem zamanı,  $p_j$  temel işlem zamanı ve  $a$  ( $a < 0$ ) tüm işler için öğrenme endeksidir. Cheng ve diğ. [5] logaritma-işleme-zaman tabanlı öğrenme etkisini önermişlerdir. Bu yaklaşımın gerekliliğini açıklarken, iş bağımlı öğrenme etkisi altında belirli bir işin gerçek işlem süresini, iş sayısı arttıkça ve ikinci iş modelinde normal iş süreç zamanları büyük olduğunda sıfıra düştüğünü varsayarlar. Logaritma-işleme-zaman-temelli öğrenme etkisi altında gerçek işlem süresi;

$$p_{j[r]} = (p_j) \left( 1 + \sum_{l=1}^{r-1} \ln p_{[l]} \right)^a \quad j, r = (1, \dots, n) \quad (4)$$

Burada  $p_{j[r]}$ ,  $r$  pozisyonunda çizelgelenen  $j$  işinin gerçek işlem zamanı,  $p_j$  temel işlem zamanı ve  $a$  ( $a < 0$ ) tüm işler için öğrenme endeksidir. Wu ve Lee [6], öğrenme etkilerinin iş konumuna ve işlenen işin işlem süresine bağlı olduğu yeni bir model geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım şu şekilde sunulmuştur:

$$p_{j[r]} = (p_j) \left(1 + \frac{\sum_{l=1}^{r-1} p_{[l]}}{\sum_{l=1}^n p_l}\right)^{a} r^b \quad j, r = (1, \dots, n) \quad (5)$$

Burada  $p_{j[r]}$ ,  $r$  pozisyonunda çizelgelenen  $j$  işinin gerçek işlem zamanı,  $p_j$  temel işlem süresi ve  $a$  ( $a < 0$ ) ve  $b$  ( $b < 0$ ) tüm işler için öğrenme endeksini gösterir. Cheng ve diğ. [7] çizelgeleme problemleri için logaritma-işlem süreleri toplamına ve iş pozisyonu bazında bir konum-ağırlıklı öğrenme etkisi modeli önermiştir.  $j$  işi pozisyon ağırlıklı bir öğrenme etkisi modeli altında bir sırayla  $r$  pozisyonunda çizelgelenirse şu şekilde verilir.

$$p_{j[r]} = (p_j) \left(1 + \beta_k \sum_{l=1}^{r-1} \ln p_{[l]}\right)^a r^b \quad j, r = (1, \dots, n) \quad (6)$$

Burada  $p_{j[r]}$ ,  $r$  pozisyonunda çizelgelenen  $j$  işinin gerçek işlem zamanı,  $\beta_k > 0$   $k$ 'inci pozisyonu ile ilişkili ağırlıktır.  $p_j$  temel işlem zamanı ve  $a$  ( $a < 0$ ) ve  $b$  ( $b < 0$ ) tüm işler için öğrenme endeksi gösterir.

Çizelgeleme literatüründe, tüm modellerin ortak varsayımı, tüm işlerin benzer olmasıdır. Ancak, bir üretim ortamında, çizelgedeki bütün işler değil yalnızca bazı işler benzer olabilir. Bu nedenle, bu çalışmada geçmiş sıra bağımlı ve iş tabanlı öğrenme etkisi isimli yeni bir yaklaşım önerilecektir. Geçmiş sıra bağımlı ve iş tabanlı öğrenme etkisi,

$$p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j} \quad j = (1, \dots, n) \quad (7)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada  $p_{j[r]}$ ,  $j$  işinin gerçek işlem zamanı,  $p_j$  temel işlem zamanı ve  $a_j$  ( $a_j < 0$ ) işe bağımlı öğrenme endeksi ve  $r_j$ ,  $j$  işinden önce çizelgelenen benzer işlerin sayısıdır.  $r_j$  şu şekilde elde edilir.

$$r_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} X_{ik} \quad j = (1, \dots, n) \quad (8)$$



Burada,  $j$  işi  $i$  işine benzer ise  $R_{ji}=1$ , değil ise  $R_{ji}=0$ .  $i$  işi  $k$  konumunda çizelgelenirse  $X_{ik} = 1$ , aksi takdirde  $X_{ik}=0$  dır.

Bu tez çalışmasında yukarıda Eşitlik 7 ve 8'de verilen ifadeler kullanılarak çizelgeleme problemi sıra bağımlı ve iş tabanlı olarak ele alınacaktır. Maksimum tamamlanma zamanı (makespan), toplam tamamlanma zamanı, tamamlanma zamanlarının farkının toplamı çizelgeleme problemlerinin önerilen çözüm yaklaşımları ile çözülebileceğini göstereceğiz. Buradaki büyük boyutlu çizelgeleme problemlerinin çözümünde meta sezgisel yaklaşım tekniklerinden biri olan tavlama benzetimi algoritması kullanılacaktır.

Tezin ilk bölümünde sıra bağımlı ve iş tabanlı öğrenme etkisi altında çizelgeleme problemlerine kaynak oluşturacak olan genel bilgiler ve mevcut çalışmalar hakkında bilgiler verilecektir. İkinci bölümde teze konu olan problemin matematiksel modelleri kurulacak, problemin çözümü için matematiksel model ve meta sezgisel yaklaşım sunulacaktır. Çözüm yaklaşımlarının test problemlerine uygulandığı kısım üçüncü bölümde yer alacak ve son olarak da sonuç ve önerilerin yer aldığı kısım dördüncü bölümde verilecektir.

## 1.BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde çizelgeleme, çizelgeleme konusunda öğrenme etkisi üzerine yapılan daha önceki çalışmaların hakkında literatür bilgisi verilecektir.

#### 1.1. Çizelgeleme Kavramı

Çizelgeleme, birçok imalat ve hizmet endüstrisinde düzenli olarak kullanılan bir karar verme sürecidir. Kaynakların verilen sürelerde görevlere tahsis edilmesiyle ilgilenir ve bir veya daha fazla hedefi optimize etmeyi amaç edinir [8]. Bir firmada çizelgeleme görevi, matematiksel teknikler ve/veya sezgisel yöntemler kullanarak elde bulunan kıt kaynakların paylaşılmasını sağlar [9].

Genel olarak çizelgeleme, bir üretim sisteminde yapılan bütün aktivitelerin başlangıç ve bitiş sürelerinin belirlenmesi olarak tanımlanır. Çizelgeleme ile mevcut durum analiz edilerek işletmede bulunan insan gücü, makine, kapasite, teçhizat gibi etmenlerde yapılacak değişiklikler belirlenir.

Çizelgeleme problemleri parametre yapısı olarak  $\alpha / \beta / \gamma$  şeklinde gösterilir.  $\alpha$  parametresi makina ortamını gösterip tek girdisi vardır.  $\alpha$  parametresi tek makina, özdeş paralel makina, ilişkisiz paralel makina vs. gibi değerler alabilir.  $\beta$  parametresi, işleme özellikleri ve kısıtlarıyla alakalı detaylı bilgi verir ve girdi sayısı bir veya daha fazla olabilir.  $\beta$  parametresi geliş zamanı, permütasyon, öncelik kısıtları vs. gibi değerler alabilir.  $\gamma$  parametresi ise problemde optimize edilecek performans ölçütünü gösterir ve girdi sayısı tektir [10].

### 1.1.1.Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Çizelgeleme problemleri genel olarak aşağıda Tablo 1.1’de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir [11].

Tablo 1.1. Çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması [11]

Problemin Yapısı	
	Deterministik Stokastik
Makina Biçimi	
	Tek Makinalı Sistemler Paralel Makinalı Sistemler Akış Tipi Sistemler Atölye Tipi Sistemler
Performans Ölçütleri/ Ölçüt Sayısı	
	Düzenli Ölçütler Düzenli Olmayan Ölçütler Tek Ölçüt Çok Ölçüt
İş Özellikleri	
	Öncelik Kısıtları Robotlama Kısıtları Malzeme Taşıma Kısıtları Hazırlık Zamanları ve Maliyetleri Öncüllük Depolama Alanı ve Bekleme Zamanı Kısıtları Stoğa Üretim ve Sipariş – Üretim Takım Kısıtları ve Kaynak Kısıtları Öğrenme Etkisi
Çözüm Yöntemleri	
	Geleneksel Optimizasyon
	Dinamik Programlama Dal Sınır Yöntemleri Ödünleşim Eğrileri Tam Sayılı Programlama Formülasyonu Yeni Yaklaşımlar (Sezgiseller)
	Tabu Arama Genetik Algoritma Tavlama Benzetimi Karıncı Kolonisi ve diğer metasezgisel yaklaşımlar

### 1.1.2. Çizelgeleme Problemlerinde Kullanılan Öncelik Kuralları

Polinom olarak makul zaman dilimi içerisinde çözülebilir olan tek makina çizelgeleme problemlerinde performans göstergelerinin bulunması önemlidir. Çizelgeleme literatüründe en çok kullanılan performans göstergelerine bağlı öncelik yöntemleri aşağıda açıklanmıştır [10].

FCFS (First Come First Serve): İşlerin verilen sıralamada, sisteme ilk olarak girecek olan işin işlem görmesi prensibine dayanır.

FCLS (First Come Last Serve): İşlerin verilen sıralamada, sisteme ilk olarak girecek olan işin son olarak işlem görmesi prensibine dayanır.

SPT (Shortest Processing Time): Bu öncelik kuralı en kısa işlem süreli sıralama olarak adlandırılır. İşler işlem zamanlarına göre tezgahta küçükten büyüğe doğru sıralanır. SPT kuralındaki amaç işlem zamanına bağlı performans ölçütlerinden biri olan toplam akış süresini en küçükmektir.

LPT (Longest Processing Time ): Bu öncelik kuralı en uzun işlem süreli sıralama olarak adlandırılır. İşler tezgahta en uzun işlem zamanına sahip işten en küçük işlem zamanına sahip işe doğru sıralanır.

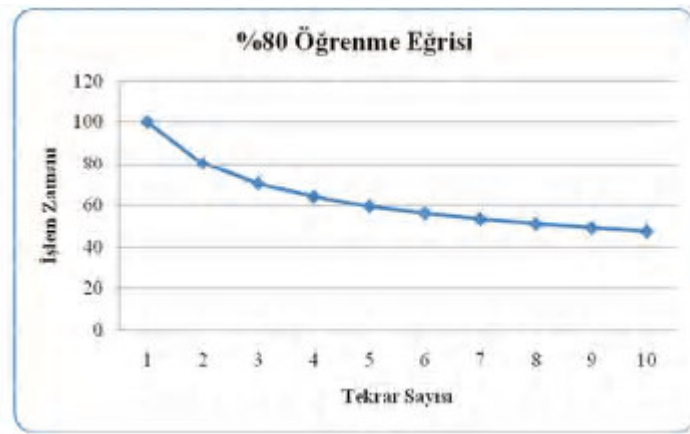
EDD (Earliest Due Date) : Bu öncelik kuralı en erken teslim süreli sıralama olarak adlandırılır. İşler teslim tarihlerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanır. EDD kuralının amacı maksimum gecikmeyi ( $L_{max}$ ) en küçükmektir.

CR (Critic Ratio) : Bu öncelik kuralında kritik oranı en düşük işten kritik oranı en yüksek olan işe doğru bir sıralama yapılır. Bu oran, günlük olarak çizelgelenen işlerin tezgahta ilerlemesi için iş sıralarının belirlenmesinde fayda sağlar.

### 1.1.3. Çizelgeleme Problemlerinde Kullanılan Öğrenme Etkisi

Bir öğrenme etkisi, aynı görev tekrarlarının bir fonksiyonu olarak performans geliştirilmesinin bir grafiği olan öğrenme eğrisi vasıtasıyla tanımlanabilir. Öğrenme etkisi eğrisi, ilk defa 1936 yılında Wright tarafından ortaya atılmıştır. Bu çalışmada, üretilen uçak sayısı arttıkça uçak üretimi için var olan doğrudan işçilik maliyetinin nasıl

azaldığı açıklanmıştır [12-13]. Şekil 1.1'de örnek bir öğrenme eğrisi grafiği gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Öğrenme Eğrisi Grafiği [14]

Geleneksel olarak, işin işlem zamanları çizelgede işlenecek ilk işten tamamlanacak en son işe kadar sabit olduğu varsayılmaktadır. Bununla birlikte, farklı endüstrilerde yapılan son çalışmalar, firmaların daha fazla ürün ürettiğinde ve bilgi veya deneyim kazandıkça birim maliyetlerinin azaldığını göstermiştir. Bu olgu “öğrenme etkisi” olarak bilinir [21]. Öğrenme etkisi altında çizelgeleme problemleri üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan ilki Biskup [1] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmasının odak noktası tek makinalı çizelgeleme problemlerinde öğrenmeyi analiz etmektir. Öğrenme ile işin işlem sürelerinin tek makina problemlerinde polinom olarak çözülebilir kaldığını göstermiştir.

$p_{j[r]} = (p_j)r^a$  modelini gerçek işlem zamanı olarak önermiştir. Burada  $p_{j[r]}$ ,  $r$  pozisyonunda çizelgelenen  $j$  işinin gerçek işlem zamanı,  $p_j$  temel işlem zamanı ve  $a$  ( $a < 0$ ) öğrenme endeksidir.

Mosheiov [2] öğrenme etkisini çeşitli çizelgeleme problemleri bağlamında incelemiştir. Bu çalışmada tek makina son işin tamamlanma zamanı minimizasyon problemi, çok kriterli tek makina problemleri ve özdeş paralel makinalarda minimum akış zamanı problemi için polinom çözümleri sunulmuştur.

Eren ve Güner [15], öğrenme etkisini iki makinalı akış tipi çizelgeleme probleminde ele almıştır. Burada ağırlıklı toplam tamamlanma süresi ve son işin tamamlanma zamanını

en aza indiren bir sırayı bulmayı amaçlamışlardır. Bu çizelgeleme problemini çözmek için  $n$  iş sayısı olduğu  $n^2+6n$  değişken ve  $7n$  kısıta sahip bir tamsayı model önermişlerdir.

Eren [16], öğrenme etkisini hazırlık ve taşıma süresini dikkate alarak m-özdeş paralel makina probleminde ele almıştır. Problemin amacı toplam tamamlanma süresi ve toplam gecikmenin ağırlıklı toplamını minimize edilmesidir. Problem  $NP$  sınıfına ait olduğu için matematiksel bir model geliştirmiş 15 iş ve 5 makine altında etkili çözümler bulmuştur.

Cheng ve Wang [17], tek makina çizelgeleme problemlerinde öğrenmenin sonucu olarak işlerin işlem sürelerinin azalacağı bir durumu ele almışlardır. Öğrenme etkilerini modellemek için hacme bağlı parçalı doğrusal işlem süresini kullanmışlardır. Amaçları maksimum gecikmeyi en aza indirmektir. İlk önce problemin  $NP$  yapıda olduğunu ve ardından polinom olarak çözülebilen iki özel durumu belirtmişlerdir. Ayrıca iki sezgisel yöntem önermiş ve en kötü durum performansını incelemişlerdir.

Wang ve ark. [18], üstel logaritma işlem zamanına dayalı öğrenme etkisine sahip tek makina çizelgeleme problemlerini ele almışlardır. Amaç fonksiyonları son işin tamamlanma zamanı, toplam tamamlanma süresi, ikinci derecedeki iş tamamlama zamanlarının toplamı, toplam ağırlıklı tamamlanma süresi ve maksimum gecikmedir. Bu amaç fonksiyonlarının  $SPT$  kuralı ile çözülebileceğini göstermişlerdir.

Xu ve ark. [19], öğrenme etkisini akış tipi çizelgeleme problemlerinde ele almışlardır. Burada, işlerin işlem süreleri permütasyondaki konumlarının işlevleri olarak tanımlanmaktadır. Amaç, toplam ağırlıklı tamamlanma süresi, indirimli toplam ağırlıklı tamamlanma süresi ve ikinci derecedeki tamamlanma sürelerinin toplamı olmak üzere üç normal performans kriterinden birini en aza indirmektir. İş tabanlı öğrenme etkisi altında birçok çalışma yapılmıştır.

Jiang ve ark. [20], karar vermede normal zaman bağımlı ve iş bağımlı olarak, öğrenme etkisini tek makinada gecikme minimizasyonu probleminin  $NP$  yapıda olduğu durumu incelemişlerdir.

Lee ve ark. [21], yaptıkları çalışmada öğrenme etkisi altında tek makina çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Amaçları, toplam tamamlanma zamanı ve maksimum gecikmenin doğrusal bir kombinasyonunu minimize eden sıralamayı bulmaktır. Optimal ve optimala yakın çözümleri bulmak için dal sınır ve sezgisel bir algoritma önermişlerdir.

Jiang ve ark. [22], zaman bağımlı ve iş bağımlı öğrenme etkisini tek makina çizelgeleme problemlerinde incelemişlerdir. Son işin tamamlanma zamanı minimizasyon probleminin karmaşık sonuçlarını ve toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı minimizasyon probleminin *NP* yapıda olduğunu göstermişlerdir.

Wang ve Wang [23], iş bağımlı öğrenme etkisiyle kaynak dağıtımı üzerine yapılan çizelgeleme çalışmasını, son teslim tarihi olan veya olmayan tek makina problemi üzerinde incelemişlerdir. Dışbükey bir kaynak işlem zamanı fonksiyonunda en uygun iş sırasını bulmak için polinom zamanlı bir algoritma önermişlerdir.

Jiang ve ark. [24], tek makinalı çizelgeleme problemlerinde işlem zamanı toplamını işe bağlı öğrenme etkisiyle incelemişlerdir. Amaçları, maksimum gecikmeyi, gecikmeli iş sayısını ve toplam ağırlıklı tamamlanma zamanını en aza indirmektir. Polinom zamanda çözülebilecek iki özel durum sunmuşlardır.

Nouri ve ark. [25], toplam akış zamanını en aza indirmek amacıyla akış tipi çizelgeleme probleminin daha genel bir versiyonunu incelenmişlerdir. Sorunun gerçek koşullarına daha yakın olmak için, permütasyon dışı zamanlama, öğrenme etkisi, çoklu kullanılabilirlik kısıtlamaları ve serbest bırakma zamanları gibi bazı gerçekçi varsayımlar göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca, her bir işin sıfır zamanında işlemeye hazır olmadığı ve bir serbest bırakma süresine sahip olabileceği varsayılmaktadır. Bu varsayımlara göre, problemi formüle etmek için yeni bir karmaşık tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modeli önermişlerdir. Problemin yüksek karmaşıklığından dolayı, orta ve büyük boyutlu problemlerde en uygun çözümleri bulmak için sezgisel bir yöntem ve tavlama benzetim algoritması sunmuşlardır.

Eren ve Güner [26], çalışmalarında en erken başlama süresi ve iş bağımlı öğrenme etkisi altında toplam akış zamanını en iyilemek için matematiksel model önermişlerdir.

Lee ve Wu [27], yaptıkları çalışmada öğrenme etkisi kavramının yanına grup teknolojisi kavramını da eklemiştir. Öğrenme etkisinin sadece iş pozisyonuna değil, aynı zamanda grup pozisyonuna da bağlı olduğu yeni bir grup planlama öğrenme modeli sunmuşlardır. Daha sonra, son işin tamamlanma zamanı ve toplam tamamlanma zamanı problemlerinin önerilen model kapsamında polinom olarak çözülebilir kaldığını göstermişlerdir. Yang ve Yang [28], Lee ve Wu [27] tarafından çalışılan problemde toplam tamamlanma süresini en aza indirmek amacıyla yeni bir grup öğrenme modeli önermişlerdir. Gerçek bir üretim sürecine daha yakın olan başka kabul edilebilir koşullar önermişler ve bunu polinom zamanda çözmüşlerdir.

Koulamas ve Kyparisis [29], öğrenme etkisini farklı bir bakış açısından incelemiştir. En kısa işlem süresi (*SPT*) sırasının, öğrenmenin mevcut halinde çizelgelenmiş işlerin işlem sürelerinin toplamının bir fonksiyonu olarak ifade edilmesi durumunda, tek makinalı son işin tamamlanma zamanı ve toplam tamamlanma zamanı minimizasyonu problemleri için optimal olduğunu ve iki makinalı akış tipi son işin tamamlanma zamanı ve toplam tamamlanma zamanı en aza indirgeme problemlerinde, işlem zamanları sıralandığında ve iş pozisyonu temelli öğrenme etkin olduğunda *SPT* kuralı ile çözülebilir olduğunu göstermişlerdir. Wang [30], aynı öğrenme etkisi durumunu tek makinalı çizelgeleme problemlerinde farklı ölçütler üzerinde durmuştur.

Lee ve Wu [31], öğrenme etkisini iki makinalı akış tipi çizelgelemede ele almıştır. Amaçları toplam tamamlanma zamanını en aza indiren sırayı bulmaktır. Burada  $p_{ijr} = p_{ij} \times r^a$  formülünü kullanarak her makinalının öğrenmesinin farklı olduğunu belirtmişlerdir. Dal ve sınır algoritmasının verimsizliğinin üstesinden gelmek için bir sezgisel algoritma da önermişlerdir. Simülasyonda, önerilen sezgisel algoritmanın öncekinden daha tutarlı bir şekilde iyi performans göstermiştir.

Wu ve ark. [32], öğrenme etkisini tek makinalı çizelgelemede maksimum gecikme minimizasyon problemlerinde ele almışlardır. Optimal çözümü elde edebilmek için dal sınır algoritması ile sezgisel metotlar uygulamışlardır. Bir başka çalışmalarında [44], maksimum gecikmeyi en aza indiren sıralamayı bulmak için iki makinalı akış tipi çizelgeleme problemini incelemiştir. Optimal ve optimale yakın çözümleri bulmak için dal sınır tavlama benzetimi yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca büyük boyutlu işler için tavlama benzetim yöntemi ile EDD kuralı karşılaştırılmıştır.



Chen ve ark. [33], tek makinada veya paralel makinalarda pozisyona dayalı kötüleşen işleri ve geçmiş sıra bağımlı teslimat süreleri ile ilgili bir çizelgeleme problemini ele almışlardır. Tek makina problemindeki amaç, son işin tamamlanma zamanı ve toplam tamamlanma zamanını en aza indirmektir. Paralel makina problemindeki amaç ise, toplam tamamlanma zamanını ve toplam makina yükünü en aza indirmektir. Tüm bu problemlerin polinom zamanda çözülebilir olduğunu göstermişlerdir.

Yin ve ark. [34], çizelgeleme alanına, işin gerçek işlem süresinin sadece mevcut durumda işlem gören işlerin gerçek işlem zamanın toplamının genel bir fonksiyonu değil, aynı zamanda işin çizelgedeki konumunun genel bir fonksiyonu olduğu öğrenme etkili bir model önermişlerdir. Burada makespan ve  $k$ 'inci dereceden toplam tamamlanma zamanını minimize etme problemlerini polinom zamanda çözülebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı minimizasyon problemini ve maksimum gecikme minimizasyon problemini polinom zamanda belirli şartlar altında çözülebileceğini göstermişlerdir.

Wu ve Lee [35], aynı anda hem makina hem de insan öğrenme etkilerini dikkate alan bir öğrenme modeli üzerinde çalışmışlardır. İlk olarak, pozisyon temelli öğrenme ve işlem zamanı toplamına dayalı öğrenme modellerini incelemişlerdir. Tek makina çizelgeleme problemlerinde son işin tamamlanma zamanı ve toplam tamamlanma zamanını en küçükleme için polinom zamanlı optimal çözümler önermişlerdir. Bir  $m$ -makinalı akış tipi için, son işin tamamlanma zamanı, toplam tamamlanma zamanını, toplam ağırlıklı tamamlama zamanını ve maksimum gecikmeyi minimize etmek için polinom zamanlı optimal çözümler sunmuşlardır.

Soroush [36], geçmiş sıra bağımlı hazırlık zamanı ve hazırlık zamanı ile öğrenme etkilerinin işe bağlı olduğu log-linear öğrenmeyi tek makina çizelgeleme problemlerinde ele almıştır. Amaç, son işin tamamlanma zamanı, toplam tamamlanma zamanı, toplam gecikme süresi, toplam bekleme maliyeti, toplam bekleme süresi, toplam mutlak fark tamamlanma süresi gibi amaç fonksiyonlarını en aza indiren sıralamayı bulmaktır. Bunu yaparken dal sınır algoritması önermiştir. Soroush [37], bir başka çalışmasında hazırlık zamanlarının iş bağımlı ve geçmiş sıra bağımlı (past sequence dependent) ( $psd$ ); öğrenme etkisinin ise iş bağımlı ve pozisyon tabanlı olduğu tek makina çizelgeleme problemini incelemiştir. Amaç, tamamlanma zamanlarının

p'inci kuvvetinin ( $p \geq 0$ ) toplamı, maksimum gecikme süresi, toplam gecikme süresi, ağırlıkların iş pozisyonlarının doğrusal olmayan fonksiyonları olduğunda toplam ağırlıklı tamamlama süresi ve bekleme sürelerindeki toplam mutlak farklar gibi amaç fonksiyonlarının her birini en aza indirmektedir. Burada dal sınır algoritması kullanarak polinom zamanda çözümlere ulaşılmıştır. Ayrıca [36] da kullanılan dal sınır algoritması son iki hedefe uygulanarak genişletilmiştir.

Cheng ve ark. [38], bir işin gerçek işlem zamanı, mevcut durumda işlem görmüş olan işlerin, işin çizelgedeki pozisyonunun toplam normal işlem zamanlarının bir fonksiyonu olduğu öğrenme etkisine sahip olduğu yeni bir çizelgeleme modeli sunmuşlardır. Tek makinada son işin tamamlanma zamanı ve toplam tamamlanma zamanı problemlerini minimize etmek için polinom zamanlı çözümler önermişlerdir.

Wu ve ark. [39], ilk aşamada iki ve ikinci aşamada tek montaj makinası ile iki aşamalı pozisyon tabanlı öğrenme etkisi altında çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Amaçları, tüm işleri mümkün olan en kısa sürede tamamlamaktır. Problem *NP* yapıda olduğundan en uygun çözümü bulmak için dal sınır algoritmasını kullanmışlardır.

Toksarı ve ark. [40], montaj hattı dengeleme problemlerine öğrenme etkisini uygulamışlardır. Öğrenme etkisini kullanarak hem basit montaj hattı dengeleme probleminde hem de U tipi hat dengeleme probleminde polinom çözümlerinin elde edilebileceğini göstermişlerdir. Toksarı ve Güner [41], pozisyon tabanlı öğrenme ile doğrusal ve doğrusal olmayan bozulma etkisi altında farklı cezaların olduğu paralel bir makinada erken tamamlama / gecikme (ET) çizelgeleme problemini ele almışlardır. Problemden tüm işler ortak teslim tarihine sahip ve öğrenme ile bozulma etkisi aynı anda dikkate alınmıştır. Çalışmalarında öğrenme ve bozulma etkisi altında E/T çizelgeleme problemi için en uygun çözümün belirli koşullar altında V şekilli çizelge olduğu görülmüştür.

Toksarı ve ark. [42], doğrusal olmayan iş bozulması ve zamana bağımlı öğrenme etkisinin bir kombinasyonunu içeren çizelgeleme problemlerini incelemişlerdir. Burada geçmiş sıra bağımlı hazırlık zamanını kullanmışlardır. Tek makinada son işin tamamlanma zamanı, tamamlanma zamanlarının toplamı ve maksimum gecikme gibi hedefler göz önünde bulundurulmuştur. Optimal çözümü bulmak için polinom zamanlı çözümler önerilmiştir.

Chen ve ark. [43], öğrenme etkisi altında iki kritere sahip iki makinalı akış tipi çizelgeleme problemini ele almışlardır. Amaçları, ağırlıklı toplam tamamlanma zamanını ve maksimum gecikmeyi en aza indiren sırayı bulmaktır. Küçük boyutlu problemlerde dal sınır algoritması, büyük boyutlu problemlerde ise tavlama benzetimi gibi sezgisel algoritmalar önemişlerdir.

Mani ve ark. [45], öğrenme etkisi altında  $n$  işten oluşan iki kriterli tek makina çizelgeleme problemini ele almışlardır. Ele alınan iki hedef, toplam tamamlanma süresi (TC) ve tamamlanma zamanları toplamının farkıdır (TADC).

Bachman ve Janiak [46], işlem sürelerinin, sıralamadaki konumlarına bağlı fonksiyonlarla tanımlandığı tek makina çizelgeleme problemlerini incelemiştir. Optimizasyon kriterleri olarak son işin tamamlanma zamanı, toplam tamamlanma süresi ve toplam ağırlıklı tamamlanma süresini belirlemiştir. İşlem süresinin iki farklı modeli için son işin tamamlanma zamanı minimizasyon probleminin *NP* yapıda olduğunu göstermişlerdir.

Sun ve Li [47], öğrenme etkisini gerçek zaman ve pozisyon bağımlı tek makina çizelgeleme problemlerinde incelemiştir. Belirli koşullar altında en kısa işlem süresi (*SPT*) kuralı, ağırlıklandırılmış en kısa işlem süresi (*WSPT*) kuralı, en erken teslim tarih (*EDD*) kuralı ve değiştirilmiş Moore Algoritmasını kullanarak son işin tamamlanma zamanı, toplam ağırlıklı tamamlama zamanları, maksimum gecikme süresi ve geciken iş sayısını en aza indirmeyi amaçlamıştır.

Corwin ve Esogbue [48], bir makinanın sıra bağımlı hazırlık süreleri ile tanımlandığı iki makinalı akış tipi çizelgeleme problemini incelemiştir. Amaç, son işin tamamlanma zamanı minimizasyon problemini en aza indiren çizelgeyi bulmaktır. Bunu yapmak için etkin bir dinamik programlama modeli geliştirilmiştir.

## **1.2.Tavlama Benzetim Metasezgiseli**

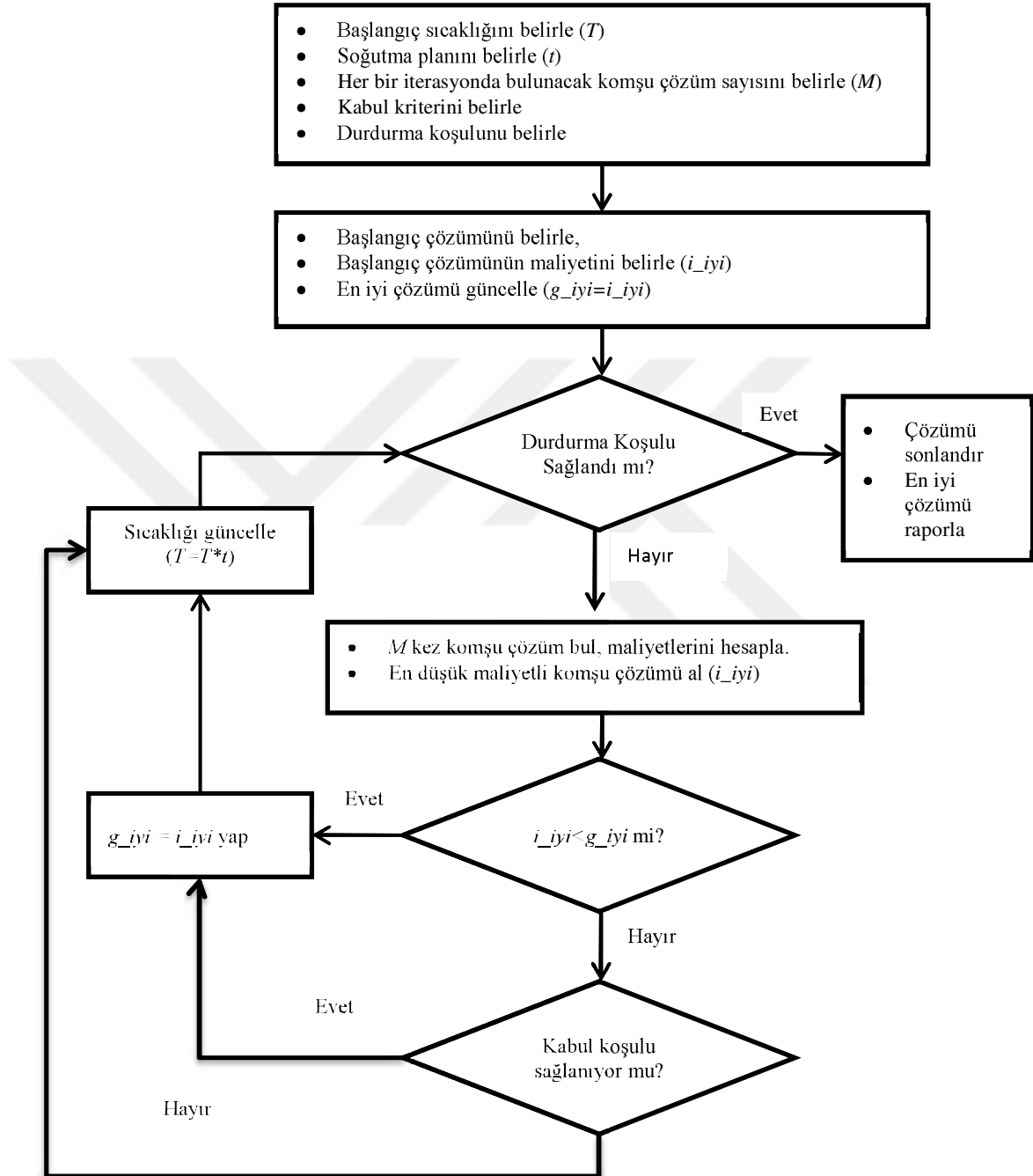
Tavlama benzetimi, zor kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümünde iyi performans gösteren sezgisel bir yöntemdir. Bu yöntem ilk olarak 1953 yılında Metropolis ve ark. tarafından kullanılan bir yöntemdir. Burada bir ısı banyosu içinde var olan taneler kümesinin denge dağılımını bulmak için simülasyon tekniği kullanılmıştır. Metropolis algoritmasının temel özelliği, soğutma prosesindeki enerji değişimine bağlı

olarak belirlenir. Metropolis ayrıca çalışmalarında istatistiksel termodinamiği kullanmıştır. Tavlama algoritması çalışma prensibi yönüyle, lokal arama metodu ile ilişkilendirilir. Lokal aramanın en önemli dezavantajı global optimumu bulmak yerine yerel optimumu bulmasıdır. Tavlama benzetimi bu olumsuz durumu ortadan kaldırması bakımından önemlidir [10, 49-50].

Tavlama benzetimi, katıların fiziksel olarak tavlama sürecini taklit eden stokastik bir arama sürecidir. Bu fiziksel tavlama kavramı, katı bir maddenin düşük enerjiye sahip durumlarının elde edilmesi sürecini içerir. Katı madde yavaş bir şekilde eritilerek ısısının düşük enerjili duruma ulaşması hedeflenir. Literatüre bakıldığında tavlama benzetimi tesis yerleşimi, şebeke tasarımı ve çizelgeleme gibi çeşitli alanlarda uygulanarak optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmıştır [51].

Tavlama benzetimi, Metropolis ve ark. [50]'nin metallerin tavlama süreci ile ilgili elde ettiği çalışmaları kombinatoriyel problemlerin çözümünde uygun çözüm bulmak düşüncesiyle Kirkpatrick ve ark. [52] tarafından ilk kez 1983 yılında tanıtılan bir algoritmadır. Kombinatoriyel optimizasyon çalışmaları bilgisayar bilimi ile mühendisliğini merkeze alan problemlerden oluşur. Bu alanı oluşturan araştırmalar, pek çok bağımsız değişkenden meydana gelen fonksiyonun en küçük ve en büyük değerlerini bulmak için etkili yöntemler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu fonksiyon genel olarak maliyet ve amaç fonksiyonu olarak adlandırılır.

Genel bir tavlama benzetim algoritmasının yapısı aşağıda Şekil 1.2.'de gösterilmiştir. Buna göre, Tavlama Benzetimi çözümü, ilk olarak TB'nin temel parametreleri olan başlangıç sıcaklığı (T), soğutma planı (t), her bir iterasyonda bulunacak komşu çözüm sayısı (M), kabul koşulu ve durdurma koşulu belirlenerek başlar. Bunun yanı sıra, üzerinde durulan problemin karar değişkenlerinin ne şekilde kodlanacağı, komşu çözümler içinde nasıl bir hareket mekanizması kullanılarak yeni çözümlere ulaşılacağı ve başlangıç çözümünün nasıl belirleneceği de uygulayıcının alması gereken kararlardandır [53].



Şekil 1.2. Genel Bir Tavlama Benzetim Algoritması [53]

## 2. BÖLÜM

### PROBLEMİN TANIMLANMASI VE KULLANILAN YÖNTEMLER

Bu bölümde problemin tanımı yapılacak ve problem ile ilgili matematiksel modeller kurularak, büyük boyutlu test problemleri için meta sezgisel yaklaşımlar sunulacaktır.

#### 2.1. Problemin Tanımlanması

Çizelgeleme probleminde öğrenme etkisi kullanıldığında ortak varsayım, tüm işlerin benzer olmasıdır. Oysaki gerçek hayatta tüm işlerin değil, bazı işlerin benzer olduğu çizelgeleme ortamlarına sıklıkla karşılaşılır. Bu çalışmada, geçmiş sıra bağımlı öğrenme etkisi altında iş tabanlı çizelgeleme problemi literatürde ilk kez ele alınacaktır. Burada bir işe göre öğrenme etkisinin, daha önce aynı makinada işlem gören benzer işlerin sayısına bağlı olduğu düşünülmektedir.

Aşağıdaki ifadeler önerdiğimiz yeni modeli tanıtmaktadır.

$$p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j} \quad j = (1, \dots, n) \quad (2.1)$$

Burada  $p_{j[r]}$ ,  $j$  işinin gerçek işlem zamanı,  $p_j$  temel işlem zamanı ve  $a_j$  ( $a_j < 0$ ) işe bağımlı öğrenme endeksi ve  $r_j$ ,  $j$  işinden önce çizelgelenen benzer işlerin sayısıdır.

$$r_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} X_{ik} \quad j = (1, \dots, n) \quad (2.2)$$

Burada,  $j$  işi  $i$  işine benzer ise  $R_{ji}=1$ , değil ise  $R_{ji}=0$ .  $i$  işi  $k$  konumunda çizelgelenir ise  $X_{ik} = 1$ , aksi takdirde  $X_{ik}=0$  dır.

Tablo 2.1. Benzerlik İlişki Matrisi

Benzerlik İlişkisi		$j$ işleri					
		1	2	3	4	5	6
$i$ işleri	1	1	1	0	1	0	0
	2	1	1	0	0	1	1
	3	0	0	1	1	1	0
	4	1	0	1	1	0	1
	5	0	1	1	0	1	1
	6	0	1	0	1	1	1

Örnek olarak 6 işli tek makina çizelgeleme problemini inceleyelim. Çizelgeleme 1-2-6-5-4-3 şeklinde olduğunu varsayalım. Tablo 2.1.deki verileri kullanarak bu çizelgeye ait ilk iki sırada çizelgelenen işlerin  $r_j$  değerlerini,  $r_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^v R_{ji} X_{ik}$  eşitliğini kullanarak bulalım.

İlk sırada çizelgelenen iş ( $p_1$ ) için

$$\begin{aligned}
 r_1 &= \sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^1 R_{1i} X_{i1} \\
 &= (R_{11} x_{11} + R_{12} x_{21} + R_{13} x_{31} + R_{14} x_{41} + R_{15} x_{51} + R_{16} x_{61}) \\
 &= (1*1 + 1*0 + 0*0 + 1*0 + 0*0 + 0*1) \\
 &= 1 \text{ elde edilir}
 \end{aligned}$$

İkinci sırada çizelgelenen iş ( $p_2$ ) için

$$\begin{aligned}
 r_2 &= \sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^2 R_{2i} X_{i1} + R_{2i} X_{i2} \\
 &= (R_{21} x_{11} + R_{21} x_{12}) + (R_{22} x_{21} + R_{22} x_{22}) + (R_{23} x_{31} + R_{23} x_{32}) + (R_{24} x_{41} + R_{24} x_{42}) \\
 &+ (R_{25} x_{51} + R_{25} x_{52}) + (R_{26} x_{61} + R_{26} x_{62}) \\
 &= (1*1 + 1*0) + (1*0 + 1*1) + (0*0 + 0*0) + (0*0 + 0*0) + (1*0 + 1*0) + (1*0 + 1*0) \\
 &= 2 \text{ elde edilir.}
 \end{aligned}$$

Benzer işlemler diğer  $r_j$  değerleri için de yapıldığında üçüncü sırada çizelgelenen  $p_6$  işi için  $r_3=2$ , dördüncü sırada çizelgelenen  $p_5$  işi için  $r_4=3$ , beşinci sırada çizelgelenen  $p_4$  işi için  $r_5=3$  ve altıncı sırada çizelgelenen  $p_3$  işi için  $r_6=3$  elde edilmiştir.

Bu çalışmada aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

- Her işin temel işlem süresi bilinir ve deterministik yapıya sahiptir.
- İşin ön işlemine izin verilmez, yani bir iş bir makinada işlemeye başladığında, bu makinada herhangi bir kesinti olmadan işlemeyi bitirmesi gerekir.
- İşler tek makina altında çizelgelenmektedir.
- Tüm işler ve makina sıfır zamanda hazırdir
- Makinada herhangi bir zamanda yalnızca bir iş işlenebilir [54].

Eşitlik 2.1 ve 2.2 kullanılarak maksimum tamamlanma zamanı (makespan)( $C_{max}$ ), toplam tamamlanma zamanı ( $\sum C$ ), tamamlanma zamanlarının farkları toplamı (TADC) performans ölçütleri kullanılarak çizelgeleme problemlerinin sıra bağımlı ve iş tabanlı öğrenme etkisi altında matematiksel modeli sunulacaktır.

Problem çözümünde kullanılacak olan notasyon ve varsayımlar aşağıdaki gibi Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Problemden Kullanılacak Parametre ve Açıklamaları

PARAMETRELER	
$n$	iş sayısı
$r$	iş sırası
$p_j$	$j$ işinin temel zamanı
$p_{jr}$	$r$ 'inci pozisyondaki $j$ işinin temel zamanı
$p_{j[r]}$	$r$ 'inci pozisyondaki $j$ işinin öğrenme etkisi altındaki gerçek zamanı
$a_j$	$j$ işinin öğrenme indeksi
$x_{ik}$	$k$ 'inci pozisyonda $i$ işinin olması durumu
$R_{ij}, R_{ji}$	$i$ işinin $j$ işine ve $j$ işinin $i$ işine benzerlik durumu

Problemin çözümünde kullanılacak olan performans ölçütleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Çizelgeleme Problemleri

ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ	
$C_{mak}$	Maksimum tamamlanma zamanı
$\sum C$	Toplam tamamlanma zamanı
TADC	Tamamlanma zamanlarının farkının toplamı



### 2.1.1. Maksimum Tamamlanma Zamanı Minimizasyon Problemi

Burada  $n$  işe sahip tek makina altında çizelgeleme problemi ele alınmaktadır.  $p_{j[r]}$   $k$  konumunda çizelgelenen  $j$  işinin işlem süresidir.  $C_{max}$  maksimum tamamlanma süresini belirtir. Tek makina çizelgelemede, klasik tamamlanma zamanı minimizasyon probleminin değeri sıradan bağımsızdır ve pozisyona bağlı öğrenme etkisi altındaki tamamlanma zamanı minimizasyon problemi, en kısa işlem süresi (SPT) kuralına göre en uygun şekilde çözülür [2]. Aşağıdaki atama probleminin çözümü optimal sonucu vermektedir.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n p_{j[r]} X_{jr} \\
 & \text{s.t.} \\
 & \sum_{j=1}^n X_{jr} \quad r = (1, \dots, n) \\
 & \sum_{r=1}^n X_{jr} \quad j = (1, \dots, n)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$X_{jr} = 0 \text{ ya da } 1$$

Tek makinada sıra bağımlı iş tabanlı öğrenme etkisi altında çizelgeleme probleminin çözümünde kullanılacak maksimum tamamlanma zamanı ifadesi  $(1/p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j}, r_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} X_{ik} / C_{max})$  şeklinde hesaplanır.

$p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j}$  ise bu modelin matematiksel modeli şu şekildedir.

Amaç fonksiyonu:

$$C_{max} = \min \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n (p_j)(r_j)^{a_j} \quad j, r = (1 \dots n) \tag{2.4}$$

$$r_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} X_{ik} \quad j, r = (1 \dots n) \tag{2.5}$$

Burada Eşitlik 2.5, Eşitlik 2.4'de yerine konur ise aşağıdaki Eşitlik 2.6 elde edilir. Buradaki amaç, sıra bağımlı iş tabanlı öğrenme etkisi altında çizelgede yer alan  $j$  işinden önce benzer olan işlerin sayısını bularak  $j$  işinin öğrenme etkisi altında gerçek işlem zamanını hesaplamaktır.

$$C_{max} = \min \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n (p_j) \left( \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} x_{ik} \right)^{a_j} \quad j, r = (1 \dots n) \quad (2.6)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n x_{jr} = 1 \quad r = (1, \dots, n) \quad (2.7)$$

$$\sum_{r=1}^n x_{jr} = 1 \quad j = (1, \dots, n) \quad (2.8)$$

$$x_{jr} = 0 \text{ veya } 1$$

Kısıt 2.7,  $r$  1'den  $n$ 'e kadar bir sayıyı ifade etsin. Bu kısıt herhangi bir  $j$  işinin yalnızca bir pozisyona atanabileceğini göstermektedir. Kısıt 2.8,  $j$  1'den  $n$ 'e kadar bir sayıyı ifade etsin. Bu kısıt ise herhangi bir  $r$  pozisyonuna yalnızca bir işin atanabileceğini garanti etmektedir.

### 2.1.2. Toplam Tamamlanma Zamanı Minimizasyon Problemi

Tek makina çizelgelemede, hem toplam tamamlanma süresi minimizasyon problemi hem de pozisyona bağlı öğrenme etkisi altındaki modeli en kısa işlem süresi (SPT) kuralına göre en uygun şekilde çözülür.  $j$  işinin  $r$  pozisyonuna atandığında, konum ağırlıkları  $w_j = (n - r + 1)$ ,  $j=1, \dots, n$ ' dir. Aşağıdaki atama probleminin çözümü optimal sonucu vermektedir [2-3].

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n (n - r + 1) p_{j[r]} X_{jr}$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^n X_{jr} \quad r = (1, \dots, n) \quad (2.9)$$

$$\sum_{r=1}^n X_{jr} \quad j = (1, \dots, n)$$

$X_{jr} = 0$  ya da 1

Tek makinada sıra bağımlı iş tabanlı öğrenme etkisi altında çizelgeleme probleminin çözümünde kullanılacak toplam tamamlanma zamanı ifadesi  $(1/p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j}$ ,  $r_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} X_{ik} / \sum C$ ) şeklinde hesaplanır.

$p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j}$  ise bu ifadenin matematiksel modeli şu şekildedir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min \sum C_j = \min \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n (n-r+1)(p_j) \left( \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} x_{ik} \right)^{a_j} \quad j, r = (1 \dots n) \quad (2.10)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n x_{jr} = 1 \quad r = (1, \dots, n) \quad (2.11)$$

$$\sum_{r=1}^n x_{jr} = 1 \quad j = (1, \dots, n) \quad (2.12)$$

$x_{jr} = 0$  veya 1

Kısıt 2.11,  $r$  1'den  $n$ 'e kadar bir sayıyı ifade etsin. Bu kısıt herhangi bir  $j$  işinin yalnızca bir pozisyona atanabileceğini göstermektedir. Kısıt 2.12,  $j$  1'den  $n$ 'e kadar bir sayıyı

ifade etsin. Bu kısıt ise herhangi bir  $r$  pozisyonuna yalnızca bir işin atanabileceğini garanti eder.

### 2.1.3. Tamamlanma Zamanlarının Farkının Toplamı Minimizasyon Problemi (TADC)

TADC problemi için Kanet [55],  $j$  işinin  $r$  pozisyonuna atandığında, konum ağırlıkları  $w_j = (j - 1)(n - j + 1)$ ,  $j=1, \dots, n$  dir. TADC problemi aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$TADC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n |c_i - c_j| \quad (2.13)$$

Burada  $c_i$  ve  $c_j$  ifadesi tamamlanma zamanlarını belirtir. Aşağıdaki atama probleminin çözümü optimal sonucu vermektedir.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n (r - 1)(n - r + 1) p_{j[r]} X_{jr} \\ & \text{s.t.} \\ & \sum_{j=1}^n X_{jr} \quad r = (1, \dots, n) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\sum_{r=1}^n X_{jr} \quad j = (1, \dots, n)$$

$X_{jr} = 0$  ya da  $1$

Tek makinada sıra bağımlı iş tabanlı öğrenme etkisi altında çizelgeleme probleminin çözümünde kullanılacak tamamlanma zamanlarının farkının toplamı ifadesi  $(1/p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j}, r_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} X_{ik} / TADC)$  şeklinde hesaplanır.

$p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j}$  ise bu ifadenin matematiksel modeli şu şekildedir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min Z = \min \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n (r-1)(n-r+1)(p_j) \left( \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} x_{ik} \right)^{a_j} \quad j, r = (1 \dots n) \quad (2.15)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n x_{jr} = 1 \quad r = (1, \dots, n) \quad (2.16)$$

$$\sum_{r=1}^n x_{jr} = 1 \quad j = (1, \dots, n) \quad (2.17)$$

$$x_{jr} = 0 \text{ veya } 1$$

Kısıt 2.16,  $r$  1'den  $n$ 'e kadar bir sayıyı ifade etsin. Bu kısıt herhangi bir  $j$  işinin yalnızca bir pozisyona atanabileceğini göstermektedir. Kısıt 2.17,  $j$  1'den  $n$ 'e kadar bir sayıyı ifade etsin. Burada herhangi bir  $r$  pozisyonuna yalnızca bir işin atanabileceğini garanti eder.

Aşağıda verilen sayısal örnek maksimum tamamlanma zamanı, toplam tamamlanma zamanı ve tamamlanma zamanlarının farkının toplamı performans ölçütleri için Lingo 17.0 programında çözdürülmüştür.

**Sayısal Örnek 1:** 6 işe sahip tek makina çizelgeleme ortamını ele alalım. Bu iş dizisinin işlem zamanları ve öğrenme indeksleri aşağıda tablo 2.4' te verilmiştir.

Tablo 2.4. Sayısal örnek verileri

<b>j</b>	1	2	3	4	5	6
<b>p<sub>j</sub></b>	2	3	5	8	10	6
<b>a<sub>j</sub></b>	0,8	0,75	0,7	0,75	0,8	0,75

Tablo 2.4’de yer alan  $p_j$  ve  $a_j$  ifadeleri uniform olarak üretilmiştir.  $a_j$  ifadesinin hesaplanması aşağıdaki gibidir.

$$\text{Öğrenme İndeksi} \left( a = \frac{\log(a_j)}{\log(2)} \right) \quad (2.18)$$

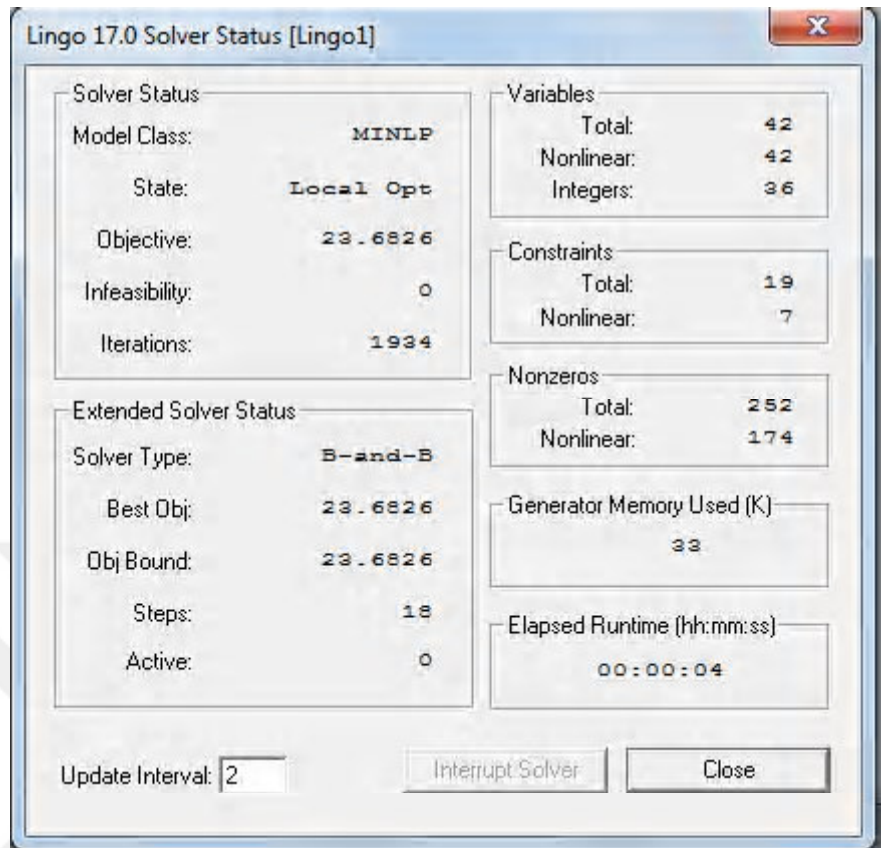
Problem çözümünde kullanılacak işler arasındaki benzerlik ilişkisi matrisi aşağıda Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5. Örnek problemin tüm işler için benzerlik ilişkisi matrisi

Benzerlik İlişkisi		$j$ işleri					
		1	2	3	4	5	6
$i$ işleri	1	1	1	0	1	0	0
	2	1	1	0	0	1	1
	3	0	0	1	1	1	0
	4	1	0	1	1	0	1
	5	0	1	1	0	1	1
	6	0	1	0	1	1	1

Sayısal Örnek 1 için Tablo 2.4 ve 2.5’de yer alan değerler kullanılarak maksimum tamamlanma zamanı minimizasyon problemi Lingo 17.0 programı ile çözdürülmüştür. Çözüm sonuçlarına göre amaç fonksiyonunun optimum değeri 23,68263 bulunmuş, optimal çizelge 1-2-6-5-4-3 olarak elde edilmiştir.

Problem çözümü sonucunda Lingo 17.0’den elde edilen çözüm sonuçları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1.  $C_{max}$  Problemi Lingo 17.0 Çözüm Ekranı

Lingo 17.0 Programının çözümüne ek olarak  $C_{max}$  problemi için elde edilen sonucun çözüm değerlerinin hesaplaması aşağıdaki gibidir.

Tablo 2.6.  $C_{max}$  için işlerin sıralaması ve konumları

Konum	r=1	r=2	r=3	r=4	r=5	r=6
Optimum Sıralama	1	2	6	5	4	3
$p_j$	2	3	6	10	8	5
$a_j$	0,8	0,75	0,75	0,8	0,75	0,7

$p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j}$  eşitliğini kullanarak çözümleri gerçekleştirelim:

$$p_{1[1]} = (p_1)(r_1)^{a_1} = 2 \times 1^{\log(0,8/\log(2))} = 2$$

$$p_{2[2]} = (p_2)(r_2)^{a_2} = 3 \times 2^{\log(0,75/\log(2))} = 2,25$$

$$p_{6[3]} = (p_6)(r_6)^{a_6} = 6 \times 2^{\log(0,75/\log(2))} = 4,5$$

$$p_{5[4]} = (p_5)(r_5)^{a_5} = 10 \times 3^{\log(0,8/\log(2))} = 7,02$$

$$p_{4[5]} = (p_4)(r_4)^{a_4} = 8 \times 3^{\log(0,75/\log(2))} = 5,07$$

$$p_{3[6]} = (p_3)(r_3)^{a_3} = 5 \times 3^{\log(0,7/\log(2))} = 2,84$$

$$C_{max} = \min \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n (p_j) \left( \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} x_{ik} \right)^{a_j} = 2 + 2,25 + 4,5 + 7,02 + 5,07 + 2,84$$

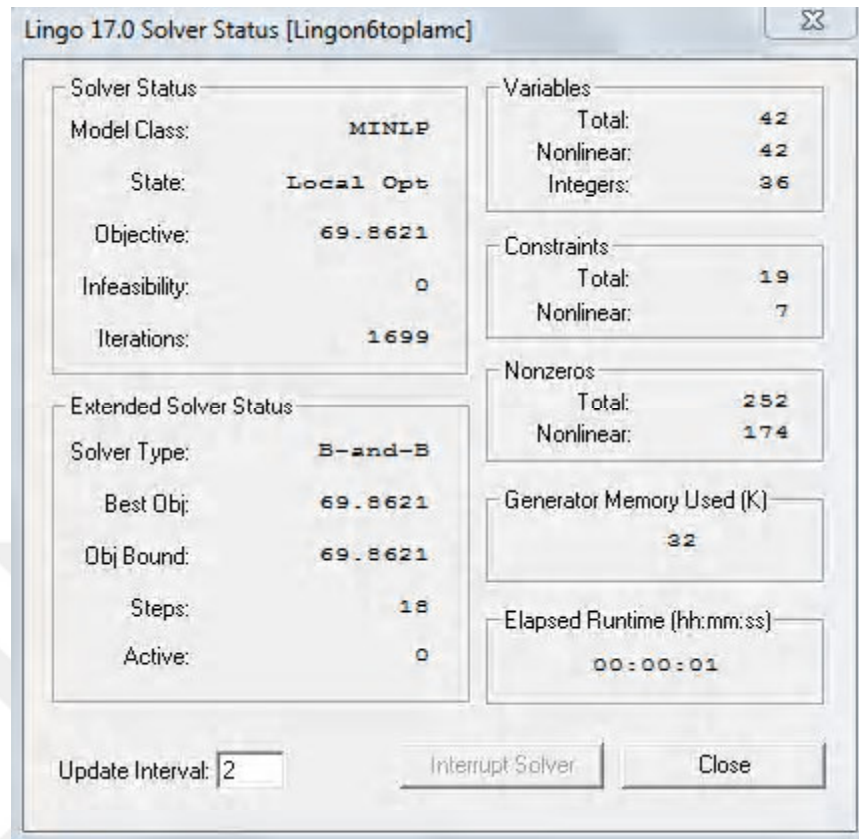
$$= 23,68$$

olarak elde edilir.

Sayısal Örnek 1 için Tablo 2.4 ve 2.5’de yer alan değerler kullanılarak toplam tamamlanma zamanı minimizasyon problemi Lingo 17.0 programı ile çözdürülmüştür. Çözüm sonuçlarına göre amaç fonksiyonu optimum değeri 69,86206 bulunmuş, optimal çizelge 1-2-6-4-3-5 olarak elde edilmiştir.

Problem çözümü sonucunda Lingo 17.0’den elde edilen çözüm sonuçları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.





Şekil 2.2.  $\Sigma C$  Problemi Lingo 17.0 Çözüm Ekranı

Lingo 17.0 Programının çözümüne ek olarak  $\Sigma C$  problemi için elde edilen sonucun çözüm değerlerinin hesaplaması aşağıdaki gibidir.

Tablo 2.7.  $\Sigma C$  için işlerin sıralaması ve konumları

Konum	r=1	r=2	r=3	r=4	r=5	r=6
Optimum Sıralama	1	2	6	4	3	5
$p_j$	2	3	6	8	5	10
$a_j$	0,8	0,75	0,75	0,75	0,7	0,8

$p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j}$  eşitliğini kullanarak çözümleri gerçekleştirelim.

$$p_{1[1]} = (p_1)(r_1)^{a_1} = 2 \times 1^{\log(0,8/\log(2))} = 2$$

$$p_{2[2]} = (p_2)(r_2)^{a_2} = 3 \times 2^{\log(0,75/\log(2))} = 2,25$$

$$p_{6[3]} = (p_6)(r_6)^{a_6} = 6 \times 2^{\log(0,75/\log(2))} = 4,5$$

$$p_{4[4]} = (p_4)(r_4)^{a_4} = 8 \times 3^{\log(0,75/\log(2))} = 5,07$$

$$p_{3[5]} = (p_3)(r_3)^{a_3} = 5 \times 2^{\log(0,7/\log(2))} = 3,5$$

$$p_{5[6]} = (p_5)(r_5)^{a_5} = 10 \times 4^{\log(0,8/\log(2))} = 6,4$$

$$C_1 = 2$$

$$C_2 = 2 + 2,25 = 4,25$$

$$C_6 = 4,25 + 4,5 = 8,75$$

$$C_4 = 8,75 + 5,07 = 13,82$$

$$C_3 = 13,82 + 3,5 = 17,32$$

$$C_5 = 17,32 + 6,4 = 23,72$$

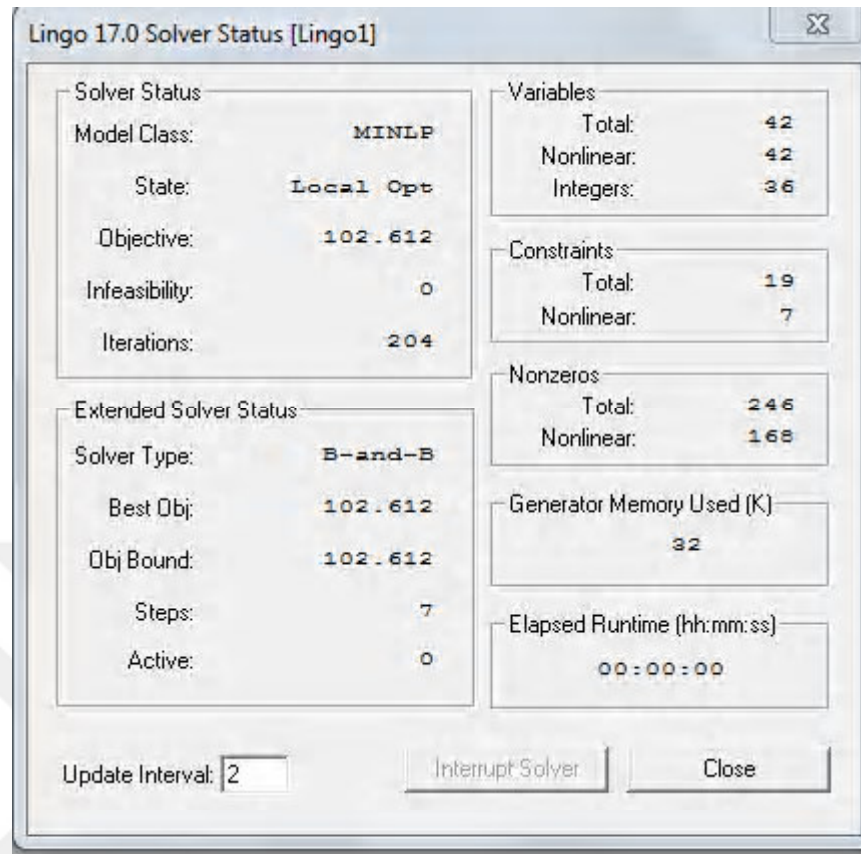
elde edilir.

$$\begin{aligned} \min \sum C_j &= \min \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n (n-r+1)(p_j) \left( \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} x_{ik} \right)^{a_j} \\ &= 2 + 4,25 + 8,75 + 13,82 + 17,32 + 23,72 = 69,86 \end{aligned}$$

olarak elde edilir.

Sayısal Örnek 1 için Tablo 2.4 ve 2.5’de yer alan değerler kullanılarak tamamlanma zamanlarının farkları toplamı minimizasyon problemi Lingo 17.0 programı ile çözdürülmüştür. Çözüm sonuçlarına göre amaç fonksiyonu optimum değeri 102,6121 bulunmuş, optimal çizelge 5-6-2-1-3-4 olarak elde edilmiştir.

Problem çözümü sonucunda Lingo 17.0’den elde edilen çözüm sonuçları Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. TADC Problemi Lingo 17.0 Çözüm Ekranı

Lingo 17.0 Programının çözümüne ek olarak TADC problemi için elde edilen sonucun çözüm değerlerinin hesaplanması aşağıdaki gibidir.

Tablo 2.8. TADC için işlerin sıralaması ve konumları

Konum	r=1	r=2	r=3	r=4	r=5	r=6
Optimum Sıralama	5	6	2	1	3	4
$p_j$	10	6	3	2	5	8
$a_j$	0,8	0,75	0,75	0,8	0,7	0,75

$p_{j[r]} = (p_j)(r_j)^{a_j}$  eşitliğini kullanarak çözümleri gerçekleştirilelim.

$$p_{5[1]} = (p_5)(r_5)^{a_5} = 10 \times 1^{\log(0,8/\log(2))} = 10$$

$$p_{6[2]} = (p_6)(r_6)^{a_6} = 6 \times 2^{\log(0,75/\log(2))} = 4,5$$

$$p_{2[3]} = (p_2)(r_2)^{a_2} = 3 \times 3^{\log(0,75/\log(2))} = 1,90$$

$$p_{1[4]} = (p_1)(r_1)^{a_1} = 2 \times 2^{\log(0,8/\log(2))} = 1,6$$

$$p_{3[5]} = (p_3)(r_3)^{a_3} = 5 \times 2^{\log(0,7/\log(2))} = 3,5$$

$$p_{4[6]} = (p_4)(r_4)^{a_4} = 8 \times 4^{\log(0,75/\log(2))} = 4,5$$

$$C_5 = 10$$

$$C_6 = 10 + 4,5 = 14,5$$

$$C_2 = 14,5 + 1,9 = 16,4$$

$$C_1 = 16,4 + 1,6 = 18$$

$$C_3 = 18 + 3,5 = 21,5$$

$$C_4 = 21,5 + 4,5 = 26 \quad \text{elde edilir.}$$

5 no' lu iş için;

$$|10 - 14,5| + |10 - 16,4| + |10 - 18| + |10 - 21,5| + |10 - 26| = 46,4$$

6 no' lu iş için;

$$|14,5 - 16,4| + |14,5 - 18| + |14,5 - 21,5| + |14,5 - 26| = 23,9$$

2 no' lu iş için;

$$|16,4 - 18| + |16,4 - 21,5| + |16,4 - 26| = 16,3$$

1 no' lu iş için;

$$|18 - 21,5| + |18 - 26| = 11,5$$

3 no' lu iş için;

$$|21,5 - 26| = 4,5$$

$$\begin{aligned} \min Z &= \min \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n (r-1)(n-r+1)(p_j) \left( \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r R_{ji} x_{ik} \right)^{a_j} \\ &= 46,4 + 23,9 + 16,3 + 11,5 + 4,5 = 102,6 \end{aligned}$$

olarak elde edilir.

## 2.2. Önerilen Tabu Tavlama Benzetim Algoritması

Burada performans ölçütlerinin çözümünde kullanılacak sezgisel yaklaşım tekniklerinden biri olan tabu tavlama benzetim algoritması incelenecektir.

Tabu arama yöntemi ilk olarak Glover [55] tarafından ortaya atılan meta sezgisel bir tekniktir. Glover, bu ilk çalışmasında kombinatoriyel optimizasyon problemlerinin çözümü için tabu aramanın temel prensiplerini açıklamıştır. Tabu arama, çizelgelemeden kümeleme analizine kadar değişik alanlarda başarılar sağlamıştır [56].

Tabu arama yöntemi genel olarak dört adımdan oluşur [57]:

- Başlangıç çözümünün belirlenmesi
- Komşu arama stratejisi
- Tabu listesi uzunluğunun belirlenmesi
- Durdurma kriteri

### 2.2.1. Başlangıç Çözümünün Belirlenmesi

Tabu arama metodunda iyi bir sonuç elde etmenin yolu iyi bir başlangıç çözümünü kullanmaktır. Buda bizim daha iyi sonuçlara ulaşmamızı sağlar. Literatürde başlangıç çözümü bulmak için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlere örnek olarak en kısa işlem süresi kuralı (SPT), en küçük teslim tarihi kuralı (EDD) verilebilir.

Bu çalışmada probleme konu olan performans ölçütlerini iyileştirmek adına başlangıç çözümü bulmak için en kısa işlem süresi kuralı (SPT) kullanılmış ve bu SPT kuralından daha iyi sonuç vermesi bakımından rastgele bir başlangıç çözümünün bulunması hedeflenmiştir. SPT kuralı ile elde edilen başlangıç çözümünün belirlenmesi için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

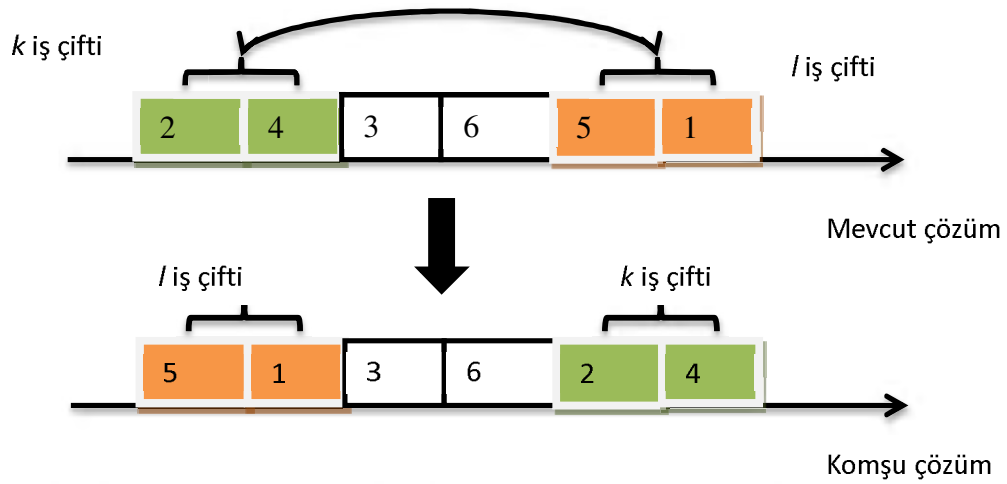
- Verilen iş sırası için SPT çizelgesini belirle ve amaç fonksiyonu değerini bul.

- ▶ Verilen iş sırası için rastgele olacak şekilde bir çözüm üret, üretilen bu çözümün çizelgesini belirle ve amaç fonksiyonu değerini bul
- ▶ Eğer üretilen rastgele çözüm, belirlenen SPT çözümünden daha iyi değil ise, bir önceki adıma geri dön ve tekrar bir rastgele çözüm üret.
- ▶ Eğer üretilen rastgele çözüm, belirlenen SPT çözümünden daha iyi ise, rastgele üretilen çözümü başlangıç çözüm olacak şekilde kabul et.

### **2.2.2. Komşu Arama Stratejisi**

Bir tabu aramada öncelikle eldeki mevcut çözümden yeni çözüm arayan bir komşu üretim stratejisi belirlenmelidir. Literatürde pek çok komşu üretme mekanizması bulunmaktadır. Bu yöntemlere örnek olarak çiftli yer değiştirme mekanizması (SWAP), yerleştirme (insertion) mekanizması örnek olarak verilebilir [51].

Önerilen algoritmada komşu arama stratejisi rastgele seçilen bitişik bir iş çiftinin başka bir bitişik iş çiftiyle yer değiştirmesi esasına dayanır. Bu strateji genel olarak API (Adjacent pairwise interchange) olarak adlandırılır. Burada bitişik iş çiftleri yer değiştirirken çizelgede bulunan diğer işlerin yerlerinde bir değişiklik olmaz. Örnek olarak aşağıdaki Şekil 2.4’de bir komşu arama mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Komşu arama stratejisi

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi 6 işli bir çizelgede  $k$  iş çifti ile  $l$  iş çifti yer değiştirmiş diğer işlerin yerlerinde herhangi bir değişiklik olmamıştır.

### 2.2.3. Tabu Listesi Uzunluğunun Belirlenmesi

Tabu arama algoritmasının işlemlere devam etmesi sırasında bazı seçimlere izin verilmez ve bu seçimler yasaklanır. Yasaklı hale gelen bu seçimler tabu olarak adlandırılır ve diğer seçimlerden ayırt edilir. Yasaklı seçimlerin bulunduğu hafızaya, yani listeye tabu listesi adı verilir. Tabu listesinin hafızası, ele alınan problemin performansını etkileyen bir ölçüttür. Deneysel çalışmalar sonucu tabu listesi hafızasının, söz konusu problemin büyüklüğü ile doğrusal olacak şekilde büyümesi gerektiğini işaret etmektedir [58].

Tabu arama algoritmasının parametrelerinden bir diğeri tabu listesinin büyüklüğüdür. Gerekli olan hafıza uzayının büyüklüğü, nitelik ve komşuluk büyüklüğüne bağlıyken tabu listesi uzunluğu büyüklüğe bağlı değildir. Tabu listesi uzunluğunun doğru belirlenmesi bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Şöyle ki tabu listesi uzunluğunun küçük tutulması algorithmada daha önce denenmiş çözümlerin tekrar denenmesine, yani kısır bir döngüye girmesine neden olurken, aynı şekilde tabu listesi uzunluğunun gereğinden büyük tutulması algoritmanın hiçbir şekilde hareket yapamadan tıkanmasına

sebeplendir. Tabu listesi, yasaklı olan çözümlerin ya da hareket niteliklerinin saklandığı listedir [59].

Çalışmada tabu listesindeki liste uzunluğunun gereğinden fazla olması durumunda ortaya çıkabilecek olumsuzluklardan sakınmak için liste uzunluğunun sabit bir şekilde tutularak sınırlı tabu listesi önerilmiştir. Bunu yaparken de literatürde çokça kullanılan tekniklerden biri olan FIFO (first in first out) ilk giren ilk çıkar yöntemi ele alınmıştır. Bu yöntem ile tabu listesine alınacak çözümler, mevcut olarak bulunan en iyi çözümden rastgele olacak şekilde üretilen ve çok daha iyi çözüm veren komşu çözümlerdir. Tabu listesi uzunluğu yapılan çalışma sonucu  $n$  iş sayısını göstermek üzere  $n/10$  olacak şekilde belirlenmiştir. Çalışmada üretilen komşu sayısı  $n$  iş sayısını göstermek üzere  $n/7$  olacak şekilde belirlenmiştir. Üretilen komşu çözümlerden her biri mevcut olan en iyi çözümden daha iyi ise, bu yeni en iyi çözüm olacak şekilde kabul edilir. İterasyon sayısı ilerledikçe elde edilen en iyi çözüme sahip iş çiftleri değiştirme mekanizması kullanılarak tabu listesine alınır. Alınan bu iş çiftleri komşu çözümü üretmek için sonraki iterasyonlarda tabu listesinde mevcut ise çözüme gidilmesi yasaklı hale getirilir. Örnek olarak aşağıda Şekil 2.5’de tabu listesi oluşturulmuştur.  $n$  iş sayısı olmak üzere  $n/10 = 40/10 = 4$  satır uzunluğunda tabu listesi yapısı elde edilmiştir.



*n= 40 iş için oluşturulan tabu listesi*

34	6	20	23
2	4	39	1
8	15	33	11
19	5	27	25



*Tabu listesine giren rastgele seçilmiş ilk iş çiftleri*



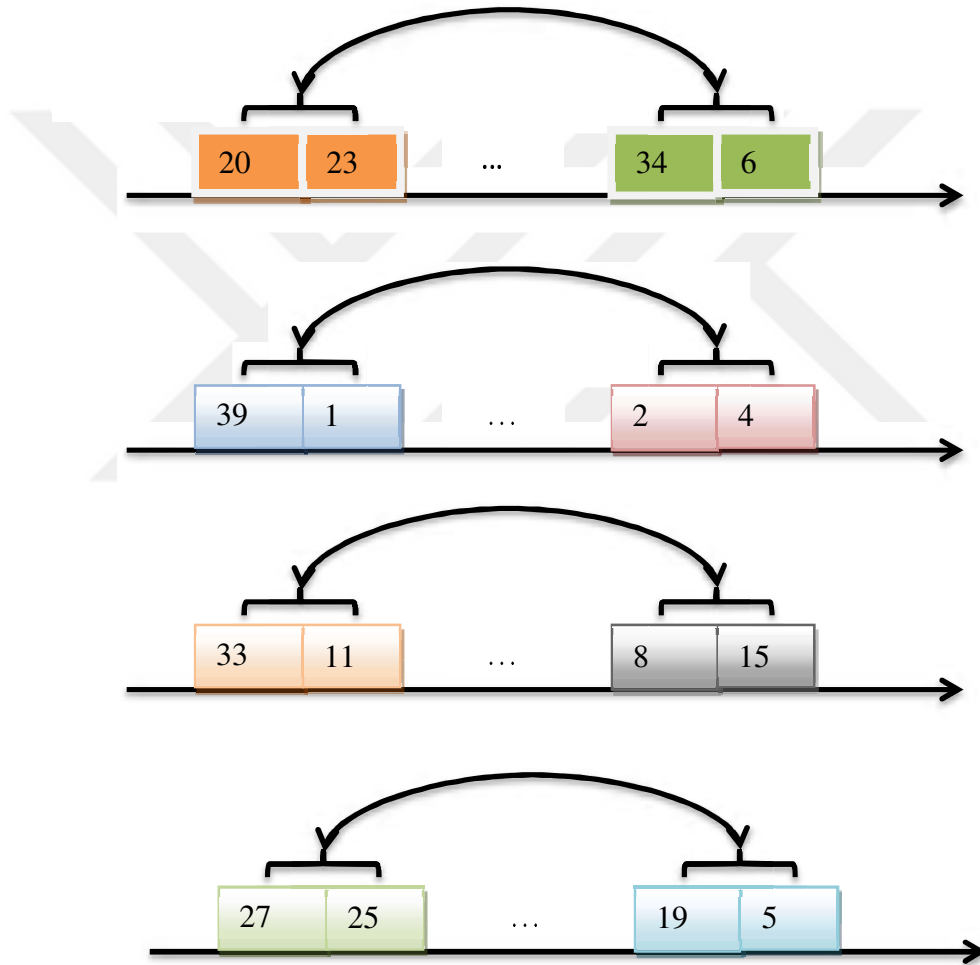
*Tabu listesine giren rastgele seçilmiş ikinci iş çiftleri*



*Tabu listesine giren rastgele seçilmiş üçüncü iş çiftleri*



*Tabu listesine giren rastgele seçilmiş dördüncü iş çiftleri*



Şekil 2.5. Tabu Listesinin Oluşturulması Örneği

#### 2.2.4. Durdurma Kriteri

Tabu arama algoritması, durdurma kriteri sağlanana kadar devam eder. Literatürde mevcut olan bazı kriterler aşağıda verilmiştir [60].

- i. Seçilen bir komşu çözümün komşusunun olmaması
- ii. Belirli bir iterasyon sayısına ulaşılması
- iii. Belirli bir çözüm değerine ulaşılması
- iv. Algoritmanın çözümün bir yerinde takılması ve daha iyi sonuç üretememesi

Çalışmada tabu arama algoritmasının durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısına ulaşılması durumunda durdurma kriteri kullanılmıştır.

Tabu arama algoritmasının çözümünde kullanılan parametreler aşağıdaki Tablo 2.9'da gösterilmiştir.

Tablo 2.9. Tabu arama parametreleri

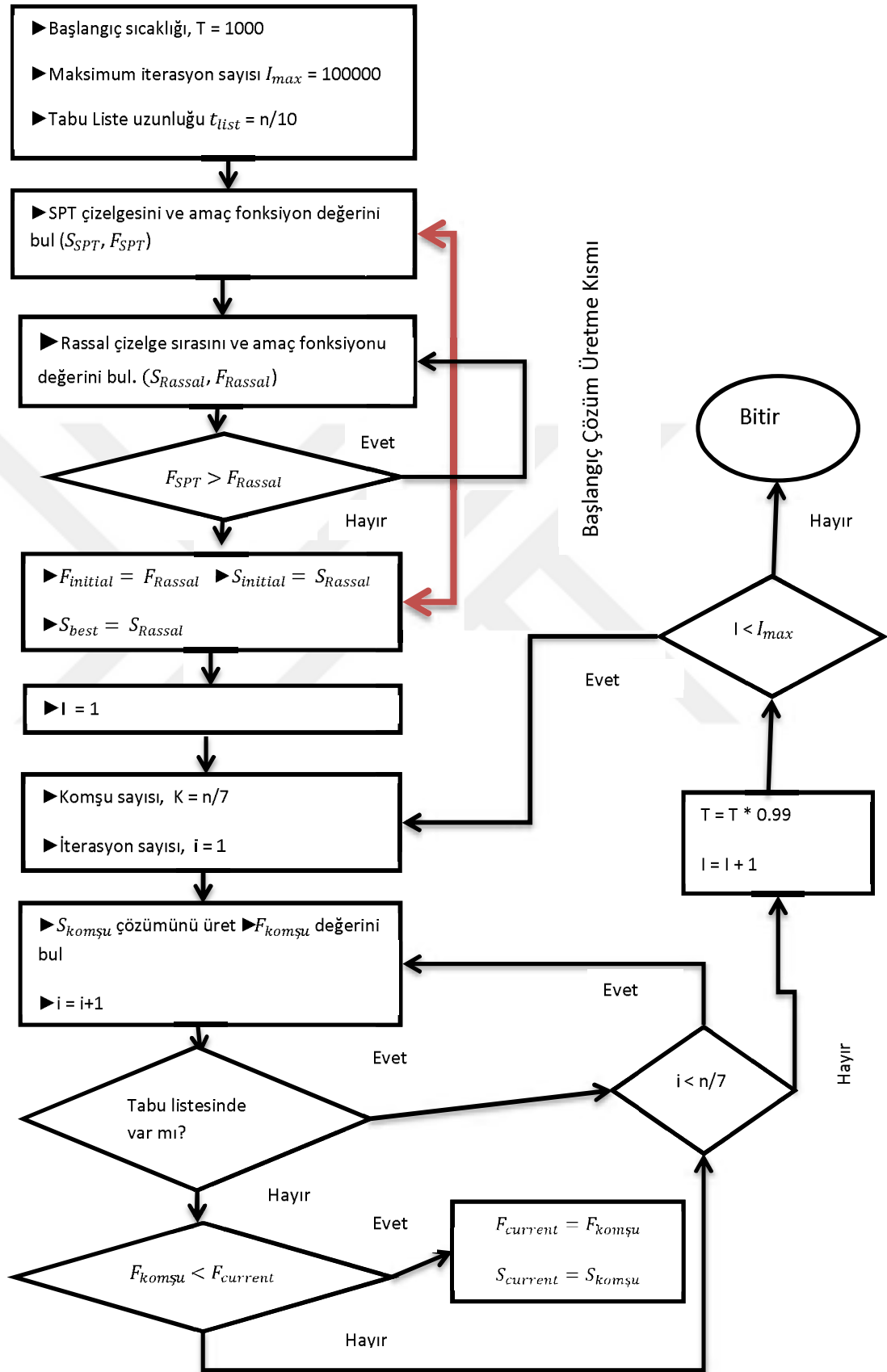
Parametreler	Değerleri
Başlangıç çözümü	SPT kuralı
Tabu listesi uzunluğu	$n/10$
Komşu arama stratejisi	API
Durdurma kriteri	Maksimum iterasyon sayısı

### 2.3. Problem Çözümünde Önerilen Tavlama Benzetim Algoritması

Çalışmada problemi çözmek için yeni bir tavlama benzetim algoritması önerilmiştir. Burada tabu listesi uzunluğu  $n/7$ , başlangıç sıcaklığı  $T$  olmak üzere  $T=1000$ , sıcaklık azalma katsayısı 0,99 ve iterasyon sayısı  $I_{max}=100.000$  olarak belirlenmiştir. Algoritmada izlenecek yol aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

- Önerilen başlangıç çözümü yaklaşımı ile elde edilen başlangıç çözüm değerini en iyi çözüm olacak şekilde belirle.
- İterasyon sayısını bir artır ( $I=1$ )
- Komşu sayısını  $K=n/7$  olacak şekilde belirle ve  $K$  sayıda komşu üret.
- Komşu çözüm üret ( $i=1$ )
- Üretilen komşu çözümün çizelgesinin tabu listesinde var olup olmadığını kontrol et.

- ▶ Eğer üretilen komşu çözüm çizelgesi tabu listesinde ise;
  - ▶ Üretilen komşu çözüm sayısının  $K=n/7$  komşu sayısından küçük olup olmadığını kontrol et.
  - ▶ Eğer komşu çözüm sayısı  $K=n/7$ 'den küçük ise yeni komşu çözüm üret.
  - ▶ Eğer komşu çözüm sayısı  $K=n/7$ 'den küçük değil ise komşu çözüm üretmeyi durdur. İterasyon sayısını bir artır ve sıcaklığı azalt ( $T=T*0.99, I=I+1$ ).
  - ▶ İterasyon sayısını bir artırdıktan ve sıcaklığı düşürdüktan sonra iterasyon sayısının  $I_{max}$ 'dan küçük olup olmadığını kontrol et.
    - ▶ Eğer küçük ise yeni komşu üret.
    - ▶ Eğer küçük değil ise algoritmayı sonlandır.
- ▶ Eğer üretilen komşu çözüm tabu listesinde değil ise;
  - ▶ Komşu çözüm değeri mevcut çözüm değerinden daha iyi ise komşu çözümü mevcut çözüm olarak kabul et.
  - ▶ Komşu çözüm değeri mevcut çözüm değerinden daha iyi değil ise;
  - ▶ Üretilen komşu çözüm sayısının  $K=n/7$  komşu sayısından küçük olup olmadığını kontrol et.
  - ▶ Eğer komşu çözüm sayısı  $K=n/7$ 'den küçük ise yeni komşu çözüm üret.
  - ▶ Eğer komşu çözüm sayısı  $K=n/7$ 'den küçük değil ise komşu çözüm üretmeyi durdur. İterasyon sayısını bir artır ve sıcaklığı azalt ( $T=T*0.99, I=I+1$ ).
  - ▶ İterasyon sayısını bir artırdıktan ve sıcaklığı düşürdüktan sonra iterasyon sayısının  $I_{max}$ 'dan küçük olup olmadığını kontrol et.
    - ▶ Eğer küçük ise yeni komşu çözüm üret
    - ▶ Eğer küçük değil ise algoritmayı sonlandır.



Şekil 2.6. Önerilen tavlama benzetimi algoritmasının akış şeması

### 3. BÖLÜM

#### DENEYSEL ÇALIŞMA ve BULGULAR

Çalışmaya konu olan problemlerin  $p_j$  işlem zamanları [10 - 50], öğrenme indeksleri  $a_j$  ise [0,6 – 0,9] arasında uniform normal dağılım kuralına göre rastgele üretilmiştir. Problem boyutları  $n$  iş sayısını göstermek üzere,  $n=10$ ,  $n=12$ ,  $n=15$ ,  $n=20$ ,  $n=30$ ,  $n=50$  ve  $n=70$  iş sayısından oluşmakta ve benzerlik matrisi değerleri de rastgele bir şekilde elde edilmiştir. Performans ölçütlerinin amaç fonksiyonu değerlerini belirlemek için ilk önce üretilen test problemleri kullanılarak matematiksel modeller Lingo 17.0 programı kullanılarak 40 saat çalıştırılıp sonuçlar elde edilirken, daha sonra aynı test problemleri bu çalışmada önerilen yöntem olan tavlama benzetimi algoritmasının Microsoft Visual Studio 2010 içerisinde yer alan C# programlama dili yardımıyla çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen algorithmada her bir veri kümesi söz konusu her bir problem için 10 kez çözdürülmüş, elde edilen bu 10 çözüm değerinin ortalaması alınarak nispi hata oranlarını belirlemek için kullanılmıştır. Aşağıda Tablo 3.1’de üretilen veri setleri kullanılarak elde edilen performans ölçütleri için matematiksel model çözüm değerleri ve saniye cinsinden çözüm süreleri ile SPT ve önerilen algoritma ile elde edilen çözümler sunulmuştur.

Her problem boyutu için elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir.

İş sayısı  $n=10$  için matematiksel model ile elde edilen sonuçta  $C_{max}$  probleminin yerel optimal çözümü 169,88 iken, çizelge sırası 7-2-1-9-5-3-4-8-10-6 ve çözüm zamanı 249.29 saniye, SPT çözümü 181,37 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,068 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 6-2-10-3-9-5-1-7-8-4 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 168,67 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,007 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 167,57, en iyi çizelge sırası ise 10-2-6-3-7-5-1-8-4-9 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta

toplam tamamlanma zamanı ( $\sum C$ ) probleminin yerel optimal çözümü 871,58 iken, çizelge sırası 6-2-4-10-5-3-9-7-8-1 ve çözüm zamanı 366.47 saniye, SPT çözümü 940,03 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,079 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 6-2-10-3-9-5-1-7-8-4 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 870,87 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,001 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 865,35, en iyi çizelge sırası ise 10-2-6-3-7-5-1-8-9-4 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta tamamlanma zamanlarının farklarının toplamı (TADC) probleminin yerel optimal çözümü 2425,73 iken, çizelge sırası 7-4-2-1-6-5-10-9-8-3 ve çözüm zamanı 81.12 saniye, SPT çözümü 3121,13 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,287 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 6-2-10-3-9-5-1-7-8-4 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 2428,41 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,001 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 2406,55, en iyi çizelge sırası ise 8-4-3-10-2-6-5-1-9-7 olarak elde edilmiştir.

İş sayısı  $n=12$  için matematiksel model ile elde edilen sonuçta  $C_{max}$  probleminin yerel optimal çözümü 210,73 iken, çizelge sırası 7-11-1-2-10-6-12-3-8-5-4-9 ve çözüm zamanı 692.28 saniye, SPT çözümü 223,48 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,061 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 3-8-1-10-5-11-6-4-9-7-12-2 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 211,49 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,004 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 210,12, en iyi çizelge sırası ise 3-1-4-10-8-2-11-6-7-9-12-5 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta toplam tamamlanma zamanı ( $\sum C$ ) probleminin yerel optimal çözümü 1212,42 iken, çizelge sırası 4-6-1-12-3-8-11-2-9-5-7-10 ve çözüm zamanı 2688.59 saniye, SPT çözümü 1277,38 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,054 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 3-8-1-10-5-11-6-4-9-7-12-2 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 1227,31 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,012 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 1214,82, en iyi çizelge sırası ise 3-8-5-1-9-10-2-11-6-12-4-7 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta tamamlanma zamanlarının farklarının toplamı (TADC) probleminin yerel optimal

çözümü 3963,03 iken, çizelge sırası 7-2-6-1-9-4-12-5-8-3-10-11 ve çözüm zamanı 176.51 saniye, SPT çözümü 5746,72 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,45 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 3-8-1-10-5-11-6-4-9-7-12-2 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 4025,77 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,016 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 3965,58, en iyi çizelge sırası ise 7-4-10-8-3-5-1-11-2-9-6-12 olarak elde edilmiştir.

İş sayısı  $n=15$  için matematiksel model ile elde edilen sonuçta  $C_{max}$  probleminin yerel optimal çözümü 208,77 iken, çizelge sırası 13-1-15-14-12-9-11-6-7-10-2-5-8-4-3 ve çözüm zamanı 144072.53 saniye, SPT çözümü 223,47 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,07 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 11-2-14-12-1-8-5-9-13-3-7-15-10-6-4 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 213,07 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,021 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 211,72, en iyi çizelge sırası ise 2-11-14-12-8-9-13-15-6-1-3-5-10-4-7 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta toplam tamamlanma zamanı ( $\sum C$ ) probleminin yerel optimal çözümü 1391,95 iken, çizelge sırası 6-1-13-11-7-12-10-8-4-15-2-5-9-3-14 ve çözüm zamanı 88607.38 saniye, SPT çözümü 1543,99 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,109 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 11-2-14-12-1-8-5-9-13-3-7-15-10-6-4 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 1489,31 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,07 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 1455,86, en iyi çizelge sırası ise 2-11-14-5-9-1-12-8-6-13-7-4-3-10-15 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta tamamlanma zamanlarının farklarının toplamı (TADC) probleminin yerel optimal çözümü 5745,4 iken, çizelge sırası 10-12-15-13-11-14-7-4-6-1-5-9-3-8-2 ve çözüm zamanı 707.87 saniye, SPT çözümü 8574,29 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,492 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 11-2-14-12-1-8-5-9-13-3-7-15-10-6-4 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 6072,9 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,057 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 6012,04, en iyi çizelge sırası ise 10-4-8-3-13-11-1-14-12-9-7-5-2-6-15 olarak elde edilmiştir.

İş sayısı  $n=20$  için matematiksel model ile elde edilen sonuçta  $C_{max}$  probleminin yerel optimal çözümü 263,81 iken, çizelge sırası 19-8-17-5-15-20-10-14-16-18-1-6-7-3-12-13-2-4-9-11 ve çözüm zamanı 144786.54 saniye, SPT çözümü 290,13 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,1 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 4-2-14-17-7-3-12-18-11-9-20-10-1-5-16-13-15-19-6-8 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 272,97 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,035 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 269,88, en iyi çizelge sırası ise 14-11-4-13-17-7-3-2-18-15-16-9-12-6-19-5-20-10-8-1 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta toplam tamamlanma zamanı ( $\sum C$ ) probleminin yerel optimal çözümü 2483,78 iken, çizelge sırası 14-7-8-2-18-13-4-16-5-12-15-3-20-1-19-11-9-10-17-6 ve çözüm zamanı 144293.34 saniye, SPT çözümü 2750,87 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,108 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 4-2-14-17-7-3-12-18-11-9-20-10-1-5-16-13-15-19-6-8 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 2686,65 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,082 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 2646,12, en iyi çizelge sırası ise 4-14-9-20-3-2-16-7-17-6-12-10-18-1-19-15-5-8-13-11 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta tamamlanma zamanlarının farklarının toplamı (TADC) probleminin yerel optimal çözümü 13782.59 iken, çizelge sırası 12-10-11-8-4-18-9-20-14-16-3-13-1-6-2-17-5-7-19-15 ve çözüm zamanı 11053.16 saniye, SPT çözümü 19303,43 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,401 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 4-2-14-17-7-3-12-18-11-9-20-10-1-5-16-13-15-19-6-8 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 15144,12 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,099 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 14699,08, en iyi çizelge sırası ise 13-11-19-17-1-7-9-4-20-2-10-14-12-18-3-8-6-16-5-15 olarak elde edilmiştir.

İş sayısı  $n=30$  için matematiksel model ile elde edilen sonuçta  $C_{max}$  probleminin yerel optimal çözümü 417,9 iken, çizelge sırası 29-23-1-13-11-17-3-6-5-4-8-21-12-9-20-15-7-25-16-22-27-18-28-10-24-14-19-30-26-2 ve çözüm zamanı 145282.34 saniye, SPT çözümü 435,61 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,042 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 9-10-30-19-4-3-7-16-17-5-27-22-26-12-8-14-13-29-18-21-15-2-11-24-28-25-23-20-1-6 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu



değeri 430,89 elde edilmiş, nispi hata oranı 0,031 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 428,50, en iyi çizelge sırası ise 10-17-22-30-7-25-26-16-9-14-13-19-3-24-11-28-27-5-2-6-4-20-29-8-21-12-23-18-15-1 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta toplam tamamlanma zamanı ( $\sum C$ ) probleminin yerel optimal çözümü 5656,52 iken, çizelge sırası 29-25-3-9-6-27-14-22-1-4-13-19-15-5-21-8-12-11-10-16-26-17-28-23-20-24-7-30-18-2 ve çözüm zamanı 144189.42 saniye, SPT çözümü 6149,02 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,087 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 9-10-30-19-4-3-7-16-17-5-27-22-26-12-8-14-13-29-18-21-15-2-11-24-28-25-23-20-1-6 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 6083,51 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,075 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 6001,76, en iyi çizelge sırası ise 17-3-30-9-10-14-16-19-8-18-5-22-25-27-11-21-13-29-24-12-26-2-4-23-15-6-7-20-1-28 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta tamamlanma zamanlarının farklarının toplamı (TADC) probleminin yerel optimal çözümü 50476,58 iken, çizelge sırası 29-2-13-23-17-30-7-6-15-8-21-26-22-12-24-19-9-20-14-25-28-10-3-4-16-5-18-1-27-11 ve çözüm zamanı 144037.26 saniye, SPT çözümü 65720,9 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,302 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 9-10-30-19-4-3-7-16-17-5-27-22-26-12-8-14-13-29-18-21-15-2-11-24-28-25-23-20-1-6 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 55497,47 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,099 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 54754,59, en iyi çizelge sırası ise 29-15-8-24-28-14-26-9-5-27-10-16-3-7-13-4-18-30-21-19-2-25-11-22-17-12-20-6-23-1 olarak elde edilmiştir.

İş sayısı  $n=50$  için matematiksel model ile elde edilen sonuçta  $C_{max}$  probleminin yerel optimal çözümü 475,8 iken, çizelge sırası 1-45-39-38-9-30-14-18-46-21-49-37-50-27-25-5-33-10-34-8-35-6-12-19-15-29-40-16-17-13-11-41-7-3-24-47-31-48-2-22-20-43-42-4-26-44-23-36-28-32 ve çözüm zamanı 144049.63 saniye, SPT çözümü 486,5 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,022 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 5-18-16-20-23-34-33-7-25-39-12-31-4-8-11-40-2-44-38-15-14-49-36-29-46-41-47-30-24-45-26-1-27-32-13-28-35-42-19-22-9-50-17-6-48-43-37-10-3-21 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 484,87 olarak elde edilmiş, nispi hata

oranı 0,019 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 483,38, en iyi çizelge sırası ise 39-18-5-31-44-20-41-25-16-23-26-14-35-34-4-6-7-12-1-33-8-29-13-10-22-15-43-24-32-40-27-11-9-38-2-36-50-46-42-47-37-45-17-49-21-28-3-48-30-19 olarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta toplam tamamlanma zamanı ( $\sum C$ ) probleminin yerel optimal çözümü 10921,84 iken, çizelge sırası 48-40-38-20-7-45-13-18-44-47-25-30-24-33-31-16-26-4-41-6-37-43-1-36-10-39-29-19-17-11-8-34-5-2-21-3-42-23-12-32-28-50-49-15-14-9-27-46-22-35 ve çözüm zamanı 145206.40 saniye, SPT ve önerilen algoritma ile çözüm elde edilememiştir. Bu nedenle SPT ve önerilen algoritma nispi hata oranları hesaplanamamıştır. Aynı veri kümesi kullanılarak matematiksel model ile elde edilen sonuçta tamamlanma zamanlarının farklarının toplamı (TADC) probleminin yerel optimal çözümü 147163,8 iken, çizelge sırası 7-10-43-19-22-4-31-28-47-3-42-9-17-34-11-16-38-25-48-20-39-27-24-6-29-5-45-32-41-35-23-8-21-18-26-12-1-40-15-46-44-2-50-14-30-13-37-49-33-36 ve çözüm zamanı 144186.57 saniye, SPT çözümü 194009,86 ve SPT çözümünün nispi hata oranı 0,318 bulunmuştur. SPT çözümünün çizelge sırası 5-18-16-20-23-34-33-7-25-39-12-31-4-8-11-40-2-44-38-15-14-49-36-29-46-41-47-30-24-45-26-1-27-32-13-28-35-42-19-22-9-50-17-6-48-43-37-10-3-21 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 174570,73 olarak elde edilmiş, nispi hata oranı 0,186 olarak bulunmuştur. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 171830,1, en iyi çizelge sırası ise 48-10-39-42-37-6-41-9-3-28-20-12-15-33-14-47-30-44-34-35-31-18-13-49-38-4-24-27-5-7-16-11-50-23-19-8-32-22-29-45-46-40-17-21-1-26-36-2-25-43 olarak elde edilmiştir.

İş sayısı  $n=70$  için matematiksel model ile elde edilen sonuçta  $C_{max}$ , tamamlanma zamanı ( $\sum C$ ) ve tamamlanma zamanlarının farklarının toplamı (TADC) problemi 40 saat süre ile çalıştırılmış ancak çözüm elde edilememiştir, fakat TADC problemi için SPT çözümü 553534,87 olarak bulunmuş ancak matematiksel model ile çözüm üretilmediği için SPT çözümünün nispi hata oranı hesaplanamamıştır. SPT çözümünün çizelge sırası 9-48-62-66-35-20-7-69-60-31-12-51-30-22-29-18-44-23-53-59-5-58-39-49-33-63-61-40-19-54-25-45-32-15-67-14-24-2-65-6-57-8-34-50-3-17-47-70-43-13-56-1-42-52-21-55-46-26-27-10-37-64-16-38-68-36-4-41-28-11 olarak bulunmuştur. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri 511104,22 olarak elde edilmiş ancak

matematiksel model ile çözüm üretilmediği için önerilen algoritmanın nispi hata oranı hesaplanamamıştır. Bu problemin önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm değeri 507089,22, en iyi çizelge sırası ise 16-27-61-62-34-57-41-29-26-45-44-63-51-50-66-70-18-40-53-69-36-48-19-42-56-7-54-24-39-2-17-30-58-10-67-49-3-32-6-35-14-28-21-59-23-25-1-22-5-47-65-9-43-60-55-12-37-11-52-8-15-64-20-13-33-46-31-4-68-38 olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.1 Matematiksel model ve önerilen algoritma ile elde edilen sonuç çıktıları ve nispi hata oranları

<i>N</i>	Çizelgeleme Problemleri	Matematiksel Model	Matematiksel Model Çözüm Zamanı (Saniye)	SPT	SPT Nispi Hata Oranı	Önerilen Algoritma	Önerilen Algoritma Nispi Hata Oranı
<i>n=10</i>	$C_{max}$	169.88	249.29	181.37	0,068	168.67	0,007
	$\sum C$	871.58	366.47	940.03	0,079	870.87	0,001
	TADC	2425.73	81.12	3121.13	0,287	2428.41	0,001
<i>n=12</i>	$C_{max}$	210.73	692.28	223.48	0,061	211.49	0,004
	$\sum C$	1212.42	2688.59	1277.38	0,054	1227.31	0,012
	TADC	3963.03	176.51	5746.72	0,45	4025.77	0,016
<i>n=15</i>	$C_{max}$	208.77	144072.53	223.47	0,07	213.07	0,021
	$\sum C$	1391.95	88607.38	1543.99	0,109	1489.31	0,07
	TADC	5745.4	707.87	8574.29	0,492	6072.9	0,057
<i>n=20</i>	$C_{max}$	263.81	144786.54	290.13	0,1	272.97	0,035
	$\sum C$	2483.78	144293.34	2750.87	0,108	2686.65	0,082
	TADC	13782.59	11053.16	19303.43	0,401	15144.12	0,099
<i>n=30</i>	$C_{max}$	417.9	145282.34	435.61	0,042	430.89	0,031
	$\sum C$	5656.52	144189.42	6149.02	0,087	6083.51	0,075
	TADC	50476.58	144037.26	65720.9	0,302	55497.47	0,099
<i>n=50</i>	$C_{max}$	475.8	144049.63	486.5	0,022	484.87	0,019
	$\sum C$	10921.84	145206.40	---	---	---	---
	TADC	147163.8	144186.57	194009.86	0,318	174570.73	0,186
<i>n=70</i>	$C_{max}$	---	144095	---	---	---	---
	$\sum C$	---	144015	---	---	---	---
	TADC	---	144016	553534.87	---	511104.22	---

Nispi hata oranları hesaplamasında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

$$\text{SPT nispi hata oranı} = \frac{\text{SPT Çözüm Değeri} - \text{Matematiksel Model Çözüm Değeri}}{\text{Matematiksel Model Çözüm Değeri}} \quad (3.1)$$

Önerilen algoritma nispi hata oranı

$$= \frac{\text{Önerilen Algoritma Çözüm Değeri} - \text{Matematiksel Model Çözüm Değeri}}{\text{Matematiksel Model Çözüm Değeri}} \quad (3.2)$$

Test problemlerinin verileri ve önerilen çözüm yaklaşımları ile elde edilen sonuçlar Ek-I'de sunulan Tablo 1-26'da verilmiştir.



## 4. BÖLÜM

### SONUÇ ve ÖNERİLER

Günümüzde firmalar, rekabet ortamının artması ve teknolojik ilerlemedeki hızlı gelişmeler ile birlikte kendi rekabet gücünü muhafaza edebilmek için müşteri isteklerini çok kısa bir süre içerisinde yanıt vermeleri gerekmektedir. İşletmeler mevcut kapasitelerini ve verimliliklerini artırmadan çok daha fazla üretim yapabilmeleri ve bu üretimlerini çok daha kısa sürede gerçekleştirebilmeleri için çizelgeleme problemlerine gereksinim duyarlar.

Çizelgeleme problemleri sayesinde makinaların çok daha verimli kullanımıyla müşteri istekleri tam zamanında üretilerek gerçekleştirilmekte rekabet üstünlüğü sağlanmaktadır. Bu sebeptir ki işlerin daha kısa süre içerisinde ve öngörülen zamanında tamamlanması için çizelgeleme modelleri önerilir.

Çizelgeleme problemlerinde öğrenme etkisinin varlığı önemli ölçüde artmaktadır. Çizelgeleme probleminde öğrenme etkisi kullanıldığında genel varsayım, çizelgedeki bütün işlerin birbirine benzer olmasıdır. Oysaki gerçek hayatta çizelgedeki bazı işlerin benzer olması daha sık rastlanan bir durumdur.

Bu çalışmada tek makinalı çizelgeleme ortamında sıra bağımlı ve iş tabanlı çizelgeleme problemleri ele alınmıştır. Performans ölçütleri olarak maksimum tamamlanma zamanı (makespan), toplam tamamlanma süresi, tamamlanma zamanlarının farkının toplamı çizelgeleme problemleri ele alınarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Çalışma genel olarak iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada performans ölçütleri için matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bu modeller ilk önce Lingo 17.0 programında çözdürülmüş optimum çizelge ve amaç fonksiyon değerleri hesaplanmıştır. İkinci aşamada yeni bir tavlama benzetim algoritması geliştirilerek performans ölçütleri için iyi çizelge ve amaç fonksiyonu değerleri hesaplanmıştır. Önerdiğimiz algoritmanın etkinliğini araştırmak için matematiksel modelden elde edilen sonuçlar ile önerilen

algoritmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak nispi hata oranları belirlenmiştir. Burada nispi hata oranlarının genel olarak % 10 değerinin altında olması hedeflenmiştir. Matematiksel model küçük boyutlu problemleri makul sürelerde çözebilirken, problem boyutu arttıkça çözüm zamanları ister istemez problemin karmaşıklığından dolayı artmaktadır. Önerilen algoritmada ilk önce etkili bir başlangıç çözümü hedeflenmiş, sıcaklık değeri (T) 1000 olarak seçilmiş ve bu değer her iterasyonda 0.99 oranında azaltılmıştır. Algoritmanın çalışacağı en büyük iterasyon sayısı olan  $I_{max}$  ise 100000 olarak belirlenmiştir. Başlangıç çözümü sonrası, sırası ile, etkin bir komşu arama stratejisi, tabu listesi yaklaşımı ve durdurma kriteri göz önüne alınmıştır.

Önerilen tavlama benzetimi algoritması ile matematiksel modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre kurgulanan tavlama benzetimi algoritmasının  $n=10$  işli veri kümesinde nispi hata oranı  $C_{max}$  için 0.007,  $\sum C$  ve TADC için ise 0.001;  $n=12$  işli veri kümesinde nispi hata oranı  $C_{max}$  için 0.004,  $\sum C$  için 0.012, TADC için 0.016;  $n=15$  işli veri kümesinde nispi hata oranı  $C_{max}$  için 0.021,  $\sum C$  için 0.07, TADC için 0.057;  $n=20$  işli veri kümesinde nispi hata oranı  $C_{max}$  için 0.035,  $\sum C$  için 0.082, TADC için 0.099 ve  $n=30$  işli veri kümesinde nispi hata oranı  $C_{max}$  için 0.031,  $\sum C$  için 0.075, TADC için 0.099 olarak bulunmuştur.  $n=50$  işli veri kümesinde nispi hata oranı  $C_{max}$  için 0.019,  $\sum C$  için karşılaştırılamamış, TADC için 0.186 olarak bulunmuştur.  $n=70$ 'li veri kümesinde matematiksel model Lingo 17.0 programı ile 40 saat çalıştırılmış, fakat çözüm bulunamadığı için karşılaştırma yapılamamıştır.

Yapılan bu çalışma tüm işlerin değil çizelgede yer alan sadece bazı işlerin benzer olduğu düşüncesi ile öğrenme etkisi altında çizelgeleme problemleri literatürüne yeni bir bakış açısı kazandıracaktır. Daha sonraki çalışmalarda, önerilen bu matematiksel modeller daha farklı performans ölçütleri için kullanılabilir gibi, farklı metasezgisel teknikler kullanılarak mevcut performans ölçütlerinin daha iyi çözümleri üzerine çalışmalar yapılabilir. Tüm bu çalışmalar daha geniş bir şekilde paralel makinalı problemlerde de uygulama fırsatı bulabilir.

## KAYNAKÇA

1. Biskup, D., 1999. Single-machine scheduling with learning considerations. **European Journal of Operational Research**, **115**: 173-178.
2. Mosheiov G., 2001. Scheduling problems with a learning effect. **European Journal of Operational Research**, **132**: 687-693.
3. Mosheiov, G., Sidney, J.B., 2003. Scheduling with general job-dependent learning curves. **European Journal of Operational Research**, **147**: 665-670.
4. Kuo, W. H., Yang, D.L., 2006. 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.
5. Cheng, T.C.E., Lai, P.J., Wu,, C.C., Lee, W.C., 2009. Single-machine scheduling with sum-of-logarithm-processing-times-based learning considerations. **Information Sciences**, **179**: 3127-3135.
6. Wu, C.C., Lee, W.C., 2008. Single-machine scheduling problems with a learning effect. **Applied Mathematical Modelling**, **32**: 1191-1197.
7. Cheng, T.C.E., Kuo, W. H., Yang, D.-L., 2013. Scheduling with a position-weighted learning effect based on sum-of-logarithm-processing-times and job position. **Information Sciences**, **221**: 490-500.
8. Pinedo, M. 2008 Scheduling: Theory, Algorithms and Systems, Springer, New York.
9. Eren, T., Güner, E., 2004. Çok ölçütlü akış tipi çizelgeleme problemleri için bir literatür taraması. **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, **10** (1): 19-30.
10. Dağ, S., 2012. Akış tipi çizelgeleme problemlerinin sezgisel yöntemlerle optimizasyonu. İstanbul üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
11. Eren, T., 2004. Çok Ölçütlü Akış Tipi Çizelgeleme Problemleri İçin Çözüm Yaklaşımları. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 247.

12. Mosheiov, G., 2001. Parallel machine scheduling with a learning effect. **Journal of Operational Research Society** **52**: 1165-1169.
13. Wright T.P., 1936. Factors affecting the cost of airplanes. **Journal of Aeronautical Sciences** **3**: 122-128.
14. İşler, M.C., Toklu, B., Çelik, V., 2009. Öğrenme etkili erken/geç tamamlanma çizelgeleme problemleri için bir literatür araştırması. **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, **15** (2): 227-252.
15. Eren, T., Güner, E., 2008. A bicriteria flowshop scheduling with a learning effect. **Applied Mathematical Modelling** **32**: 1719-1733.
16. Eren, T., 2009. A bicriteria parallel machine scheduling with a learning effect of setup and removal times. **Applied Mathematical Modelling** **33**: 1141-1150
17. Cheng, T.-C.-E., Wang, G., 2000. Single machine scheduling with learning effect considerations. **Annals of Operations Research**, **98**: 273-290.
18. Wang, J.-B., Sun, L., Sun, L., 2010. Single machine scheduling with exponential sum-of-logarithm- processing-times based learning effect. **Applied Mathematical Modelling** **34**: 2813-2819.
19. Xu Z., Sun, L., Gong, J., 2008. Worst-case analysis for flow shop scheduling with a learning effect. **Int. J. Production Economics** **113**: 748-753.
20. Jiang Z., Chen, F., Wu, C., 2012. Minimizing the maximum lateness in a single-machine scheduling problem with a normal time-dependent and job-dependent learning effect. **Applied Mathematics and Computation** **218**: 9438-9441
21. Lee, W.-C., Wu, C.-C., Sung H.-J., 2004. A bi-criterion single machine problem with learning considerations. **Acta Informatica**, **40**: 303-315.
22. Jiang Z., Chen, F., Kang, H., 2013. Single-machine scheduling problems with actual time-dependent and job-dependent learning effect. **European journal of Operational Research** **227**: 76-80.



23. Wang, J.-B., Wang, J.-J., 2015. Research on scheduling with job-dependent learning effect and convex resource-dependent processing times. **International Journal of Production Research** **53** (19): 5826-5836.
24. Jiang, Z., Chen, F., Zhang, X., 2016. Single-machine scheduling with times-based and job-dependent learning effect. **Journal of The Operational Research Society**, 1-7.
25. Nouri, B.-V., Fattahi, P., Moghaddam, R.-T., Ramezani, R., 2014. A general flow shop scheduling problem with consideration of position-based learning effect and multiple availability constraints. Springer-Verlag, London.
26. Eren, T., Güner, E., 2002. İşe-Bağımlı öğrenme etkili çizelgeleme problemlerin çözümü için bir matematiksel model. **Teknoloji**, **5** (3-4): 121-129.
27. Lee, W.-C., Wu, C.-C., 2009. A note on single-machine group scheduling problems with position-based learning effect. **Applied Mathematical Modelling** **33**: 2159-2163.
28. Yang, S.-J., Yang, D.-L., 2010. Note on "A note on single-machine group scheduling problems with position-based learning effect". **Applied Mathematical Modelling** **34**: 4306-4308.
29. Koulamas, C., Kyparisis, G. J., 2007. Single-machine and two-machine flowshop scheduling with general learning functions. **European Journal of Operational Research**, **178**: 402-407.
30. Wang, J. B., 2008. Single-machine scheduling with general learning functions. **Computers and mathematics with Applications** **56**: 1941-1947.
31. Lee, W.-C., Wu, C.-C., 2004. Minimizing total completion time in a two-machine flow shop with a learning effect. **International Journal of Production Economics**, **88**: 85-93.
32. Wu, C.-C., Lee, W.-C., Chen, T., 2007. Heuristic algorithms for solving the maximum lateness scheduling problem with learning considerations. **Computer & Industrial Engineering**, **52**: 124-132.
33. Chen, K., Ji, M., Ge, J., Wei, G., 2014. Scheduling position-based deteriorating jobs with multiple rate-modifying activities and past-sequence-dependent

- delivery times. **Asia-pacific Journal of Operational Research**, **31** (3): 15 pages.
34. Yin, Y., Xu, D., Wang, J., 2010. Single-machine scheduling with a general sum-of-actual-processing-times-based and job-position-based learning effect. **Applied Mathematical Modelling** **34**: 3623-3630.
35. Wu, C.-C., Lee, W.-C., 2009. Single-machine and flowshop scheduling with a general learning effect model. **Computer & Industrial Engineering**, **56**: 1553-1558.
36. Soroush, H.-M., 2012. Solving the single machine scheduling problem with general job-dependent past-sequence-dependent setup times and learning effect. **European Journal of Industrial Engineering**, **6** (5): 596-628.
37. Soroush, H.-M., 2015. Scheduling with job-dependent past-sequence-dependent setup times and job-dependent position-based learning effects on a single processor. **European Journal of Industrial Engineering**, **9** (3): 277-307.
38. Cheng, T.-C.-E., Wu, C.C., Lee, W.C., 2008. Some scheduling problems with some-of-processing-times-based and job-position-based learning effects. **Information Sciences**, **178**: 2476-2487.
39. Wu, C.C., Wang, D.J., Cheng, S.R., Chung, I.H., Lin, W.C., 2017. A two stage three-machine assembly scheduling problem with a position-based learning effect. **International Journal of Production Research**.
40. Toksarı, M.D., İşleyen, S.K., Güner, E., Baykoç, Ö.F., 2008. Simple and U-type assembly line balancing problems with a learning effect. **Applied Mathematical Modelling**, **32**: 2954-2961.
41. Toksarı, M.D., Güner, E., 2009. Parallel machine earliness/tardiness scheduling problem under the effects of position based learning and linear/nonlinear deterioration. **Computers & Operations Research**, **36**: 2394-2417.
42. Toksarı, M.D., Oron, D., Güner, E., 2010. Some Scheduling problems with past sequence dependent setup times under the effects of nonlinear deterioration and time-dependent learning. **RAIRO- Operations Research**, **44**: 107-118.

43. Chen, P., Wu, C.-C., Lee, W.-C., 2006. A bi-criteria two-machine flow shop scheduling problem with a learning effect. **Journal of The Operational Research Society, 57:** 1113-1125.
44. Wu, C.-C., Lee, W.-C., Wang, W.C., 2007. A two-machine flow shop maximum tardiness scheduling problem with a learning effect. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 31:** 743-750.
45. Mani, V., Chang, P.C., Chen, S.H., 2009. Bi-criteria single machine scheduling problem with a learning effect: Aneja-Nair method to obtain the set of sequences. **Computers and Mathematics with Applications, 58:** 39-47.
46. Bachman, A., Janiak, A., 2004. Scheduling jobs with position-dependent processing times. **Journal of the Operational Research, 55:** 257-264.
47. Sun, K.B., Li, H.X., 2009. Some single-machine scheduling problems with actual time and position dependent learning effects. **Fuzzy Information and Engineering, 1 (2):** 161-177.
48. Corwin, B.D., Esogbue, A.O., 1974. Two machine flow shop scheduling problems with sequence dependent setup times: A dynamic Programming approach. **Naval Research Logistic (NRL), 21 (3):** 515-524.
49. Engin, O.. 2001. Akış tipi çizelgeleme problemlerinin genetik algoritma ile çözüm performansının artırılmasında parametre optimizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul
50. N. Metropolis, A., Rosenbluth, M., Rosenbluth. A., Teller. E., Teller, J., 1953. **Chem. Phys., 21:** 1087.
51. Güner, E., Altıparmak, F., 2003. İki ölçütlü tek makinalı çizelgeleme problemi için sezgisel bir yaklaşım. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18 (3):** 27-42.
52. Kirkpatrick, S., Gelatt, D.C., Vecchi, M.P., 1983. Optimization by simulated annealing. **Science, 220:** 671-679.
53. Alaykiran K., 2011. Çok Ürünlü Tersine Lojistik Ağ Tasarımı: Matematiksel Model ve Tavlama Benzetimi Temelli Çözüm Yaklaşımı. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 116.

54. Ho, J.C., Wong, J.S., 1995. Makespan Minimization for m parallel identical processors. **Naval Research Logistic (NRL)**, **42**: 935-948.
55. Glover, F., 1989. Tabu Search-Part I. **ORSA Journal on Computing**, **1** (3): 190-206.
56. Glover, F., 1990. Tabu Search-Part II. **ORSA Journal on Computing**, **2** (1): 4-32.
57. Eren, T., Güner, E., 2007. Sıra-bağımlı hazırlık zamanlı iki ölçütlü çizelgeleme problemi: Toplam tamamlanma zamanı ve maksimum erken bitirme. **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, **23** (1-2): 95-105.
58. Kır, S., 2011. Sıra bağımlı hazırlık zamanlı tek makineli çizelgeleme problemleri: Gıda sektöründe bir uygulama. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
59. Aladağ, Ç.H., 2009. Yapay Sinir Ağlarının Mimari Seçimi İçin Tabu Arama Algoritması. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 92.
60. Güden, H., Vakvak, B., Özkan, B.E., Altıparmak, F., Dengiz, B. Genel amaçlı aroma algoritmaları ile benzetim eniyilemesi: En iyi kanban sayısının bulunması. **Makine Mühendisliği Odası Endüstri Mühendisliği Dergisi**, **16** (1): 2-15.

## EKLER

## EK 1.

Tablo 1.  $n=10$ , İşlem süreleri ve öğrenme indeks değerleri

$n = 10$	
$p_j$	34, 15, 25, 46, 29, 11, 34, 41, 28, 21
$a_j$	0.74, 0.74, 0.8, 0.76, 0.73, 0.62, 0.78, 0.66, 0.75, 0.84

Tablo 2.  $n=12$ , İşlem süreleri ve öğrenme indeks değerleri

$n = 12$	
$p_j$	21, 50, 10, 44, 38, 42, 48, 14, 47, 27, 39, 49
$a_j$	0.62, 0.68, 0.67, 0.85, 0.61, 0.64, 0.82, 0.82, 0.62, 0.73, 0.72, 0.74

Tablo 3.  $n=15$ , İşlem süreleri ve öğrenme indeks değerleri

$n = 15$	
$p_j$	20, 13, 31, 50, 25, 44, 34, 21, 26, 43, 12, 18, 27, 14, 38
$a_j$	0.6, 0.8, 0.81, 0.65, 0.65, 0.72, 0.61, 0.83, 0.68, 0.84, 0.6, 0.68, 0.79, 0.68, 0.82

Tablo 4.  $n=20$ , İşlem süreleri ve öğrenme indeks değerleri

$n = 20$	
$p_j$	38, 15, 22, 14, 40, 48, 21, 48, 25, 29, 24, 22, 42, 15, 43, 41, 20, 23, 47, 28
$a_j$	0.64, 0.62, 0.7, 0.68, 0.64, 0.68, 0.62, 0.74, 0.68, 0.68, 0.89, 0.68, 0.87, 0.88, 0.85, 0.66, 0.89, 0.73, 0.68, 0.66

Tablo 5.  $n=30$ , İşlem süreleri ve öğrenme indeks değerleri

$n = 30$	
$p_j$	50, 41, 18, 16, 24, 50, 19, 32, 10, 14, 43, 30, 33, 33, 38, 20, 20, 37, 16, 49, 38, 26, 49, 45, 47, 29, 26, 45, 34, 14
$a_j$	0.81, 0.78, 0.79, 0.86, 0.65, 0.78, 0.88, 0.85, 0.6, 0.85, 0.62, 0.82, 0.72, 0.66, 0.77, 0.62, 0.82, 0.61, 0.82, 0.66, 0.78, 0.74, 0.81, 0.78, 0.64, 0.88, 0.73, 0.86, 0.82, 0.78

Tablo 6.  $n=50$ , İşlem süreleri ve öğrenme indeks değerleri

$n = 50$	
$p_j$	30, 22, 48, 20, 10, 41, 16, 21, 40, 46, 21, 19, 32, 24, 23, 11, 41, 10, 37, 11, 50, 39, 11, 28, 16, 29, 31, 32, 26, 27, 20, 31, 14, 11, 33, 25, 46, 23, 16, 21, 26, 36, 45, 22, 29, 26, 27, 44, 24, 40
$a_j$	0.76, 0.82, 0.68, 0.7, 0.75, 0.82, 0.7, 0.64, 0.76, 0.81, 0.8, 0.83, 0.7, 0.68, 0.77, 0.85, 0.65, 0.84, 0.8, 0.72, 0.64, 0.64, 0.61, 0.8, 0.74, 0.85, 0.73, 0.66, 0.72, 0.69, 0.69, 0.77, 0.76, 0.73, 0.61, 0.71, 0.77, 0.76, 0.7, 0.85, 0.77, 0.89, 0.85, 0.7, 0.61, 0.7, 0.73, 0.78, 0.68, 0.66

Tablo 7.  $n=70$ , İşlem süreleri ve öğrenme indeks değerleri

$n = 70$	
$p_j$	42, 32, 37, 48, 22, 33, 15, 35, 10, 45, 50, 17, 40, 32, 30, 46, 37, 20, 28, 14, 43, 18, 21, 32, 29, 45, 45, 49, 19, 17, 16, 29, 25, 36, 14, 48, 45, 46, 23, 27, 49, 42, 40, 20, 29, 44, 38, 11, 24, 37, 17, 42, 22, 28, 44, 41, 34, 23, 22, 16, 26, 12, 25, 45, 33, 13, 31, 47, 15, 39
$a_j$	0.77, 0.66, 0.6, 0.78, 0.71, 0.61, 0.86, 0.87, 0.7, 0.75, 0.83, 0.75, 0.75, 0.62, 0.84, 0.81, 0.66, 0.76, 0.85, 0.61, 0.78, 0.87, 0.75, 0.61, 0.66, 0.87, 0.87, 0.64, 0.86, 0.8, 0.7, 0.64, 0.72, 0.76, 0.77, 0.7, 0.74, 0.77, 0.67, 0.73, 0.71, 0.75, 0.68, 0.66, 0.82, 0.88, 0.64, 0.62, 0.66, 0.6, 0.86, 0.79, 0.84, 0.81, 0.66, 0.7, 0.88, 0.68, 0.81, 0.61, 0.76, 0.89, 0.76, 0.64, 0.61, 0.85, 0.66, 0.87, 0.8, 0.82

Tablo 8. Matematiksel model ile elde edilen çizelgeler

$n$	ÇİZELGELEME PROBLEMİ	SIRALAMA
$n=10$	$C_{max}$	7-2-1-9-5-3-4-8-10-6
	$\sum C$	6-2-4-10-5-3-9-7-8-1
	TADC	7-4-2-1-6-5-10-9-8-3
$n=12$	$C_{max}$	7-11-1-2-10-6-12-3-8-5-4-9
	$\sum C$	4-6-1-12-3-8-11-2-9-5-7-10
	TADC	7-2-6-1-9-4-12-5-8-3-10-11
$n=15$	$C_{max}$	13-1-15-14-12-9-11-6-7-10-2-5-8-4-3
	$\sum C$	6-1-13-11-7-12-10-8-4-15-2-5-9-3-14
	TADC	10-12-15-13-11-14-7-4-6-1-5-9-3-8-2
$n=20$	$C_{max}$	19-8-17-5-15-20-10-14-16-18-1-6-7-3-12-13-2-4-9-11
	$\sum C$	14-7-8-2-18-13-4-16-5-12-15-3-20-1-19-11-9-10-17-6
	TADC	12-10-11-8-4-18-9-20-14-16-3-13-1-6-2-17-5-7-19-15
$n=30$	$C_{max}$	29-23-1-13-11-17-3-6-5-4-8-21-12-9-20-15-7-25-16-22-27-18-28-10-24-14-19-30-26-2
	$\sum C$	29-25-3-9-6-27-14-22-1-4-13-19-15-5-21-8-12-11-10-16-26-17-28-23-20-24-7-30-18-2
	TADC	29-2-13-23-17-30-7-6-15-8-21-26-22-12-24-19-9-20-14-25-28-10-3-4-16-5-18-1-27-11
$n=50$	$C_{max}$	1-45-39-38-9-30-14-18-46-21-49-37-50-27-25-5-33-10-34-8-35-6-12-19-15-29-40-16-17-13-11-41-7-3-24-47-31-48-2-22-20-43-42-4-26-44-23-36-28-32
	$\sum C$	48-40-38-20-7-45-13-18-44-47-25-30-24-33-31-16-26-4-41-6-37-43-1-36-10-39-29-19-17-11-8-34-5-2-21-3-42-23-12-32-28-50-49-15-14-9-27-46-22-35
	TADC	7-10-43-19-22-4-31-28-47-3-42-9-17-34-11-16-38-25-48-20-39-27-24-6-29-5-45-32-41-35-23-8-21-18-26-12-1-40-15-46-44-2-50-14-30-13-37-49-33-36
$n=70$	$C_{max}$	---
	$\sum C$	---
	TADC	---



Tablo 9.  $n=10, C_{max}$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=10, (C_{max})$ Maksimum Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	181.3655
SPT Çözüm Çizelgesi	6-2-10-3-9-5-1-7-8-4
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
168.5077	3-10-2-6-7-5-1-8-9-4
169.024	10-3-2-6-5-7-1-8-9-4
168.6603	10-2-3-6-7-5-1-8-9-4
168.4803	10-2-6-5-1-9-3-7-8-4
167.5731	10-2-6-3-7-5-1-8-4-9
170.3661	10-3-6-7-2-5-8-4-1-9
167.8766	10-2-6-3-7-5-1-9-8-4
168.3568	10-2-3-6-7-5-1-8-4-9
169.7294	10-2-6-3-5-1-8-7-4-9
168.1544	10-3-2-7-6-5-1-8-4-9
En İyi Çözüm Ortalaması	168.67

Tablo 10.  $n=10, \sum C$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=10, (\sum C)$ Toplam Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	940.0285
SPT Çözüm Çizelgesi	6-2-10-3-9-5-1-7-8-4
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
872.3054	2-6-5-1-9-3-10-8-7-4
866.5791	10-2-6-5-1-9-3-8-7-4
871.5289	10-2-6-5-3-1-9-8-7-4
874.2599	2-6-5-1-9-10-3-7-8-4
872.8795	2-6-3-10-7-5-1-8-9-4
875.1786	10-2-6-5-1-3-7-9-8-4
867.815	10-2-6-5-1-9-3-7-8-4
870.1127	10-2-6-5-1-9-3-8-4-7
872.7069	10-2-6-3-5-1-9-7-8-4
865.3477	10-2-6-3-7-5-1-8-9-4
En İyi Çözüm Ortalaması	870.87

Tablo 11.  $n=10$ , TADC için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=10$ , (TADC) Tamamlanma Zamanlarının Farkının Toplamı Minimizasyonu	
SPT	3121.1262
SPT Çözüm Çizelgesi	6-2-10-3-9-5-1-7-8-4
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
2406.5525	8-4-3-10-2-6-5-1-9-7
2426.2937	8-4-10-3-2-6-5-1-7-9
2455.2141	8-10-4-3-2-6-7-5-1-9
2422.2085	4-10-3-2-6-7-5-1-9-8
2431.0627	8-3-10-6-2-7-5-1-9-4
2419.2027	8-10-3-7-2-6-5-1-9-4
2420.4485	4-3-10-2-6-7-5-1-9-8
2425.5723	4-3-7-10-2-6-5-1-9-8
2454.6318	4-7-10-2-5-6-1-9-3-8
2422.9153	8-3-10-2-7-6-5-1-9-4
En İyi Çözüm Ortalaması	2428.41

Tablo 12.  $n=12$ ,  $C_{max}$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=12$ , ( $C_{max}$ ) Maksimum Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	223.4835
SPT Çözüm Çizelgesi	3-8-1-10-5-11-6-4-9-7-12-2
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
211.3765	3-4-8-5-10-2-6-7-1-9-12-11
210.122	3-1-4-10-8-2-11-6-7-9-12-5
211.5697	3-4-1-12-8-10-9-5-2-11-7-6
212.5294	3-1-4-12-8-5-10-11-9-2-7-6
211.2262	3-4-8-11-10-6-5-1-2-7-9-12
211.0943	8-3-5-1-4-2-10-7-11-6-9-12
211.6593	3-1-12-4-10-8-2-5-7-9-11-6
212.0072	3-4-8-1-10-2-9-11-6-7-5-12
211.3212	3-4-10-8-11-1-6-9-12-5-2-7
211.951	8-3-1-9-12-10-4-5-2-11-7-6
En İyi Çözüm Ortalaması	211.49

Tablo 13.  $n=12$ ,  $\Sigma C$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=12$ , ( $\Sigma C$ ) Toplam Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	1277.3825
SPT Çözüm Çizelgesi	3-8-1-10-5-11-6-4-9-7-12-2
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
1237.5608	8-3-1-9-10-5-11-12-2-6-4-7
1217.3216	8-3-1-10-5-2-9-11-6-12-7-4
1231.2994	3-8-5-11-1-10-6-9-12-2-4-7
1225.3604	3-8-1-5-10-2-11-6-9-4-12-7
1233.8056	3-8-5-1-11-9-10-2-6-4-12-7
1220.9088	8-3-5-1-11-10-2-9-6-12-4-7
1220.345	8-3-1-10-5-2-11-9-6-12-7-4
1233.1796	8-3-5-1-10-9-2-4-11-6-7-12
1214.8195	3-8-5-1-9-10-2-11-6-12-4-7
1238.4553	3-10-1-8-5-2-11-6-9-12-7-4
En İyi Çözüm Ortalaması	1227.31

Tablo 14.  $n=12$ , TADC için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=12$ , (TADC) Tamamlanma Zamanlarının Farkının Toplamı Minimizasyonu	
SPT	5746.723
SPT Çözüm Çizelgesi	3-8-1-10-5-11-6-4-9-7-12-2
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
4066.6539	12-4-10-6-5-3-1-8-11-9-2-7
3973.3083	4-2-11-10-3-6-1-8-5-9-12-7
4059.4001	12-4-2-10-3-8-5-1-11-6-9-7
4053.3516	7-4-5-8-3-1-10-11-6-9-12-2
3991.3202	4-2-10-6-8-3-1-9-5-11-7-12
4051.2717	4-2-10-6-3-5-8-11-1-9-7-12
4029.5678	4-7-11-3-10-8-6-1-5-9-12-2
4021.4851	7-4-11-10-6-3-8-9-5-1-2-12
4045.7311	7-4-11-8-1-3-9-10-5-6-12-2
3965.5836	7-4-10-8-3-5-1-11-2-9-6-12
En İyi Çözüm Ortalaması	4025.77

Tablo 15.  $n=15$ ,  $C_{max}$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=15$ , ( $C_{max}$ ) Maksimum Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	223.4743
SPT Çözüm Çizelgesi	11-2-14-12-1-8-5-9-13-3-7-15-10-6-4
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
212.6877	2-11-12-15-13-7-14-6-5-4-8-3-1-10-9
213.9609	2-12-11-13-15-6-10-8-4-1-7-14-9-5-3
213.0738	2-8-12-13-6-11-14-3-9-15-5-7-10-1-4
211.7243	2-11-14-12-8-9-13-15-6-1-3-5-10-4-7
213.8145	2-11-14-12-8-15-9-6-5-4-13-7-3-10-1
213.9534	2-14-8-12-9-13-11-6-10-1-7-15-5-3-4
213.5839	2-8-3-12-13-11-6-7-9-14-15-10-5-4-1
212.4174	2-11-14-12-5-4-15-13-6-1-8-9-10-3-7
212.4367	2-11-12-8-13-9-15-10-7-14-5-1-4-6-3
212.9981	2-8-13-10-12-1-6-11-3-7-15-14-5-9-4
En İyi Çözüm Ortalaması	213.07

Tablo 16.  $n=15$ ,  $\sum C$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=15$ , ( $\sum C$ ) Toplam Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	1543.9926
SPT Çözüm Çizelgesi	11-2-14-12-1-8-5-9-13-3-7-15-10-6-4
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
1495.3956	11-14-9-2-8-12-1-5-4-15-7-3-13-6-10
1494.117	2-14-12-11-9-8-1-4-6-5-3-7-13-10-15
1495.055	2-11-14-9-12-13-1-7-8-5-3-4-10-6-15
1500.3319	2-14-11-9-12-1-13-7-5-6-10-8-3-4-15
1482.2583	2-11-14-1-12-5-8-9-3-7-13-6-10-4-15
1489.9361	2-14-11-9-12-1-7-13-8-15-5-4-3-6-10
1455.8617	2-11-14-5-9-1-12-8-6-13-7-4-3-10-15
1489.2453	11-14-9-1-5-12-2-8-4-6-15-7-13-10-3
1496.1819	11-9-14-2-12-1-5-13-7-8-15-4-6-10-3
1494.7168	11-14-9-12-5-2-1-7-8-13-3-4-10-6-15
En İyi Çözüm Ortalaması	1489.31

Tablo 17.  $n=15$ , TADC için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=15$ , (TADC) Tamamlanma Zamanlarının Farkının Toplamı Minimizasyonu	
SPT	8574.2918
SPT Çözüm Çizelgesi	11-2-14-12-1-8-5-9-13-3-7-15-10-6-4
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
6107.6484	6-10-4-11-9-2-1-14-8-5-12-13-7-15-3
6094.0144	10-15-8-2-14-9-11-1-12-5-4-7-6-13-3
6102.1254	10-15-14-8-9-12-1-13-11-2-7-6-5-4-3
6041.5162	10-13-15-7-8-11-14-9-2-1-12-5-4-3-6
6019.71	6-10-3-9-7-12-11-2-5-1-14-8-4-13-15
6082.6374	6-10-4-9-11-12-2-14-7-1-5-13-8-15-3
6073.0935	15-10-11-8-9-14-12-1-13-5-7-2-6-4-3
6103.2524	15-10-9-12-7-8-5-11-14-2-1-13-4-6-3
6012.042	10-4-8-3-13-11-1-14-12-9-7-5-2-6-15
6092.9195	10-4-3-8-12-2-1-14-11-9-13-7-5-6-15
En İyi Çözüm Ortalaması	6094.37

Tablo 18.  $n=20$ ,  $C_{max}$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=20$ , ( $C_{max}$ ) Maksimum Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	290.1269
SPT Çözüm Çizelgesi	4-2-14-17-7-3-12-18-11-9-20-10-1-5-16-13-15-19-6-8
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
271.9803	11-14-4-9-7-20-3-17-6-13-2-18-1-16-19-8-15-5-12-10
274.8534	11-4-2-12-14-13-18-3-17-16-1-19-9-15-20-7-5-8-10-6
273.8032	14-4-17-7-9-3-12-13-15-18-2-11-6-8-19-20-5-10-16-1
273.2738	11-4-14-2-9-7-20-13-16-18-1-12-17-8-3-10-6-15-19-5
273.1432	11-14-13-2-4-17-7-18-20-9-3-19-8-10-16-1-15-6-12-5
270.6565	17-14-11-4-7-9-8-2-20-3-16-10-18-13-12-6-19-15-5-1
269.8784	14-11-4-13-17-7-3-2-18-15-16-9-12-6-19-5-20-10-8-1
275.3068	14-20-17-13-4-7-11-2-18-9-16-12-19-3-5-6-10-1-8-15
273.0658	17-14-7-4-9-18-6-13-11-2-8-12-19-15-10-20-16-3-5-1
273.7003	11-2-17-18-12-7-14-4-8-9-20-16-19-5-13-1-6-15-10-3
En İyi Çözüm Ortalaması	272.97

Tablo 19.  $n=20$ ,  $\sum C$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=20$ , ( $\sum C$ ) Toplam Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	2750.8724
SPT Çözüm Çizelgesi	4-2-14-17-7-3-12-18-11-9-20-10-1-5-16-13-15-19-6-8
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
2717.2437	4-7-3-2-14-9-18-1-10-12-20-17-6-19-13-11-5-15-16-8
2699.7166	17-4-18-7-9-2-20-12-19-3-10-14-6-15-16-11-5-8-1-13
2672.9875	14-17-7-4-9-2-3-20-12-8-19-18-6-16-1-10-5-13-15-11
2710.5579	11-14-17-4-7-3-2-12-1-9-18-8-20-19-10-6-5-16-15-13
2678.1975	17-4-7-9-12-18-14-3-6-20-2-16-10-1-15-19-13-8-5-11
2717.3909	17-14-7-4-18-9-2-20-3-10-11-1-13-5-12-16-6-15-19-8
2698.3719	4-14-9-7-2-3-12-1-11-18-16-20-5-8-17-10-13-6-15-19
2646.1174	4-14-9-20-3-2-16-7-17-6-12-10-18-1-19-15-5-8-13-11
2664.4458	14-4-7-9-18-2-12-20-6-19-8-3-1-16-11-10-17-5-13-15
2661.4812	4-14-2-7-20-18-9-12-3-1-19-16-17-10-6-11-15-8-5-13
En İyi Çözüm Ortalaması	2686.65

Tablo 20.  $n=20$ , TADC için SPT ve tavlama benzetimi algoritmanın sonuçları

$n=20$ , (TADC) Tamamlanma Zamanlarının Farkının Toplamı Minimizasyonu	
SPT	19303.4288
SPT Çözüm Çizelgesi	4-2-14-17-7-3-12-18-11-9-20-10-1-5-16-13-15-19-6-8
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
15252.5512	13-15-11-5-18-9-2-4-3-19-1-7-10-14-6-20-12-16-17-8
15311.9565	13-15-17-11-5-14-4-2-1-8-10-7-18-19-12-3-9-20-6-16
15307.4941	13-15-5-11-12-18-14-17-3-7-2-4-20-6-10-1-9-19-16-8
15123.5702	13-15-17-19-10-4-18-3-16-9-12-7-2-20-1-6-11-8-14-5
15184.7857	8-15-11-16-5-10-17-14-19-9-2-7-4-1-20-18-12-3-6-13
15159.3254	15-11-5-13-18-2-4-3-17-14-10-7-9-20-1-19-12-6-16-8
14987.9795	13-15-11-12-14-19-7-2-4-9-5-3-20-1-18-17-10-8-16-6
15336.9103	13-16-10-11-6-12-19-17-2-7-4-3-1-14-18-20-9-8-5-15
15077.5501	13-8-11-5-14-2-17-7-4-3-16-12-1-6-10-9-18-19-15-20
14699.0751	13-11-19-17-1-7-9-4-20-2-10-14-12-18-3-8-6-16-5-15
En İyi Çözüm Ortalaması	15144.12

Tablo 21.  $n=30$ ,  $C_{max}$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=30$ , ( $C_{max}$ ) Maksimum Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	435.6091
SPT Çözüm Çizelgesi	9-10-30-19-4-3-7-16-17-5-27-22-26-12-8-14-13-29-18-21-15-2-11-24-28-25-23-20-1-6
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
429.462	7-10-30-17-19-9-13-25-26-5-3-15-24-11-4-18-6-21-16-2-14-1-22-20-8-23-27-29-12-28
430.6659	30-4-3-26-17-11-8-9-21-10-13-19-22-25-27-18-23-7-5-29-14-24-28-15-16-2-6-12-1-20
432.836	10-17-9-13-30-4-3-5-11-6-19-12-22-24-14-28-21-18-8-15-20-29-25-26-16-7-27-23-1-2
432.2577	7-17-10-9-6-30-24-14-13-12-16-4-19-26-1-3-25-27-2-11-15-20-22-29-5-8-18-21-28-23
428.5042	10-17-22-30-7-25-26-16-9-14-13-19-3-24-11-28-27-5-2-6-4-20-29-8-21-12-23-18-15-1
431.8789	10-4-30-7-9-3-5-13-19-6-29-17-12-25-22-8-16-20-2-1-24-14-23-27-15-28-26-18-21-11
428.969	4-7-19-9-10-3-17-8-12-22-14-6-26-27-20-30-13-18-24-16-1-15-25-5-11-29-28-2-21-23
430.3552	4-30-9-14-3-17-24-5-27-16-22-10-11-19-7-21-20-13-1-25-15-12-8-6-26-29-18-2-28-23
431.1547	10-30-29-7-17-22-16-8-3-15-19-9-14-12-25-20-2-27-11-5-23-28-18-4-24-6-26-13-21-1
432.8258	7-9-17-3-30-10-8-5-25-27-14-26-18-4-2-16-13-29-20-12-11-24-22-15-21-6-1-28-23-19
En İyi Çözüm Ortalaması	430.89

Tablo 22.  $n=30$ ,  $\sum C$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=30$ , ( $\sum C$ ) Toplam Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	6149.0185
SPT Çözüm Çizelgesi	9-10-30-19-4-3-7-16-17-5-27-22-26-12-8-14-13-29-18-21-15-2-11-24-28-25-23-20-1-6
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
6001.7641	17-3-30-9-10-14-16-19-8-18-5-22-25-27-11-21-13-29-24-12-26-2-4-23-15-6-7-20-1-28
6030.8587	10-30-4-9-3-17-25-19-16-8-22-18-5-7-20-13-12-11-1-14-26-6-23-24-29-28-21-27-2-15
6102.7737	10-30-4-9-3-22-14-11-19-13-18-27-25-29-20-26-16-24-8-15-17-7-5-12-1-28-21-23-6-2
6084.3173	7-9-10-17-30-8-13-3-26-11-22-5-16-14-24-4-18-25-19-27-15-23-29-6-21-12-20-1-2-28
6103.6635	10-9-17-3-4-8-22-30-5-7-19-16-14-13-18-2-11-20-24-21-27-1-6-25-15-29-26-23-12-28
6094.7079	4-9-11-14-27-30-19-18-3-10-7-25-16-20-13-22-5-15-23-26-12-17-2-21-1-24-29-8-28-6
6103.2495	30-9-7-10-5-4-17-19-11-12-27-25-22-3-8-16-18-14-26-29-6-1-24-23-20-21-15-13-2-28
6091.9439	7-3-9-30-14-5-18-27-10-29-16-17-19-25-20-13-11-8-22-4-12-6-1-24-15-21-23-26-2-28
6116.1617	10-7-9-13-17-14-30-19-5-3-15-25-11-12-16-27-4-2-29-20-21-26-6-22-18-8-24-23-1-28
6105.6604	10-30-5-17-9-22-15-26-4-18-3-16-19-14-20-11-13-27-12-8-29-2-7-6-25-21-24-23-28-1
En İyi Çözüm Ortalaması	6083.51



Tablo 23.  $n=30$ , TADC için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=30$ , (TADC) Tamamlanma Zamanlarının Farkının Toplamı Minimizasyonu	
SPT	65720.9042
SPT Çözüm Çizelgesi	9-10-30-19-4-3-7-16-17-5-27-22-26-12-8-14-13-29-18-21-15-2-11-24-28-25-23-20-1-6
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
55666.9453	13-1-2-8-7-29-14-5-10-4-26-17-16-15-11-20-3-19-9-30-22-27-21-18-24-12-6-25-28-23
55642.6585	26-21-1-29-28-7-13-8-17-14-9-5-22-30-10-19-11-16-25-20-24-27-15-3-4-12-2-23-18-6
55965.9883	23-3-6-7-24-12-27-17-10-15-14-2-20-5-4-11-9-18-16-30-19-25-8-29-22-1-13-26-21-28
55710.6397	23-28-26-3-13-17-6-7-9-22-11-2-30-15-19-14-4-18-12-10-16-20-27-25-5-29-8-1-24-21
55473.2281	2-26-27-28-24-29-30-4-7-8-17-9-25-22-19-16-10-11-20-13-3-12-14-18-15-6-5-21-1-23
55080.2353	28-21-15-26-17-10-22-3-12-9-2-16-27-30-5-11-14-23-7-19-20-4-25-18-13-8-29-6-1-24
55251.2001	6-29-1-15-16-4-7-30-26-12-3-14-18-27-10-9-19-25-20-5-11-22-13-23-17-21-8-2-28-24
55444.5519	28-24-2-10-21-12-26-29-27-30-25-15-9-11-16-4-5-17-18-3-13-20-7-22-14-19-1-8-23-6
54754.5908	29-15-8-24-28-14-26-9-5-27-10-16-3-7-13-4-18-30-21-19-2-25-11-22-17-12-20-6-23-1
55984.6441	21-1-30-17-2-7-22-19-14-4-23-16-10-15-9-18-11-5-25-27-12-3-29-20-13-26-8-6-28-24
En İyi Çözüm Ortalaması	55497.47

Tablo 24.  $n=50$ ,  $C_{max}$  için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=50$ , ( $C_{max}$ ) Maksimum Tamamlanma Zamanı Minimizasyonu	
SPT	486.5022
SPT Çözüm Çizelgesi	5-18-16-20-23-34-33-7-25-39-12-31-4-8-11-40-2-44-38-15-14-49-36-29-46-41-47-30-24-45-26-1-27-32-13-28-35-42-19-22-9-50-17-6-48-43-37-10-3-21
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
486.4569	34-33-18-5-12-26-25-4-29-40-14-2-47-11-23-16-20-19-10-27-49-36-50-1-30-7-41-13-45-35-22-39-37-21-38-6-44-24-3-48-32-46-9-17-15-31-43-8-42-28
483.7157	33-40-18-1-20-2-39-31-23-32-45-49-24-44-7-14-16-12-34-5-8-19-38-27-37-3-21-22-50-15-28-9-48-36-25-30-11-47-43-35-4-41-26-42-29-10-46-6-13-17
485.4936	5-34-31-18-40-11-24-26-20-14-39-21-23-12-4-32-33-46-2-44-49-13-22-7-37-25-36-35-19-28-8-3-41-50-16-10-47-42-6-29-15-30-38-48-1-45-9-17-43-27
484.8174	33-16-5-20-40-14-12-47-18-7-23-4-49-31-13-43-26-39-28-11-44-34-25-10-17-2-45-50-24-35-32-30-36-29-42-22-37-38-15-1-8-9-19-41-21-27-46-48-6-3
483.3759	39-18-5-31-44-20-41-25-16-23-26-14-35-34-4-6-7-12-1-33-8-29-13-10-22-15-43-24-32-40-27-11-9-38-2-36-50-46-42-47-37-45-17-49-21-28-3-48-30-19
484.5785	2-18-33-40-31-16-1-47-12-46-8-24-5-44-14-45-26-35-23-49-30-29-13-20-6-41-7-34-21-37-25-50-43-17-32-39-42-11-48-36-27-19-28-10-15-9-22-38-3-4
485.9123	20-40-2-47-7-45-49-39-16-23-18-46-12-31-5-44-14-41-34-13-25-28-10-33-21-32-27-26-37-22-8-1-4-29-43-3-17-38-50-36-15-19-48-35-9-6-30-24-11-42
485.2488	16-12-20-39-33-31-18-23-7-28-2-35-34-47-10-46-25-41-49-45-29-19-24-38-13-14-40-11-44-22-43-1-26-4-27-8-21-9-17-15-32-37-3-48-30-6-42-50-36-5
485.3968	2-33-18-25-16-49-20-1-37-7-29-39-38-40-19-12-15-5-26-23-4-48-47-36-10-42-35-21-24-14-11-45-32-50-17-22-34-28-41-46-8-6-44-31-13-27-43-9-30-3
483.7361	33-25-18-39-20-45-7-28-47-12-2-40-23-49-8-16-26-44-24-32-17-1-34-27-4-30-41-38-42-46-6-22-50-37-21-3-48-14-19-31-35-13-5-36-29-43-15-10-9-11
En İyi Çözüm Ortalaması	484.87

Tablo 25.  $n=50$ , TADC için SPT ve tavlama benzetimi algoritmasının sonuçları

$n=50$ , (TADC) Tamamlanma Zamanlarının Farkının Toplamı Minimizasyonu	
SPT	194009.8594
SPT Çözüm Çizelgesi	5-18-16-20-23-34-33-7-25-39-12-31-4-8-11-40-2-44-38-15-14-49-36-29-46-41-47-30-24-45-26-1-27-32-13-28-35-42-19-22-9-50-17-6-48-43-37-10-3-21
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
173563.5972	42-10-26-48-38-6-16-40-35-14-39-49-47-5-29-32-9-45-23-13-18-7-20-41-50-17-11-3-8-33-44-24-25-22-30-4-36-2-34-15-31-37-28-12-27-19-21-46-43-1
172369.8798	9-10-37-11-48-42-12-17-16-1-26-15-44-24-36-35-18-20-40-41-46-31-8-28-23-5-34-13-4-39-7-45-38-22-25-30-29-50-3-2-6-14-33-27-43-49-21-47-32-19
171830.0998	48-10-39-42-37-6-41-9-3-28-20-12-15-33-14-47-30-44-34-35-31-18-13-49-38-4-24-27-5-7-16-11-50-23-19-8-32-22-29-45-46-40-17-21-1-26-36-2-25-43
173217.2171	36-6-10-42-37-2-49-26-46-38-29-47-27-1-5-12-11-13-4-33-35-7-24-23-30-34-16-20-28-25-18-17-22-31-9-21-32-44-14-39-40-3-50-8-19-15-41-48-45-43
175007.7235	6-43-26-19-18-42-28-36-30-10-39-24-40-2-27-32-5-34-31-11-33-44-12-35-22-20-45-41-50-17-15-9-8-16-7-14-13-1-46-37-4-23-25-49-21-29-3-38-48-47
176311.6126	37-38-41-26-43-42-31-25-1-44-8-24-33-12-18-15-20-23-3-7-30-14-36-22-13-34-40-2-4-49-19-50-48-46-28-21-39-45-35-5-27-29-11-17-9-47-16-10-6-32
174521.4455	17-43-44-26-48-30-40-1-20-34-2-4-32-6-38-36-18-45-50-31-33-14-13-5-16-47-35-39-27-11-22-41-24-23-29-8-15-7-12-21-28-19-49-3-10-46-9-25-37-42
176389.9444	24-10-1-37-3-12-36-27-50-25-40-31-2-14-47-9-4-17-21-45-13-34-38-44-5-28-49-39-6-8-26-46-33-18-30-16-15-22-35-20-7-41-23-11-19-32-43-48-42-29
176714.8268	10-42-25-33-38-45-1-26-34-39-37-16-47-23-49-40-12-6-22-8-30-18-13-35-17-31-27-19-20-21-41-44-14-4-3-5-15-32-46-36-28-9-11-7-50-48-2-24-43-29
175780.9396	36-37-42-31-47-18-16-25-44-15-12-26-24-35-34-17-33-27-39-4-30-45-22-11-5-32-8-13-7-20-28-46-41-9-49-3-1-21-40-38-29-23-19-48-50-14-43-6-2-10
En İyi Çözüm Ortalaması	174570.73

Tablo 26.  $n=70$ , TADC için SPT ve tavlama benzetimi algoritmanın sonuçları

$n=70$ , (TADC) Tamamlanma Zamanlarının Farkının Toplamı Minimizasyonu	
SPT	553534.8747
SPT Çözüm Çizelgesi	9-48-62-66-35-20-7-69-60-31-12-51-30-22-29-18-44-23-53-59-5-58-39-49-33-63-61-40-19-54-25-45-32-15-67-14-24-2-65-6-57-8-34-50-3-17-47-70-43-13-56-1-42-52-21-55-46-26-27-10-37-64-16-38-68-36-4-41-28-11
En İyi Çözüm	En İyi Çözüm Çizelgesi
515862.709	63-29-57-70-52-22-31-26-50-36-44-14-51-30-28-65-23-4-17-45-15-67-2-61-12-35-40-47-7-69-6-10-64-49-53-58-41-62-3-25-18-34-5-54-39-43-9-32-60-48-1-38-20-59-33-24-19-16-55-27-66-68-56-42-8-37-11-21-13-46
508453.6706	38-46-37-57-8-30-15-31-69-4-18-19-24-53-59-14-49-45-20-70-64-5-51-61-42-48-9-65-33-35-28-56-6-32-44-17-34-67-55-63-13-39-2-12-52-21-40-50-11-43-62-60-7-10-58-54-25-22-47-36-3-41-26-29-66-16-27-1-68-23
510205.3357	19-33-1-16-57-6-21-8-26-66-10-23-17-49-44-63-35-41-48-7-61-62-64-60-3-31-45-67-29-47-22-56-37-30-39-43-28-18-51-2-13-40-14-9-38-58-52-4-24-36-5-25-20-32-55-46-12-69-34-65-27-50-70-53-54-42-59-68-15-11
511484.057	11-46-4-8-54-70-31-18-10-52-2-12-15-38-42-6-23-22-50-7-29-67-19-55-58-40-1-3-60-14-49-48-20-57-32-9-68-59-65-28-25-56-62-39-35-47-66-41-63-13-53-61-36-64-33-44-69-34-43-5-27-24-45-16-30-21-51-26-37-17
507089.2182	16-27-61-62-34-57-41-29-26-45-44-63-51-50-66-70-18-40-53-69-36-48-19-42-56-7-54-24-39-2-17-30-58-10-67-49-3-32-6-35-14-28-21-59-23-25-1-22-5-47-65-9-43-60-55-12-37-11-52-8-15-64-20-13-33-46-31-4-68-38
517796.1347	21-15-46-27-67-26-11-62-45-8-19-37-69-59-9-29-3-17-22-48-4-7-61-43-13-12-56-47-53-51-23-44-24-2-35-14-50-32-34-65-10-39-20-36-41-25-57-5-38-18-40-30-58-28-33-66-16-31-52-6-68-42-54-1-63-49-60-64-55-70
510476.6281	16-68-70-23-46-19-42-58-39-35-66-51-65-49-60-20-25-22-48-62-63-34-18-17-52-56-69-36-7-10-47-31-33-26-64-3-32-9-59-6-40-24-43-50-5-29-67-14-13-55-30-61-12-2-45-4-53-27-21-28-54-57-8-37-38-15-11-41-44-1
509718.8366	1-37-41-46-4-22-12-57-3-7-11-9-17-70-43-45-10-42-44-20-61-14-48-66-5-49-53-24-2-39-64-56-30-67-6-19-58-69-52-18-33-50-15-32-25-62-36-31-60-13-54-29-51-59-63-35-34-23-38-47-26-28-40-55-16-8-27-65-68-21
511340.7062	7-70-45-46-8-58-67-53-42-38-10-18-65-33-27-12-15-6-28-9-13-39-23-36-21-14-64-59-44-30-43-20-24-66-17-22-62-2-32-16-60-31-37-5-54-3-35-56-51-49-4-25-48-50-29-63-40-41-55-11-47-61-1-34-19-69-68-52-26-57
508614.9272	68-26-46-8-34-48-62-52-4-45-25-22-21-12-41-10-59-50-18-56-66-7-60-40-1-67-58-64-35-47-2-49-9-20-37-61-63-65-14-6-38-15-32-3-39-44-24-31-17-53-13-16-5-36-19-33-28-42-27-51-29-23-57-70-30-11-55-54-43-69
En İyi Çözüm Ortalaması	511104.22

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** İsmail AKARGÖL  
**Uyruğu:** Türkiye (T.C)  
**Doğum Tarihi ve Yeri:** 19.03.1992 - Sivas  
**Medeni Durum:** Bekar  
**e-mail:** iakargol@hotmail.com  
**Yazışma Adresi:** Seyrani Mah. Başaklı Sok. Seyrani Konağı A Blok 5/42  
 Kat:11

### EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Endüstri Müh. ABD	2019
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği	2015
	Erciyes Üniversitesi, Gıda Mühendisliği	2016
Lise	Melikgazi Mustafa Eminoğlu Anadolu Lisesi, Kayseri	2010

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2019-Halen	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Araştırma Görevlisi
2014-2015	Boytaş 4 Fabrikası	İntörn Mühendis

### YABANCI DİL

İngilizce