

Mesut Cemil İŞLER

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

Doktora Tezi

**İmalat Sistemlerinde Öğrenme Etkili Akış Tipi
Tam Zamanında Çizelgeleme Probleminin
Teorik ve Uygulamalı İncelenmesi**

Mesut Cemil İŞLER

KÜ 2010

HAZİRAN 2010

ÖZET

İMALAT SİSTEMLERİNDE ÖĞRENME ETKİLİ AKIŞ TİPİ TAM ZAMANINDA ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN TEORİK VE UYGULAMALI İNCELENMESİ

İŞLER, Mesut Cemil

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Veli ÇELİK

Ortak Danışman: Prof Dr. Bilal TOKLU

Haziran 2010, 109 sayfa

Bir görev veya iş sürekli yapıldığı takdirde belirli bir alışkanlık ve öğrenme olur ve ilerleyen zamanlarda bu işi tamamlamak için gerekli kaynaklara olan (işgücü, malzeme, vb.) ihtiyaç azalır. Bu olgu ilk kez Wright tarafından tanımlanmıştır. Wright uçakların üretiminde üretilen uçak sayısı artarken direk işçilik maliyetlerinde nasıl bir azalma olduğunu tespit etmiştir. Bu gözlemin doğruluğu uçak üreticileri tarafından da tutarlı bulunmuştur. Bu bağlamda “Öğrenme Etkisi”, aynı veya benzer işlerin tekrarlanmasıyla üretim sürecinde işlerin tekrar sayısı nispetinde daha kısa sürede yapılmasını ifade eden etkidir.

Erken/Geç (E/G) tamamlanma problemi, ilk ortaya çıktığı yıllarda ağırlıklandırılmış mutlak sapma problemi olarak ele alınmıştır. Hem erken hem de geç tamamlanma zamanı çizelgeleme problemleri için önemli ölçütlerdir. Toplam gecikme ölçütü erken tamamlanan işlere ilişkin sonuçları göz ardı ederken sadece geç tamamlanan işlerin cezaları ile ilgilenir. Ancak bu eğilim Tam Zamanında Üretim (TZÜ) konusuna olan artan ilgi ile birlikte değişmeye başlamıştır. TZÜ’de erken tamamlanma da önemli bir performans kriteridir ve geç tamamlanma ile birlikte değerlendirilir.

Bu çalışmada çizelgelemede erken/geç tamamlanma performans kriteri ve öğrenme etkili işlem zamanlarının dikkate alındığı yayınlara yönelik literatür taraması ve sonucunda literatüre yönelik bazı tespitler yapılmıştır. İki makine akış tipi çizelgelemede erken/geç tamamlanma performans kriteri ve öğrenme etkili işlem zamanları dikkate alınarak bir tamsayılı programlama modeli önerilmiş ve örnek problemlerle çözüm sonuçları değerlendirilmiştir. ğrenme etkili tam zamanında çizelgeleme problemi bir KOBİ için ele alınmış, alternatif yöntemlerle çözüm sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve KOBİ'deki kullanıcılara yönelik bu tamsayılı programın kolaylıkla çalıştırılmasını sağlayan Microsof Excel®'de arayüz tasarlanmıştır. Büyük boyutlu (iş sayısı fazla olan) problemleri daha etkin bir şekilde çözebilmek için tabu araması ve genetik algoritma yaklaşımları geliştirilmiş ve literatürdeki test problemleri ve rassal arama yöntemi kullanılarak bu sezgisel yaklaşımların performanslarına yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akış tipi çizelgeleme, öğrenme etkisi, E/G tamamlanma, Eniyileme, Sezgiseller.

ABSTRACT

THEORETICAL AND APPLIED INVESTIGATION OF JUST-IN-TIME FLOW-SHOP SCHEDULING PROBLEM WITH A LEARNING EFFECT IN MANUFACTURING SYSTEMS

İŞLER, Mesut Cemil

Kırıkkale University

The Graduate Scholl of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Doctor of Philosophy (PhD) Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Veli ÇELİK

Co-Supervisor: Prof. Dr. Bilal TOKLU

June 2010, 109 Pages.

When a task or work is done continuously, there will be an experience so following times needs of required resources (manpower, materials, etc.) will be reduced. This event described firstly by Wright. Wright determined how direct workmanship costs decreased when number of plains produced increased. Later, this phenomenon was observed by other plain producers. Learning effect states works can be done in shorter times by repeating the same or similar works in a production process.

Earliness/Tardiness (E/T) problem was known as weighted absolute deviation problem in early years of scheduling problem. Not only tardiness but also earliness is very important performance criteria for scheduling problem. While total tardiness criteria provides adaptation for due date (ignoring results of earliness done jobs), it deals with only cost of tardiness. However this phenomenon has started to change with Just in Time (JIT) production concept. Earliness is as important as tardiness on JIT production.

This study starts with a there is literature survey which us directed to wards earliness/tardiness performance criteria and learning effect processing in scheduling. An integer programming model is proposed for incorporating Earliness/Tardiness performance criteria and processing times with learning effect into the two machine

flow-shop scheduling problem and solution results was evaluated with sample problems. Just-in-Time scheduling problem with learning effect is considered for an SME, the solution results were compared with alternative methods and an interface is developed in Microsoft Excel[®] to be used by the SME. Also, Genetic Algorithm and Tabu Search were improved by us so that large size problems could be solved effectively. These heuristic methods' performances were evaluated using test problems in the literature and Random Search method.

Key Words: Flow-shop scheduling, Learning effect, Earliness/Tardiness, Optimization, Heuristics.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında değerli bilgileriyle yol gsteren ve her turlu yardımlarını esirgemeyen Tez Yöneticisi Değerli Hocalarım Sayın Prof. Dr. Veli ÇELİK ve Sayın Prof. Dr. Bilal TOKLU'ya, Tez İzleme Komitesindeki fikirleriyle teze katkı sağlayan Değerli Hocam Sayın Doç. Dr. Burak BİRGÖREN'e, tez çalışmalarım esnasında bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Tamer EREN'e, tez çalışmalarım esnasındaki yardımlarından dolayı Sevgili Arkadaşlarım M. Duran TOKSARI, M. Akif DANACI, Talip KELLEĞÖZ ve Mevlüt ARSLAN'a, bu günlere gelmemdeki fedakârlıklarından ve her türlü desteklerinden ötürü Aileme ve son olarak bana birçok konuda olduğu gibi tezimi hazırlamam esnasında da desteğini esirgemeyen Eşime buradan teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1.GİRİŞ	1
2.MATERYAL VE YÖNTEM	8
2.1.ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI.....	8
2.2.ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ GÖSTERİM VE MODELLERİ	15
2.3.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	19
2.3.1.Öğrenme Etkisinin Çizelgelemede Uygulanması ve Literatür Taraması ...	19
2.3.1.1.Konum Esaslı Öğrenme Etkisi	20
2.3.1.1.1.İş Bağımlı Konum Esaslı Öğrenme Etkisi	23
2.3.1.1.2.Otonom Konum Esaslı ve Teşvik Edilmiş Öğrenme	24
2.3.1.1.3.Konum Esaslı Öğrenme ve Kötüleşen İşler	25
2.3.1.1.4.Konum Esaslı Lineer Öğrenme Fonksiyonu	26
2.3.1.2.İşlem Zamanlarının Toplamı Esaslı Öğrenme Etkisi.....	27
2.3.2.Çizelgelemede Erken/Geç Tamamlanma Problemleri ve Literatür Araştırması ...	29
2.3.2.1.Ortak Teslim Tarihli Problemler	31
2.3.2.1.1.Farklı Erken ve Geç Tamamlanma Cezalı Modeller	38
2.3.2.1.2.İşe Bağımlı Erken ve Geç Tamamlanma Cezalı Modeller	43
2.3.2.1.3.Doğrusal Olmayan Cezalı Modeller	43
2.3.2.1.4.Teslim Tarihi Toleranslı Modeller	45
2.3.2.2.Farklı Teslim Tarihli Problemler.....	46
2.3.2.2.1.Aylak Zamanların Yer Almadığı Modeller.....	47
2.3.2.2.2.Aylak Zamanların Yer Aldığı Modeller	48
2.3.2.3.Zorunlu Teslim Tarihli Problemler.....	49
2.3.2.4.Farklı Özelliklerdeki Diğer Problemler	50
2.3.2.4.1.İlave Cezalar İçeren Modeller	51
2.3.2.4.2.Hazırlık Süreleri İçeren Modeller.....	53
2.3.2.4.3.Paralel Makineli Modeller	55
2.3.3.Çizelgeleme Problemlerinin Zorluğu ve Literatürün Değerlendirilmesi	58
3.ARAŞTIRMA BULGULARI	59

3.1.PROBLEMİN VARSAYIMLARI, NOTASYONU VE FORMÜLASYONU	59
3.1.1.Tamsayılı Programlama Modeli	60
3.1.2.Sezgisel Yaklaşımlar	62
3.1.2.1.Çizelge Başlangıç Zamanı Belirleme Algoritması (ÇBZBA)	63
3.1.2.2.Genetik Algoritma	63
3.1.2.3.Tabu Arama	70
3.1.2.4.Rassal Arama	74
3.2.UYGULAMA	75
3.2.1.Tamsayılı Programlam Modeli İçin Literatürde Uygulama	75
3.2.1.1.Uygulamanın Planı	75
3.2.1.1.Küçük Boyutlu Problemler	76
3.2.1.2.Büyük Boyutlu Problemler	78
3.2.2.KOBİ’de Uygulama	80
3.2.2.1.KOBİ’nin Tanıtımı ve Verilerin Elde Edilmesi	80
3.2.2.2.Modelin Kurulması ve Uygulanması	83
3.2.2.2.1.Modelin Uygulanması İçin Excel Arayüzü	84
3.2.2.3.KOBİ’deki Uygulama Sonuçlarının Değerlendirmesi	86
4.SONUÇLAR VE TARTIŞMA	88
KAYNAKLAR	92
EKLER	105
EK-1. TAMSAYILI PROGRAMLAMA MODELİNİN LINGO KODU (N=5 İÇİN ÖRNEK)	105
EK-2. KOBİ İÇİN GELİŞTİRİLEN TAMSAYILI PROGRAMLAMA MODELİNİN LINGO KODU	107
EK-3. LINGO VE MS EXCEL BAĞLANTI MAKRO KODU	108
ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Örnek bir akış tipi üretim sistemi	1
Şekil 1.2. Üretim sistemlerinde bilgi akış diyagramı	3
Şekil 1.3. Örnek bir öğrenme eğrisi.....	5
Şekil 2.2. Erken ve geç tamamlanan iş setleri.....	33
Şekil 3.1. Kısıt 3.6'nın grafik gösterimi	61
Şekil 3.2. Örnek bir rulet tekeri seçim tekniği	66
Şekil 3.3: Çizelgeleme problemleri için örnek bir tek noktalı çaprazlama.....	67
Şekil 3.4. Mutasyon operatörlerinin işleyişine örnek.....	67
Şekil 3.5. Ele alınan probleme uygulanan GA yapısı.....	69
Şekil 3.6. Ele alınan probleme uygulanan TA yapısı	74
Şekil 3.7. Küçük boyutlu test problemleri için ortalama çözüm zamanı (s).....	76
Şekil 3.8. KOBİ'de ele alınan montaj hattı (1.Makine: Montaj Bölümü, 2.Makine: Paketleme Bölümü).....	81
Şekil 3.9. KOBİ için tasarlanan ve genel kullanıma açık MS Excel arayüzü.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Çizelgeleme problemlerinin genel sınıflandırması	8
Çizelge 3.1. Ele alınan problemin çözümünde kullanılan GA parametreleri	68
Çizelge 3.2. Ele alınan problemin çözümünde kullanılan TA parametreleri.....	73
Çizelge 3.3. TA için başlangıç çözümlerinin tanımı	73
Çizelge 3.4. Literatür uygulamasına ait bilgiler	75
Çizelge 3.5. Küçük boyutlu problemler için ortalama %Hata değerleri.....	77
Çizelge 3.6. Büyük boyutlu problemler için %Fark değerleri	79
Çizelge 3.7. KOBİ'deki işlere ait işlem zamanları ve erken/geç tamamlanma cezaları..	82
Çizelge 3.8. KOBİ'den elde edilen verilere uygulanacak alternatif yöntemler ve açıklamaları	84
Çizelge 3.9. KOBİ'den elde edilen verilere uygulanan yöntemlere ait sonuçlar	87

KISALTMALAR DİZİNİ

API (Adjacent Pairwise Interchange): Bitişik iş çiftlerinin yer değiştirmesi (Komşu arama stratejisi)

EDD (Earliest Due Date): En erken teslim tarihli iş en başa gelecek şekilde sıralama kuralı

E/G [E/T] (Earliness/Tardiness): Erken ve Geç tamamlanma performans ölçütü

FIFO (First In First Out): İlk giren ilk çıkar presibi

GA (Genetic Algorithm): Genetik Algoritma

KOBİ [SME] (Small and Medium Enterprise): Küçük ve Orta Büyüklükte İşletme

LPT (Long Process Time): En uzun işlem süreli iş en başa gelecek şekilde sıralama kuralı

LR (Learning Rate): Öğrenme oranı

NP (Nonpolynomially): Polinom zaman sınırlı olmayan

P (Polynomial): Polinom zaman sınırlı olan

PI (Pairwise Interchange): Bütün iş çiftlerinin yer değiştirmesi (Komşu arama stratejisi)

RA [RS] (Random Search): Rassal Arama

SPT (Short Process Time): En kısa işlem süreli iş en başa gelecek şekilde sıralama kuralı

TA [TS] (Tabu Search): Tabu Arama

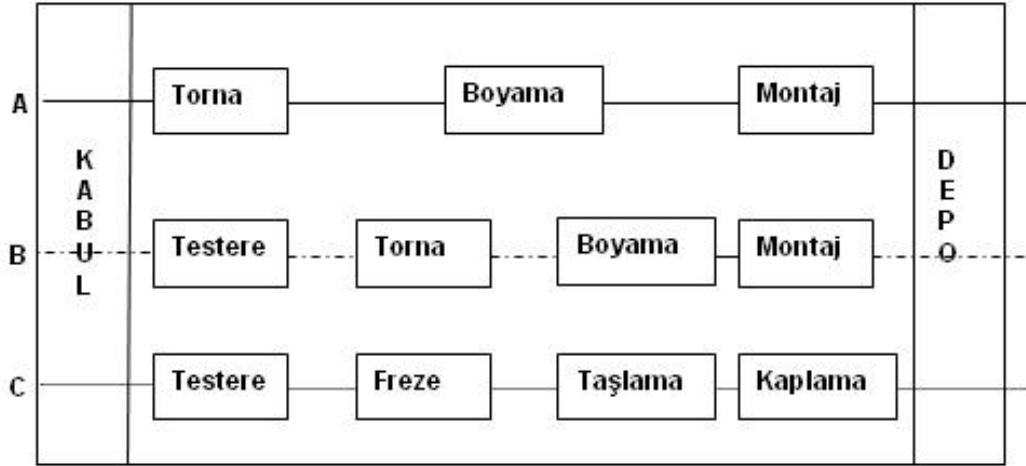
TZÜ [JIT] (Just In Time Manufacturing): Tam zamanında üretim

WSPT (Weighted Short Process Time): Ağırlıklandırılmış en kısa işlem süreli iş en başa gelecek şekilde sıralama kuralı

1.GİRİŞ

Üretim kavramı ekonomistler ve mühendisler tarafından farklı biçimde tanımlanır. Ekonomistler üretimi fayda oluşturmak için yapılan işlemler olarak tanımlarken, mühendisler üretimi fiziksel bir varlık üzerinde onun değerini arttıracak değişiklikler yapmak veya hammaddelerin/yarı mamullerin kullanabilir bir ürüne dönüştürülmesi olarak tanımlarlar. Mamullerin üretiliş biçimlerine üretim sistemi denir. Üretim sistemi Proje Tipi Üretim, Atölye Tipi Üretim, Akış Tipi Üretim ve Sürekli Üretim olmak üzere dört ana başlık altında toplanabilir (Türker, 2003).

Akış tipi üretim sistemi, çıktısı belirli bir mamul çeşidi olan işlem ünitelerinin yalnız bu amaç için düzenlendiği ve çok çeşitli girdilerin seri olarak geldiği üretim sistemi tipidir. Ürünlerin standart ve çok miktarda üretilmesinin gerektiği ve talebin sürekli olduğu durumlarda, akış tipi üretim sistemine geçilmesi, üretim için daha ekonomik bir yaklaşım olacaktır.



Şekil 1.1. Örnek bir akış tipi üretim sistemi (Türker, 2003)

Üretim Planlama ve Kontrol elemanları, farklı üretim sistemlerinde farklılıklar göstermesine karşılık, genel olarak Ön Planlama, Planlama ve Kontrol olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir (Türker, 2003).

A) Ön Planlama: Ön planlama aşamasındaki çalışmalar olmaksızın güvenilir bir üretim planının yapılması olanaksızdır. Ön planlama çalışmaları şu konuları içerir:

- ✓ Tüketici Araştırması, Satış Tahminleri,
- ✓ Mamul Tasarımı ve Geliştirme,
- ✓ Tesis Yatırım Politikası,
- ✓ İş Yeri Düzeni.

B) Planlama: Planlama çalışmaları iki ana konuda yapılır:

- ✓ Kaynaklara Yönelik Planlama: Malzeme, Metot, Makine, İşgücü.
- ✓ Yapılacak İşleri Planlama: Rotalama, Tahmin, Çizelgeleme.

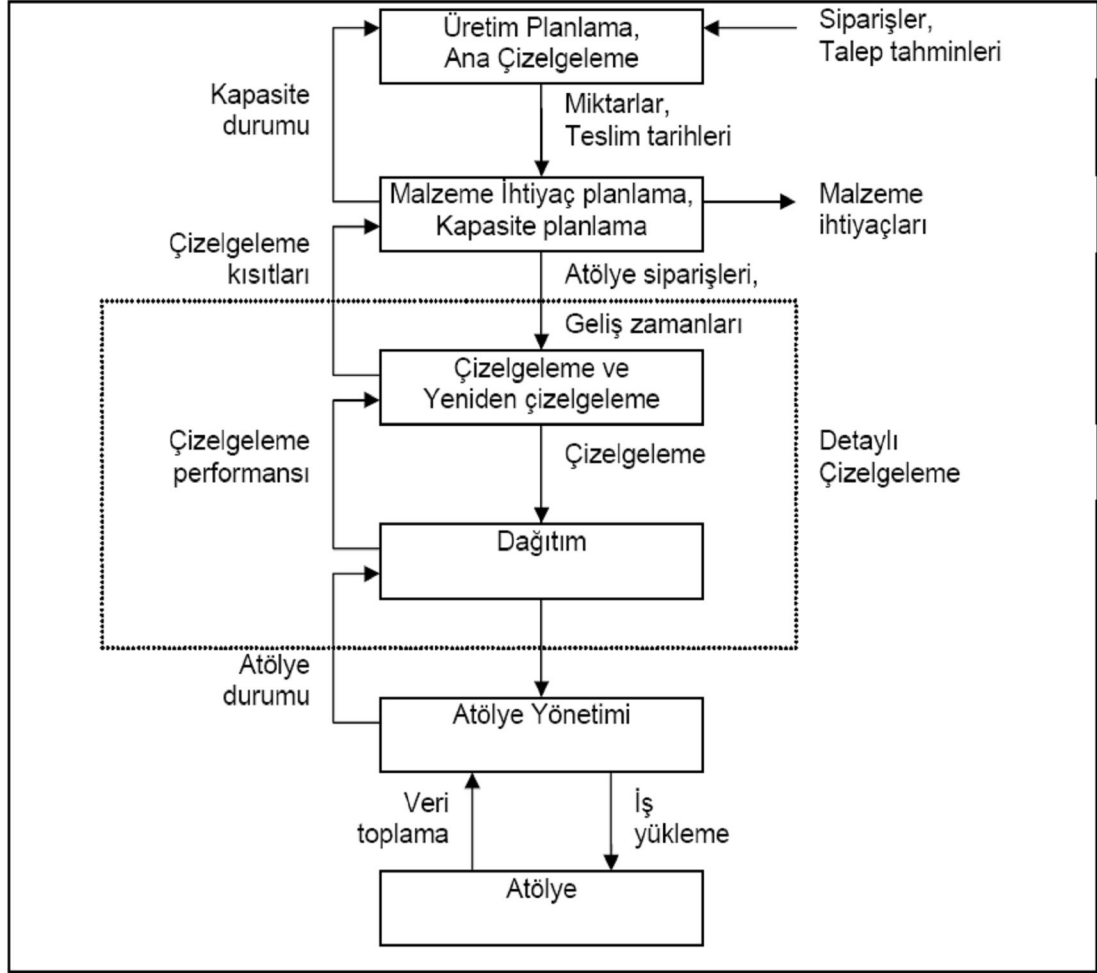
C) Kontrol: Üretim kontrolü elemanları; dağıtım, takip, kontrol, muayene ve derleme olarak tanımlanır. Kontrolün en önemli fonksiyonları; üretimdeki aksamaların ve plandan sapmaların tespit edilmesi ve gerekli düzeltmelerin yapılabilmesi için bilgi geri iletilmesinin (feed back) sağlanmasıdır.

Çizelgeleme, üretim ve hizmet endüstrilerinde çok önemli bir karar verme süreci olup matematiksel teknikler ve/veya sezgisel yöntemler kullanılarak, işletmenin kıt kaynaklarının gereken görevlere atanmasını sağlar. Kaynakların iyi atanması, işletme açısından önemli performans ölçütlerinin ve amaçlarının eniyilenmesini sağlar. Buradaki kıt kaynaklar; atölye için tezgâh, havaalanı için pist, inşaat için işçi veya bilgisayar için işlem üniteleri olabilir. Görevler ise; atölyedeki işlemler, havaalanındaki iniş ve kalkışlar, inşaattaki proje safhaları veya bilgisayardaki çalıştırılması düşünülen program olabilir. Ayrıca her görev öncelik ilişkisine, başlama ve bitiş sürelerine veya en geç tamamlanma zamanına sahip olabilir. Bunların yanı sıra çizelgelemenin amacı da çeşitli olabilir. Örneğin işlerin tamamlanma süresinin veya geciken iş sayısının en aza indirilmesi ve benzeri şekilde olabilir (Pinedo ve Chao, 1999; Kellegöz, 2006).

Ayrıca, üretim sisteminde işi zamanında teslim etmek, ara stokları mümkün olduğunca azaltmak, işin sistemdeki kalış süresini azaltmak, makine ve işçiyi verimli kullanmak, makine hazırlık zamanlarını azaltmak gibi farklı amaçlar olabilir (Eren, 2004).

Bir organizasyondaki çizelgeleme işlevi, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi, sadece atölyeden değil, aynı zamanda orta ve uzun dönemli planlamadan sorumlu üretim planlama işlevinden de etkilenir. Üretim planlama işlevi; kaynak ihtiyaçları, talep tahminleri ve stok seviyelerini göz önünde bulundurarak uzun dönemli kaynak

tahsisinin yanı sıra firmanın ürün karışımını da eniyilemeyi amaçlar. Bu yüksek planlama seviyesindeki kararlar çizelgeleme işlevini doğrudan etkileyecektir (Pinedo ve Chao, 1999; Kellegöz, 2006).



Şekil 1.2. Üretim sistemlerinde bilgi akış diyagramı (Kellegöz, 2006)

Çizelgeleme problemleri kombinatoriyal eniyileme problemleri olduğundan bu problemler genel olarak ya P ya da NP problemler olarak adlandırılır. P tipi problemler polinom zaman sınırlı bir algoritma ile etkin zamanda çözülebilmektedir. NP tipi problemler için polinom zaman sınırlı bir algoritmanın bulunması mümkün görülmemekte ve bu problemler eniyi olarak ancak üstel zamanda çözülebilmektedir (Eren ve Güner, 2002).

Akış tipi çizelgeleme problemleri makine sayısı ve işlerin makinelerdeki rotası ile ilgilidir. Eğer makine sayısı birden çok ve çizelgenecek işler de makinelerde aynı

rotayı takip ediyorsa bu tarz problemler literatürde akış tipi çizelgeleme problemleri olarak adlandırılır (Eren, 2004).

Günümüzde birçok endüstri alanında akış tipi üretim yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle, akış tipi çizelgeleme problemi, üzerinde dikkatle durulan bir problem olmuştur. Permütasyon akış tipi çizelgeleme problemi, tüm makinelerde bir işin işlem sırasının aynı olduğu, m makine ($j=1,2,\dots,m$) üzerinde belli işlem sürelerine sahip n işin ($i=1,2,\dots,n$) çizelgelenmesinden oluşur. Akış tipi çizelgeleme problemleri birleşik eniyileme problemi özelliğindedir ve NP-zor problem sınıfındadır (Yağmahan ve Yenisey, 2006).

Bir görev veya iş sürekli yapıldıkça, işe yönelik belirli bir alışkanlık kazanılır ve ilerleyen zamanlarda bu işi tamamlamak için gerekli işgücü, malzeme, vb. kaynaklara olan ihtiyaç azalır. Bunu, öğrenme kavramı ile açıklayabiliriz. İş ortamı ile ilgili bu öğrenme olgusuyla ilgili olarak ilk kez Wright (1936) araştırma yapmıştır. Wright uçakların üretiminde, üretilen uçak sayısı artarken direk işçilik maliyetlerinde nasıl bir azalma olduğuna yönelik çalışmasıyla öğrenme olgusunu sayısallaştırabilen “Öğrenme Eğrisi” kavramını ortaya koymuştur (Biskup, 1999).

Daha sonraları farklı alanlarda da bu kavramdan bahsedilmiştir. Örneğin, Heizer ve Render (2001), işgücü tahmininde, maliyet ve bütçe hesaplarında, dış satın almalarda, şirket gelişiminin tespiti vb. birçok uygulamalarda öğrenme eğrilerini kullanmanın yararlı olacağını ifade etmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, farklı organizasyonlarda farklı ürünlerin, farklı öğrenme eğrilerine sahip olduklarını ve yönetim kalitesi ile ürün prosesinin potansiyeline bağlı olarak öğrenme oranlarının değiştiğini göstermişlerdir (Heizer ve Render, 2001). Çoğu öğrenme eğrileri, gerekli kaynak ihtiyacının yapılacak iş iki katına çıktığında sabit bir yüzde ile azalacağı temeline dayanır (Biskup, 1999; 2008).

$$\bullet P_{[j]}=P_{[1]}*j^a \quad (1.1)$$

– $P_{[j]}$: j. birimi yapmak için gerekli zaman

– $P_{[1]}$: 1. birimi yapmak için gerekli zaman

– a: Öğrenme etkisi parametresi; $a=\log(LR)/\log(2)$ (1.2)

– LR: Öğrenme oranı (%80 öğrenme eğrisi için $LR=0.8$ 'dir ve LR küçüldükçe öğrenme etkisi artar.)

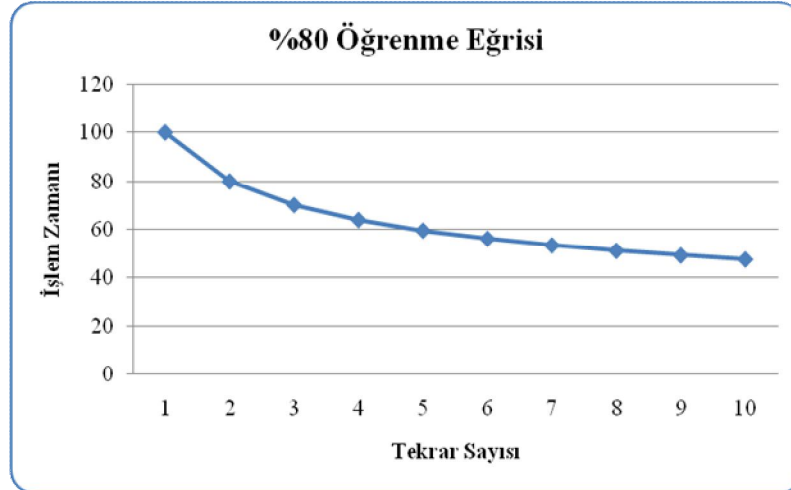
Örneğin;

Bir montaj işlemine %90 öğrenme eğrisinin tatbik edilebileceği bulunmuştur. Birinci birimi üretmek için gerekli zaman 30 dakikadır. 5'inci birimi üretmek için gerekli zaman ne kadardır? 30'uncu birim için ne kadardır?

- $a = \log(0.9) / \log(2) = -0.152$
- $P_{[5]} = 30 * (5^{-0.152}) = 23.49$
- $P_{[30]} = 30 * (30^{-0.152}) = 17.89$
- $T_{[j]} = j$ adet birimi üretmek için gerekli toplam zaman $= P_{[1]} [1^a + 2^a + \dots + j^a]$ (1.3)
- $C_{[j]} = j$ birimden birini üretmek için gerekli ortalama zaman $= T_{[j]} / j$ (1.4)

Örneğe devam edersek:

- $T_{[5]} = 30 * [1^{-0.152} + 2^{-0.152} + \dots + 5^{-0.152}] = 130.18$
- $C_{[5]} = T_{[5]} / 5 = 130.18 / 5 = 26.04$



Şekil 1.3. Örnek bir öğrenme eğrisi (Biskup, 1999; 2008)

“Öğrenme Etkisi” kavramı ise, aynı veya benzer işlerin tekrarlanmasıyla üretim sürecinde işlerin tekrar sayısı nispetinde daha kısa sürede yapılmasını ifade etmektedir. Yöneylem araştırmasıyla ilgili pek çok alanda öğrenme etkisinin dikkate alındığı çalışmalar mevcuttur. Buna karşın üretim çizelgelemede bu konuyla ilgili çalışma sayısı az, akış tipinde ise çok azdır (Biskup, 1999; Eren ve Güner, 2004).

Günümüzde yeni yaklaşımlarla çağın gereklerine daha uygun sistemler uyarlanmıştır. Bunlardan biri de Tam Zamanında Üretim (TZÜ) sistemidir. Değişik uygulamalar temelinde TZÜ sistemine çeşitli tanımlar getirilebilir. Bu tanımların bazıları, sistemi yalnızca stokların azaltılmasıyla sınırlar. Oysa TZÜ bundan çok daha geniş

kapsamlıdır. Yalnızca imalatla ilgili etkinliklerde değil, malzeme temininden depolamaya, bakım onarımdan mühendislik tasarımına, satıştan üst yönetime kadar üretim sisteminin diğer alanlarında da etkisini hissettirir. Çünkü TZÜ, tüm kuruluştaki zaman ve kaynak kayıplarının önlenmesi ve yok edilmesi yoluyla iş verimliliğinde önemli ölçüde ve sürekli iyileştirmeyi amaçlayan bir stratejidir. Daha genel bir ifade ile TZÜ felsefesi, tüm birimlerin katılımıyla en az maliyet ve en yüksek müşteri memnuniyetini sağlayacak sürekli iyileştirmeyi amaçlayan bir stratejidir (Öge, 2001; Acar, 2002).

Erken(Earliness)/Geç(Tardiness) tamamlanma cezalarının enküçüklenmesi problemi TZÜ felsefesi ile önem kazanmıştır. Erken/Geç (E/G) tamamlanma çizelgeleme problemleri literatürde tam zamanında çizelgeleme problemi olarak da ifade edilmiştir. (Chang, 1999; Mondal ve Sen, 2001; Lin vd., 2007).

E/G tamamlanma problemi, önceleri enküçük ağırlıklandırılmış mutlak sapma problemi olarak bilinmekteydi. Hem erken hem de geç tamamlanma çizelgeleme problemlerinde önemli performans ölçütleridir. Bir işin erken veya geç tamamlanmaması bağımlı işlerde veya montaj işlerinde, fazla ara stokların oluşmasına veya ürünlerin dağıtım çizelgelerinin gecikmesine neden olmaktadır. Çizelgeleme teorisi ile ilgili literatürün önemli bölümü toplam akış zamanı, geciken iş sayısı, toplam gecikme gibi düzenleyici ölçüt ağırlıklıdır. Toplam gecikme ölçütü teslim tarihlerine uyuma ilişkin göstergeleri sağlar ve erken tamamlanan işlere ilişkin sonuçları göz ardı ederken sadece geç tamamlanan işlerin cezaları ile ilgilenir. Ancak bu eğilim TZÜ konusuna artan ilgi ile birlikte değişmeye başlamıştır. TZÜ’de erken tamamlanma geç tamamlanma kadar önemlidir ve birlikte değerlendirilir (Baker, 1997; Toksarı, 2008).

Bir tam zamanında çizelgeleme yapısında, erken tamamlanan işler teslim tarihlerine kadar üreticinin elinde kalır. Bu da ürünün bozulmasından kaynaklanan maliyetler ile depolama veya sigorta gibi maliyetler getirir. Buna ilaveten, bitmiş ürün stoku dolaylı olarak fırsat maliyeti taşıyan verimsiz bir yatırımdır. Diğer yandan, teslim tarihlerinden sonra tamamlanan işler müşteri tatminsizliği, sözleşme cezaları, satış kayıpları ve itibar kaybı gibi olumsuzluklara yol açar. Bu nedenle, ideal bir çizelge

için tüm işler teslim tarihlerinde tamamlanmalıdır (Baker, 1997; Gordon vd., 2001; Toksarı, 2008).

Çizelgeleme problemi olarak E/G tamamlanma cezalarına yönelik tek makineli birçok problem incelenmesine rağmen, paralel ve akış tipi çizelgelemede daha az çalışma yapılmıştır (Lauff ve Werner, 2004).

Bu çalışmanın amacı temel bir üretim planlama konusu olan çizelgelemede; literatürde henüz değerlendirilmemiş ve karşılaşılabilecek bir çizelgeleme problemi olarak öğrenme etkili akış tipi üretimde toplam ağırlıklı erken/geç tamamlanmanın enküçüklenmesine çözüm yaklaşımları geliştirmektir.

Bu kapsamda tezin ikinci bölümünde; çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılmasından, gösterim ve modellerinden ve çizelgelemede öğrenme etkisi ve E/G tamamlanma problemlerine yönelik literatür araştırması sonuçlarından, üçüncü bölümünde; ele alınacak problemin tanımlanıp, probleme literatüre uygun farklı çözüm yaklaşımları geliştirilmesinden ve problemin bir KOBİ açısından ele alınarak problemin çözümü ve çözüm için kolaylaştırıcı çalışmalardan bahsedilecektir. Dördüncü ve son bölümde ise; bu tez çalışmasının sonuçları değerlendirilecektir.

2.MATERYAL VE YÖNTEM

2.1.ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Çizelgeleme problemleri; problemin yapısı, makine ve/veya üretim biçimleri, performans ölçütleri, iş özellikleri, çözüm yöntemleri ve ölçüt sayısına bağlı olarak Çizelge 2.1'deki gibi genel bir sınıflandırmaya tabi tutulabilir (Eren, 2004):

Çizelge 2.1. Çizelgeleme problemlerinin genel sınıflandırması

<u>Problemin Yapısı</u> Deterministik Stokastik
<u>Makine Biçimi</u> Tek Makineli Sistemler Paralel Makineli Sistemler Akış Tipi Sistemler Atölye Tipi Sistemler
<u>Performans Ölçütleri</u> Düzenli Ölçütler Düzenli Olmayan Ölçütler
<u>İş Özellikleri</u> Öncelik Kısıtları Rotalama Kısıtları Malzeme Taşıma Kısıtları Hazırlık Zamanları ve Maliyetleri Öncüllükler Depolama Alanı ve Bekleme Zamanı Kısıtları Stoğa-Üretim ve Sipariş-Üretim Takım ve Kaynak Kısıtları Öğrenme Etkisi
<u>Cözüm Yöntemleri</u> Geleneksel Eniyileme <i>Dinamik Programlama</i> <i>Dal-Sınır Yöntemleri</i> <i>Tamsayılı Programlama Formülasyonu</i> Yeni Yaklaşımlar (Sezgiseller) <i>Tabu Arama</i> <i>Genetik Algoritma</i> <i>Tavlama Benzetimi</i> <i>Karınca Kolonisi</i>
<u>Ölçüt Sayısı</u> Tek Ölçüt Çok Ölçüt

Problemin Yapısı: Eğer işlerin süreleri ve diğer parametreler kesin belirlenebilir problemler ise, deterministik çizelgeleme problemi olarak modellenir. Aksi halde stokastik problem haline dönüşür. Stokastik parametreler rasgele değişkenler

şeklinde modellenir. Bu rasgele değişkenler bilinen bir olasılık dağılıma göre dağılır. Bu modelin en belirgin özelliği parametrelerin davranışını yansıtan dağılıma uygun olmasıdır. Stokastik modeller gerçek uygulamalarda deterministik modellere göre daha iyi sonuç verir (Baker, 1974).

Makine Biçimi: Çizelgeleme problemleri 4 temel makine biçimi olarak ele alınır (Eren, 2004):

Tek makineli sistemler: Birçok üretim sistemi içerisinde tek makineli modeller görülebilir. Örneğin çok makineli bir modelde dahi darboğaz bir makine varsa, darboğaz makinedeki iş sırası tüm sistemin performansını belirler. Darboğaz makine çizelgelendikten sonra bu makineden önceki ve sonraki işlemler çizelgelenir. Bu yaklaşım orijinal problemi tek makineli çizelgeleme problemine indirgemeyi sağlayacaktır. Tek makineli modeller çok çeşitli özel koşullar ve kısıtlar altında ve farklı birçok amaç fonksiyonu için analiz edilmiştir. Tek makineli bir ortamda eniyi çözümleri sağlamak, uygulamak ve belirlemek daha kolaydır.

Paralel makineli sistemler: Tek makineli sistemlerin genelleştirilmiştir. Birçok üretim çevresi, birçok aşama veya iş merkezlerinden oluşmuştur. Her aşamada paralel olarak çalışan birçok makine vardır. Bu makineler özdeş veya farklı olabilir. Özdeş olduğunda problemler biraz daha kolaydır. Paralel makineli modeller tek makineli modellerdeki sebeplerden dolayı önemlidir. Özel bir iş merkezi darboğaz olduğunda bu iş merkezinde çizelgeleme tüm sistemin performansını belirleyecektir. Bu darboğaz paralel makinelerin bir yığını olarak modellenebilir ve analiz edilebilir.

Akış tipi sistemler: Çoğu imalat veya montaj işlerinde, birçok farklı makine üzerinde birçok işlem gerçekleştirilir. Şayet tüm işlerin rotası aynı olursa, yani tüm işler aynı makineleri aynı sırada takip ediyorlarsa, bu ortam akış tipi olarak adlandırılır. Makineler seri bir şekilde kurulur ve ne zaman bir iş bir makine üzerinde işlemini tamamlarsa bu iş bir sonraki kuyruğa bağlanır. İşlerin sırası makineden makineye değişebilir. Çünkü işler makineler arasında yeniden sıralanabilir. Ancak bir malzeme taşıma sistemi işleri makineden makineye aktarıyorsa sistemde aynı iş sırası sürdürülür. Permütasyon akış tipi çizelgelemede eniyi çizelgeyi belirlemek için $(n!)^m$ tane farklı çizelgenin incelenmesi gerekir. Bu çizelgelerden bazıları ortadan kaldırılabilirse çözüm kolaylaşır.

Atölye tipi sistemler: Farklı özellikteki birden çok makine ile farklı rotalara sahip işlerin bir atölye ortamında gerçekleştirilmesidir. En basit atölye tipi modellerde bir işin özel bir makine üzerindeki rotasında en fazla bir kez işlem görebileceği varsayımı vardır. Diğerlerinde ise bir iş bir makineyi sistemdeki rotasına bağlı olarak birçok kez ziyaret edebilir. Bu özellik modelin karmaşıklığını önemli ölçüde artırır.

Günlük hayatta birçok makine ortamları burada tarif edilen modellerden daha karmaşıktır. Ancak burada belirtilen modeller daha karmaşık modellerin analizi için esas teşkil ederler.

Performans Ölçütleri: Çizelgeleme problemlerinde performans ölçütleri düzenli performans ölçütleri ve düzenli olmayan performans ölçütleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çizelgeleme amacı iş tamamlanma zamanlarının azalmayan bir fonksiyonu ise, performans ölçütü düzenlidir. Düzenli olmayan performans ölçütleri genellikle işin tamamlanma zamanlarının monoton olmayan fonksiyonlarıdır. Düzenli performans ölçütüne örnek olarak akış zamanı, en büyük tamamlanma zamanı ve gecikme ile ilgili ölçütler verilebilir. Düzenli olmayan performans ölçütüne özellikle tam zamanında çizelgeleme problemlerinde dikkate alınan erken bitirme ölçütü örnek olarak verilebilir (Pinedo, 1995; Baker, 1997; Eren, 2004).

İş Özellikleri: İşlere ait bazı özellikler çizelgeleme problemlerinin çözümünü etkilemektedir (Baker, 1974; Pinedo ve Chao, 1999; Allahverdi vd., 1999; Biskup, 1999; 2008):

Öncelik kısıtları: Çizelgeleme problemlerinde bir işin kendinden önce ve sonra gelecek iş kümeleriyle belirtilmesini ifade eder.

Rotalama kısıtları: Sistemdeki bir işin rotasını belirler. Bir iş belirli makinelerde verilen sırada yapılması gereken bir grup işlemten oluşur. Birçok üretimde bu tip kısıtlar yaygındır. Bir iş bir makinede işlem görmeden, diğer makineye geçebilir. Bir işin uğraması gereken makinelerin bilgisi rotalama kısıtları tarafından sağlanır.

Malzeme taşıma kısıtları: Genellikle işleri bir istasyondan diğerine taşıyacak malzeme taşıma sistemlerinin durumuyla ilgilidir. Malzeme taşıma sisteminin otomasyonu iş istasyonlarının otomasyon seviyesine bağlıdır. Eğer iş istasyonları

yüksek bir otomasyon seviyesine sahipse işlem zamanları deterministiktir ve değişkenlik göstermezler. Bu durumda malzeme taşıma sisteminin de otomatik olması gerekir. Malzeme taşıma üretim sistemi için ayrı bir önem arz etmektedir. Malzeme taşıma sistemi bir işlemin başlama zamanı ile öncüllerinin tamamlanma zamanları arasında bağımlılığı zorunlu kılar. Ayrıca malzeme taşıma sisteminin bulunması stok alanlarını kısıtlar, bu da yarı ürün stoklarını azaltır.

Hazırlık zamanları ve maliyetleri: Bir üretimin gerçekleştirilmesi için gerekli tüm hazırlık işlemlerini kapsar. Hazırlık işlemlerine ait durum birçok çalışmada göz ardı edilir veya üretim süresinin bir parçası olarak değerlendirilir. Ancak özellikle son yıllarda hazırlık sürelerine önem veren çizelgeleme çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Ayrık hazırlık zamanları için genellikle iki durum dikkate alınır. Bunlardan biri hazırlık zamanının sadece işlem görece işe bağlı olması durumu, diğeri ise hazırlık zamanının hem işlem görece işe hem sırasına bağlı olarak değişkenlik göstermesi durumudur.

Öncüllükler: Bir iş akışının başka bir iş için kesilebilmesini ifade eder. Örneğin bir makineye yüksek öncelikli bir iş gelebilir ve bu durumda mevcut iş akışı ertelenerek yerine yeni iş işleme alınır. Öncüllüğün değişik şekilleri vardır. Örneğin eğer ertelenen işin o zamana kadar gördüğü işlemler kaybolmuyorsa, buna süren-öncüllük denir. Eğer ertelenen işin o zamana kadar gördüğü işlemler kayboluyorsa, yani işlemlerin tekrarı gerekiyorsa buna tekrarlı-öncüllük denir.

Depolama alanı ve bekleme zamanı kısıtları: Tamamlanmış ve yarı mamullerin depolanabileceği veya bekletilebileceği en büyük alan ve bunlara bağlı zaman kısıtını ifade eder. Bu kısıt makine önünde işlenmek için bekleyen işler için bir üst sınır çizer. Akış tipi sistemlerde alan kısıtı tıkanıklıklara yol açabilir. İki makine arasındaki depolama alanının sınırlandırıldığını varsayalım. Alan dolduğunda ilk makine tamamladığı ürünü alana aktaramaz. Bunun yerine iş makinede kalır, bu da o makinenin başka bir işi işlemesine engel olur.

Stoğa-Üretim ve Sipariş-Üretim: Bir üretim tesisi talebin sabit olduğu ve ürünün modasının geçmesi riskinin olmadığı durumlarda stok tutabilir. Stoğa üretim yapma kararı çizelgeleme işlemini etkiler. Çünkü stoğa yapılan üretimin kesin teslim tarihi olamaz. Siparişe göre üretimde ise belirli bir teslim tarihi vardır ve üretilecek miktar

müşteri talebine bağlıdır. Dolayısıyla bu durum da çizelgeleme faaliyetlerini etkileyecektir.

Takım ve kaynak kısıtları: Üretimde kullanılan ve işlemlerin gerçekleştirilmesi için gerekli hertürlü makine aparatı gibi takımlara veya personel gibi üretim kaynaklarına ait kısıtları ifade eder. Bu kısıtın olduğu durumlarda makine operatör çizelgelemesinin bir arada yapılması gerekir.

Öğrenme etkisi: Yapılan aynı veya benzer işlerin tekrarlanmasıyla üretim sürecinde işlerin tekrar sayısı nispetinde belli bir öğrenmeye bağlı olarak daha kısa sürede yapılmasını ifade etmektedir. Üretim çevresinde öğrenme etkisinin varlığı yaygın bir kabul görmesine rağmen, öğrenme eğrisi formülünün her bir birim için maliyetlerin düşeceğini vermesi, ancak bunun nasıl bir öğrenme ile olacağını net olmaması ve endüstrilerde yaygın olarak kullanılan öğrenme oranı verilerinin aslında personelin öğrenme yeteneğine bağlı olması nedeniyle bazı olumsuz yaklaşımlar da mevcuttur.

Çözüm Yöntemleri: Çizelgeleme problemlerinin çözümünde temelde iki yol izlenmektedir. Bunlar; geleneksel eniyileme yöntemleri ve sezgisel yöntemlerdir. Geleneksel eniyileme ve sezgisel yöntemleri de kendi içlerinde dörde ayırabiliriz (Baker, 1974; Pinedo, 1995; Baker, 1997; Eren ve Güner, 2002; Eren, 2004; Biroğul, 2005):

Geleneksel Eniyileme

Dinamik programlama: Bir birerleme tekniğidir. Bu yöntem çizelgeleme ve diğer kombinatoryal problemler için kullanılan çok aşamalı karar alma yöntemidir. Bu teknik belli kısıtlayıcı kuralları akılcı bir şekilde uygulayarak çok sayıda aday çözümü yok eder. Ancak bu teknik büyük boyutlu problemler için etkin değildir. Çünkü durum değişkenlerinin sayısı artarken problemleri çözmek için gereken işlemler de artar ve bu özellik büyük boyutlu problemlerin çözümünde dinamik programlama yaklaşımının kullanımını kısıtlar.

Dal-Sınır yöntemi: Kombinatoryal problemlerin çözümünde en sık kullanılan yöntemlerden biridir. İlk olarak gezgin satıcı problemlerinde uygulanmıştır. Bu yöntemde, çözüm zamanları farklı veri kümelerine göre önemli derecede değişkenlik

gösterir. Dallanan değişken ile sınırlama yaklaşımının seçimi algoritmanın performansını önemli derecede etkiler. Dal-Sınır tekniği ile çizelgeleme problemlerinin çözümü, problem boyutu büyüdükçe zorlaşmaktadır.

Dal-Sınır ve dinamik programlama tekniklerinin her ikisi de birerleme teknikleridir. Bu teknikler belli kısıtlayıcı kuralları akılcı bir şekilde uygulayarak çok sayıda aday çözümü yok ederler. Ancak bu iki teknik de büyük boyutlu problemlerin çözümünde etkin değildir.

Tamsayılı programlama formülasyonu: Birçok araştırmacı tarafından, çizelgeleme problemlerinin değişik versiyonlarının çözümünde kullanılmaktadır. Bir çizelgeleme problemi tamsayılı programlama modeli olarak formüle edilebileceği için mevcut tamsayılı programlama algoritmalarıyla çözümü mümkündür. Ancak böyle bir yaklaşım sadece küçük ölçekli problemlere uygulanabilir. Çizelgeleme problemlerinin matematiksel programlama formülasyonu genellikle çok sayıda değişken ve kısıta ihtiyaç duyar. Mevcut tamsayılı programlama algoritmaları bu tür problemleri makul bir sürede çözmede başarılı değildir. Buna rağmen bu tür formülasyonların birden fazla ölçütü tek bir amaç fonksiyonu altında birleştirebilmesi bir avantajdır.

Yeni Yaklaşımlar (Sezgiseller)

Tavlama benzetimi: Kombinatoryal eniyileme problemleri için iyi çözümler veren olasılıklı bir arama yöntemidir. "Tavlama Benzetimi" ismi, katıların fiziksel tavlama süreci ile olan benzerlikten ileri gelmektedir. Günümüze kadar, farklı alanlardaki birçok eniyileme problemine uygulanmıştır. Tavlama benzetimi, bir katının en küçük enerji durumu elde edilene kadar yavaş yavaş soğutulduğu fiziksel tavlama sürecini taklit eden olasılıklı bir arama yöntemidir. Bu yöntemle üretilen çözümler sırasında amaç fonksiyonu genel bir azalma eğilimi içerisindedir. Fakat bazı durumlarda amaç fonksiyonu yüksek olan değerlerde seçilerek yerel bir eniyi değer etrafından kurtularak mutlak eniyi değer etrafında çözümler üretilmesi hedeflenir.

Tabu arama: Kombinatoryal eniyileme problemlerini çözmek için geliştirilmiş bir sezgisel tekniktir ve başka metotlarla birlikte kullanılarak, bu metotları yerel eniyi

değer tuzağına düşmekten koruyan uyarlanabilir bir yaklaşımdır. Tabu arama, başlangıç çözümü, hareket mekanizması, aday liste stratejileri, hafıza, tabu yıkma kriterleri, durdurma koşulları olarak adlandırılan temel elemanlara sahiptir. Tabu aramada başlangıç çözümü rassal olarak seçilebileceği gibi, başlangıç çözümünün belirlenmesinde herhangi başka bir algoritma da kullanılabilir. Hareket mekanizması ise, mevcut çözümde yapılan bir değişiklik ile elde edilebilecek yeni çözümleri belirler ve mümkün hareketler, mevcut çözümün tüm komşularını oluştururlar. Hareket mekanizmasının, problem yapısına bağlı olmasının yanı sıra uygun bir şekilde belirlenmesi bu metodun performansı açısından oldukça önemlidir. Büyük boyutlu problemlerde aramanın erken safhalarında amaç fonksiyon değerinde hızlı bir düşüş olabilirken, aramanın sonuna doğru bu düşüş yavaşlar. Komşu arama yöntemlerinin problemlerinden biri, bu yöntemlerin yerel bir eniyi değere yakalanma eğilimleridir. Çözümleri iyileştiren her yol takip edildiğinde, bu yol mutlak eniyeye gitmeyebilir. Eğer eski çözümden daha kötü olan yeni bir çözüm denemesine izin verilirse, yöntem tuzaktan kurtulabilir ve eniyi çözüme giden yolu bulabilir.

Genetik algoritmalar: Tavlama benzetimi ve tabu aramadan daha geneldir. Genetik algoritmada çözüm uzayı dizi veya kromozom olarak ifade edilen aday çözümlerden oluşmaktadır. Her kromozomun bir amaç fonksiyon değeri yani uygunluk değeri bulunmaktadır. Seçilen kromozom kümesi ve bunların uygunluk değeri bir yığın oluşturmaktadır. Genetik algoritmanın her yinelenmesinde üretilen yığın hacmi o yineleme neslini oluşturur. Genetik algoritmalar çizelgeleme problemlerine uygulandığında çizelgeler bir yığının üyeleri veya bireyleri olarak dikkate alınır. Her bireyin uygunluk değeri vardır. Bir bireyin uygunluğu ilgili problemin amaç fonksiyon değeri ile ölçülür. Yöntem yinelemeli olarak çalışır ve her yineleme bir nesle karşılık gelir. Bir neslin genişliği önceki nesilden yaşayan bireyler ile önceki neslin çocuklarından (veya yeni çizelgelerden) oluşur. Algoritmada nesle karşılık gelen yığın genişliği bir yinelemeden diğerine genellikle sabittir. Yavrular önceki neslin bir bölümüne ait bireylerin mutasyonu ve çaprazlaması ile elde edilir. Bireyler kromozomlar olarak ifade edilir. Çok makineli bir sistemde bir kromozom alt kromozomlardan oluşur. Bu kromozomların her biri bir makine üzerindeki iş sırası ile ilgilidir. Bir aile kromozomundaki bir mutasyon ilgili sıradaki eşdeğer iş çiftlerinin yer değiştirmesine eşdeğer olabilir. Her nesilde uygunluğu yüksek olan

bireyler çoğalırken düşük olanlar ölür. Yeni neslin oluşumunu belirleyen doğum, ölüm, üreme prosesleri karmaşık olabilir ve genellikle mevcut nesil bireylerinin uygunluk seviyelerine bağlıdır.

Karınca kolonisi: Farklı kombinatoriyal eniyileme problemlerinin çözümünde kullanılabilen genel amaçlı sezgisel bir algoritmadır. Karınca kolonisi sisteminde, arama aktiviteleri, gerçek karıncaların karakteristiklerini taklit eden basit temel yeteneklere sahip "karınca" olarak adlandırılan ajanlara yaptırılmaktadır. Gerçek karıncaların davranışlarına ilişkin araştırmalar çalışmanın büyük bir kısmını oluşturur. Bu çalışmalarda üzerinde durulan problemlerden biri karıncalar gibi neredeyse kör olan hayvanların kolonileri içinde besin kaynaklarından geriye doğru en kısa yolu nasıl bulduklarıdır. Yolları gösteren fenomen izidir. Hareket eden bir karınca, yolu belirlemek üzere bir miktar (değişen miktarlarda) fenomeni yüzeye bırakır. Tek başına bir karınca genellikle rassal olarak hareket etmesine rağmen, yola daha önceden bırakılan bir miktar fenomen ize rastlarsa bu karınca bunu inceler ve bunu takip edip etmemeye karar verir. Bu yolla da fenomen izi kendi fenomeni ile güçlendirir. Bu kollektif davranış, bir otokatalitik davranış formudur. Karıncalar izi daha çok takip ederlerse, bu iz takip edilmek için daha çekici bir hale gelir. Bu süreç bu yüzden pozitif geri besleme olarak adlandırılır. Bir karıncanın bir yolu seçme olasılığı, o yoldan daha önceden geçen karınca sayısı arttıkça artar.

Ayrıca gün geçtikçe problemlerin özelliklerine göre farklı sezgisel yöntemler literatüre önerilmektedir. Yukarıda bahsedilen temel ve en yaygın kullanımı olan sezgisel yaklaşımlardır.

Ölçüt Sayısı: Çizelgeleme problemlerinde karar verici tek bir amacı eniyilemek isteyebileceği gibi birden fazla amacı da aynı anda eniyilemek isteyebilir. Eğer tek bir ölçüt kullanarak amacı eniyilemek istiyorsa problem tek ölçütlü, eğer birden fazla ölçütü dikkate alarak eniyileme gerçekleştirmek istiyorsa, çok ölçütlü çizelgeleme problemi olarak tanımlanır (French, 1982).

2.2.ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ GÖSTERİM VE MODELLERİ

Çizelgeleme problemleri $\alpha / \beta / \gamma$ şeklinde üç parametrelili bir gösterimle ifade edilir. Bu gösterimdeki α parametresi makine ortamını göstermekte olup, tek bir girdiye

sahiptir. β parametresi ise işleme özellikleri ve kısıtlarıyla ilgili detaylı bilgiler sağlar ve problemin özelliğine bağlı olarak hiçbir girdisi olmayacağı gibi bir veya birden fazla girdiye sahip olabilir. γ parametresi ise genellikle tek girdiye sahip olup problemdeki en küçüklenecek performans ölçütünü ifade eder (Pinedo, 1995; Kellegöz, 2006):

α parametresinin alabileceği bazı ifadeler şu şekildedir:

- Tek makine (1).
- Benzer özellikli paralel makineler (P_m): Benzer özelliğe sahip m adet paralel makine söz konusudur, j işine ait tek bir operasyon bulunur ve bu operasyon m adet makineden herhangi birisinde yapılabilir.
- Farklı hızlara sahip paralel makineler (Q_m): Farklı hızlara sahip m adet paralel makine söz konusu olup i makinesinin hızı V_i notasyonu ile ifade edilir. P_j işlem zamanına sahip j işi i makinesinde $P_{ij} = P_j / V_i$ süresini harcar.
- İlişkisiz paralel makineler (R_m): Her bir iş için farklı hızlara sahip m adet paralel makine söz konusudur. i makinesi j işini V_{ij} hızıyla yapabilmekte olup j işinin i makinesinde harcadığı P_{ij} zamanı $P_{ij} = P_j / V_{ij}$ 'ye eşittir.
- Akış tipi (F_m): Seri sıralanmış m adet makine söz konusudur. Her bir iş aynı rotayı izleyecek şekilde m adet makinenin her birinde işlem görür.
- Esnek akış tipi (FFs): Toplam s adet seri aşama bulunmakta olup her bir aşamada benzer özellikli m adet paralel makine vardır. Her bir iş aynı rotayı izleyecek şekilde “ s ” adet aşamanın her birinde bulunan m adet makinenin sadece birinde işlem görür.
- Açık tip (O_m): Modelde m adet makine söz konusu olup her bir iş her bir makinede işlem görür. Bazı işlerin bazı makinelerdeki işlem süreleri sıfır olabileceği gibi farklı işler farklı rotalara da sahip olabilir.
- Atölye tipi (J_m): Modelde m adet makine söz konusu olup her bir işin her bir makinede işlem görme zorunluluğu yoktur. Yani her bir işin kendine ait bir rotası vardır ve herhangi bir makinede yapılması gereken birden fazla iş olabilir.

β parametresinin alabileceği bazı ifadeler şu şekildedir:

- Geliş zamanı (r_j): j işinin işlenmesine r_j geliş zamanından önce başlanamaz.
- Sıra bağımlı hazırlık zamanları (S_{jk}): Eğer çizelgede j işi k işinden önce geliyorsa S_{jk} , k işine başlanabilmesi için gereken hazırlık zamanını ifade eder. Eğer j ve k işleri

arasındaki hazırlık zamanı makineye de bağımlı ise hazırlık zamanı notasyonuna i indisi eklenerek S_{ijk} şeklinde gösterilir.

- Öğrenme etkisi (LE): İşlere ait işlem sürelerinin bir öğrenme etkisine bağlı olarak değişimini ifade eder.
- Bölünebilme (prmp): İşin tamamlanana kadar makinede kalması zorunlu değildir. Herhangi bir zamanda herhangi bir işin işlenmesi durdurularak makineye farklı bir iş yerleştirilebilir. İşlemi yarıda kesilen iş ilgili makineye tekrar konduğunda sadece kalan süre kadar işlem görür.
- Öncelik kısıtları (prec): Bazı işlerin işlenmesine başlanmadan önce diğer bazı işlerin tamamlanması gerektiğiyle ilgili kısıtlamaları ifade eder.
- Arızalanma (brkdwn): Makinelerin tamamı veya bir kısmı arızalanmalar nedeniyle sürekli olarak işlem yapmaya uygun değildir.
- Permutasyon (prmu): Akış tipi makine ortamında karşılaşılan bu parametre, makineler arasındaki kuyruk disiplininin FIFO (ilk gelen ilk işlem görür) olduğunu ifade eder.
- Bloklanma (block): Akış tipi makine ortamında karşılaşılan bu parametre, bir birini takip eden iki makine arasındaki kuyruğun sınırlı bir kapasiteye sahip olduğunu, kuyruk dolu olduğu zaman önceki makinenin işlemini bitirdiği işi sonraki makineye gönderemeyeceğini ifade eder.
- Beklemesiz (nwt): Akış tipi makine ortamında karşılaşılan bu parametre, işlerin birbirini takip eden iki makine arasında beklemeyeceğini ifade eder. Bu kısıtlamanın olduğu modelde de kuyruk disiplini FIFO 'dur.
- Yeniden dolaşım (recrc): Atölye tipi makine ortamında karşılaşılan bu parametre, herhangi bir işin herhangi bir makineyi birden fazla kez ziyaret edebileceğini ifade eder.

Çizelgeleme probleminde en küçüklenecek performans ölçütü her zaman işlerin tamamlanma zamanlarına bağlı bir fonksiyonu ifade eder. j işinin i makinesindeki tamamlanma zamanı C_{ij} ve sistemde geçirdiği zaman C_j notasyonu ile gösterilmekte olup, performans ölçütü aynı zamanda teslim zamanı d_j 'nin de bir fonksiyonu olabilir. j işinin gecikmesi $L_j = C_j - d_j$, j işinin geç bitmesi $T_j = \max\{L_j, 0\}$ ve j

işinin gecikme durumu $U_j = \begin{cases} 1 & C_j > d_j \\ 0 & \text{diğer} \end{cases}$ fonksiyonlarıyla hesaplanır.

Performans ölçütünü ifade eden γ parametresinin bu fonksiyonlara bağlı alabileceği bazı ifadeler şu şekildedir:

- En büyük tamamlanma zamanı (C_{\max}): Formülasyonu $C_{\max}=\max(C_1,\dots,C_n)$ olup son işin sistemi terk etme zamanını ifade eder. En küçüklenmesi genellikle yüksek makine verimliliğini sağlar.
- En büyük gecikme (L_{\max}): Formülasyonu $L_{\max}=\max(L_1,\dots,L_n)$ olup teslim zamanından sapmaların en büyüğünü ifade eder.
- Toplam akış zamanı (ΣF_j).
- Toplam ağırlıklı akış zamanı ($\Sigma W_j C_j$): Stok taşıma maliyeti gibi çizelgenin neden olduğu maliyetlerin bir göstergesidir.
- Toplam geç bitirme zamanı (ΣT_j).
- Toplam ağırlıklı geç bitirme zamanı ($\Sigma W_j T_j$).
- Toplam geciken iş sayısı (ΣU_j).
- Toplam ağırlıklı geciken iş sayısı ($\Sigma W_j U_j$).
- Toplam ağırlıklı erken/geç tamamlanma [$\Sigma(\alpha E_j + \beta T_j)$].

Pekçok üretim tesisinde, üretim birimi (işçi veya makine) tarafından aynı veya benzer faaliyetlerin sürekli tekrarlanması sonucu üretim işleminde öğrenmeye bağlı gelişme kaydedilir. Böylece bir iş/ürün sıralamada ne kadar geç çizelgelenirse üretim zamanı o kadar kısalmır. Bu olgu literatürde öğrenme etkisi olarak bilinmekte olup, çizelgelemede bir işleme özelliğini (β parametresi) ifade eder (Yelle, 1979; Biskup, 1999; 2008).

TZÜ'nün temel felsefesi, sıfır stok hedefi doğrultusunda, işlerin tam zamanında bitmesidir (ne erken, ne geç, tam istenen sürede). Bu felsefenin çizelgelemedeki karşılığı erken ve geç bitirmenin toplam ağırlıklı olarak cezalarının enküçüklenmesi problemidir. Bu olgu çizelgeleme problemlerindeki performans ölçütünü ifade eder (Feldman ve Biskup, 2003; Lauff ve Werner, 2004; Celso vd., 2005).

Bu çalışmanın devamında, $F2/LE, d = d_j / \Sigma(\alpha E_j + \beta T_j)$ [F2: İki Makineli Akış Tipi; LE: Öğrenme Etkili; $d=d_j$ ve $\Sigma(\alpha E_j + \beta T_j)$: Ortak Teslim Tarihinden Sapmaların (Erken/Geç Bitirmelerin) Toplam Ağırlıklı Enküçüklenmesi Performans Ölçütü; Çizelgeleme] gösterimli deterministik yapıdaki çizelgeleme problemi ele alınarak,

problemin çözümüne yönelik tamsayı programlama formülasyonu ve sezgisel yaklaşımlar ortaya konulmaktadır.

2.3.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.3.1.Öğrenme Etkisinin Çizelgelemede Uygulanması ve Literatür Taraması

Üretim çevresinde öğrenme etkisinin varlığı yaygın bir kabul gördü. Örneğin; Conway ve Schultz (1959), Cochran (1960), Day ve Montgomery (1983), Ghemawat (1985) ve Venezia (1995). Fakat öğrenme etkisinin genel kabulüne rağmen doğasında olan bazı eksiklikleri görmek için; Lapre vd. (2000) ve/veya Biskup ve Simons (2004)'un araştırmalarına bakılabilir (Biskup, 2008):

- Öğrenme eğrisi formülü her bir birim için maliyetlerin düşeceğini vermekte ancak bunun nasıl bir öğrenme ile olacağı net değildir,
- Endüstrilerde ve fabrikalarda yaygın olarak kullanılan öğrenme oranı verileri aslında personelin öğrenme yeteneğine bağlıdır.

Çizelgeleme problemleri farklı işler veya siparişlerin tek veya çok makinede belli işlemlere tabi tutulmak zorunda olmasıyla ortaya çıkar. Üretim ortamının doğal bir özelliği, insan aktivitelerinin yüksekliğidir. Örneğin (Biskup, 2008):

- ❖ Makine ayarları (Çizelgelemede çoğu zaman işlem sürelerine dâhil edilir),
- ❖ İş süreci sonunda veya belirli süre sonunda makine temizliği,
- ❖ Makineyi çalıştırmak ve kontrol etmek,
- ❖ Makinenin planlı bakımı,
- ❖ Makine hatalarının kaldırılması,
- ❖ Makine verilerini okuma, anlama ve yorumlama,
- ❖ El işlerinin tamamı-Düzenli süreç zamanı veya hataların düzeltilmesi.

Eğer üretim ortamı değişirse, öğrenme etkisi önem kazanır (Biskup, 2008):

- Yeni (deneyimsiz) işgücü,
- Yeni makine yatırımları veya ekipmanların yenisiyle değiştirilmesi,
- İç eniyileme veya dış gereksinimlerin sonucunda iş akış değişimi,
- Önce üretimi asla yapılmamış işlerin kabulü.

Ayrıca yazılım güncellenmesi, önemli dokümanların yeniden tasarlanması, depodaki boş alanların yeniden organizasyonu gibi üretim ortamındaki ufak değişiklikler

öğrenme etkisine sebep olacaktır. Yani çalışanlar zamanla yeni duruma alışacak ve deneyim kazanacaklardır (Biskup, 2008).

Geleneksel çizelgelemede genel varsayım, verilen bir ürünün üretim zamanı üretim sırasındaki pozisyonundan bağımsızdır. Fakat bazı gerçek düzenlemelerde, üretim tesisi zamanla sürekli olarak gelişir. Sonuç olarak, verilen bir ürünün üretim zamanı, çizelgedeki sırasına bağlı olarak kısalır. Bu olguya literatürde “öğrenme etkisi” denilmekte olup, bu etki çizelgeleme literatüründe son yıllarda daha çok dikkate alınmaya başlamıştır (Biskup, 2008; Toksarı, 2008).

Akla öğrenme etkisinin gerçeğe en uygun şekilde nasıl modellenebileceği sorusu gelir. Bunun cevabı muhakkak ki üretim ortamına bağlıdır. İşlemlerin ayrı ayrı veya bir bütün halinde değerlendirilmesine yönelik olarak çizelgeleme çevresinde öğrenme etkisine dair iki farklı temel yaklaşım önerilmiştir. Bunlardan ilki ve gerçeğe daha yakın olanı, işlemleri ayrı ayrı değerlendiren “Konum Esaslı” öğrenme etkisi olarak tanımlanabilir. Diğeri ise, süreçteki işleri bir bütün olarak ele alan “İşlem Sürelerinin Toplamı Esaslı” öğrenme etkisidir. Her iki yaklaşımın da literatürde geçerliliği vardır (Biskup, 2008).

2.3.1.1.Konum Esaslı Öğrenme Etkisi

Biskup 1999’da öğrenme eğrisi formülünü çizelgelemeye modifiye etmiş ve konum esaslı öğrenme etkisi genel formülü haline getirmiştir (Biskup, 2008):

$$P_{ir} = P_i r^a \quad (a = \log_2 LR \text{ olmak üzere}) \quad (2.1)$$

P_{ir} i işinin işlem zamanı eğer i işi r. pozisyonda çizelgelendiyse formüldeki gibi işin yapılması için gerekli süre azalacaktır. Eğer tüm işlem süreleri aynı ise öğrenme eğrisi ile bu formül aynı olur. Aksi takdirde formüller farklı olacaktır. Eğer süreç tamamen otomotize olursa bu durumda öğrenme etkisi sadece makinenin hazırlık zamanında etkili olur. Normal işlem zamanı P_i hazırlık zamanını ve üretim zamanını içerir. Bu durumda: $P_{ir} = S_{ir} + V_i$ ve $S_{ir} = S_i r^a$ olarak ifade edilir (Biskup, 1999; 2008).

Öğrenme etkisi çizelgelemede ilk kez Biskup (1999) tarafından incelenmiştir. Biskup, bir kalem üretiminin tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak üretim

zamanındaki azalmayı öğrenme süreci olarak kabul etmiştir. Biskup, tek makineli problemler üzerinde çalışmış, akış zamanlarının ve teslim tarihinden sapmaların en küçüklenmesini amaç fonksiyonları olarak ele almış ve SPT kuralını kullanarak polinom zamanlı çözümler sunmuştur (Eren ve Güner, 2004; Biskup, 2008).

Cheng ve Wang, öğrenme etkili tek makineli çizelgelemede en büyük gecikme (L_{max}) performans kriterinin en küçüklenmesi problemini incelemişlerdir. Araştırmacılar öğrenme etkisini modellemek için üretim hacmine bağlı parçalı doğrusal işlem zamanı fonksiyonu kullanmışlardır. Bu problemin NP-zor problem olduğunu göstererek problemin polinom zamanda çözülebilir iki durumunu göstermişlerdir. Ayrıca problem için iki sezgisel yaklaşım önererek en kötü durum performansını da analiz etmişlerdir (Cheng ve Wang, 2000).

Mosheiov tek makine çizelgeleme için öğrenme kabulü altında, EDD kuralını kullanarak en büyük gecikmenin en küçüklenmesi, WSPT kuralını kullanarak toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanının en küçüklenmesi ve Moore (1968) Algoritmasını kullanarak geciken iş sayısının en küçüklenmesi gibi çok bilinen bazı çözümler göstermiştir. Mosheiov, bu çalışmasında klasik amaç fonksiyonlu problemlerden bazıları için polinom zamanlı çözümler elde ederken, öğrenme etkili bazı problemler için iyi çözümleri garanti etmediğini göstermiştir (Mosheiov, 2001a; Eren ve Güner, 2004; Biskup, 2008).

Mosheiov'un yaptığı diğer bir çalışma ise paralel özdeş makinelerde akış zamanının en küçüklenmesi problemidir. Öğrenme etkili bu problemin çözümünü polinom zamanda gerçekleştirmiş olsa da gereken hesaplama zamanının problemin klasik yapısını (öğrenme etkisiz) çözmek için gerekli zamandan çok daha fazla olduğunu göstermiştir. Paralel iki makineli durum için çözümünün $O(n^4)$ zamanda sağlanacağı (n iş sayısını göstermek üzere) ve makine sayısı arttıkça hesaplama zamanının daha da artacağı belirtilmiştir (Mosheiov, 2001b; Biskup, 2008).

Mosheiov ve Sidney, öğrenme etkili tek makinede en büyük tamamlanma zamanı (C_{max}) ve toplam akış zamanının (ΣF) en küçüklenmesi problemi üzerinde çalışmışlardır. Ayrıca bu çalışmada paralel makineli durum için toplam akış zamanının (ΣF) en küçüklenmesi de incelenmiştir (Mosheiov ve Sidney, 2003).

Lee vd. iki kriterli tek makine çizelgeleme probleminde öğrenme etkisi altında toplam tamamlanma zamanı ve en büyük geç bitirmeyi enküçüklemek için Dal-Sınır algoritması geliştirmişlerdir. Bu algoritma baskınlık kuralı esaslı olup, 30 işe kadar çözümler alınarak değerlendirilmiştir (Lee vd., 2004).

Lee ve Wu 2 makineli akış tipi çizelgeleme probleminde makinelerin ayrı ayrı öğrenme etkisi altında olduğu varsayımında toplam tamamlanma zamanının enküçüklenmesini ele almışlar ve NP-zor zorluk derecesindeki problemi baskınlık özelliklerini geliştirerek bir Dal-Sınır algoritmasıyla çözmüşlerdir. Bu algoritma makul sürede 30 işe kadar çözüm üretebilmektedir (Lee ve Wu, 2004).

Bachman ve Janiak çalışmalarında $1/P_{ir} = P_i r^a$, $P_i = P / \sum w_i C_i$ problemine polinom zamanlı çözümler üretmişlerdir. Ayrıca $1/r_i$, $P_{ir} = P_i r^a / C_{max}$ probleminin NP-zor olduğunu göstermişlerdir (Bachman ve Janiak, 2004).

Zhao vd. çoğu polinom çözümlü öğrenme etkili özel durumları çalışmışlardır: Eğer işler uygun ağırlıkta ise WSPT sıralamasıyla tek makinede toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanı enküçüklenmesini yapmışlardır. Eğer işler uygun teslim tarihine sahipse EDD kuralı ile öğrenme etkili tek makinede en büyük geç bitirmenin enküçüklenmesini yapmışlardır. Ayrıca farklı hızlara sahip m adet paralel makine için öğrenme etkili çizelgeleme probleminde $P_i=1$ şartıyla $\sum W_i C_i$ ve L_{max} enküçüklenmesini WSPT ve EDD sıralamalarını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bunlara ek olarak 2 makineli akış tipi öğrenme etkili çizelgelemede $P_{2j}=P_2$ şartıyla $\sum C_i$ ve C_{max} enküçüklenmesi problemini, SPT sıralamasını kullanarak polinom zamanlı çözmüşlerdir (Zhao vd., 2004).

Chen vd. iki kriterli iki makineli akış tipi çizelgeleme probleminde toplam tamamlanma zamanı ve en büyük gecikme performans ölçütlerinin enküçüklenmesi üzerine çalışmışlar ve NP-zor olan bu problemi çözmek için baskınlık özelliklerini geliştirerek bir Dal-Sınır algoritması ile çözmüşlerdir. Bu algoritma 18 işe kadar eniyi çözüm üretebilme kapasitesindedir (Chen vd., 2006).

Cheng vd. öğrenme etkili permütasyon akış tipi çizelgeleme problemini baskın makineler arasında aylak zaman olmadığı varsayımı altında 4 durum için en büyük

tamamlanma zamanı performans ölçütü yönünden ele almış ve her bir durum için polinom zamanlı çözüm algoritmaları geliştirmişlerdir (Cheng vd., 2007).

Wu vd. 2 makineli akış tipi çizelgeleme probleminde en büyük gecikmenin enküçüklenmesi için, bir Dal-Sınır algoritması ve tavlama benzetimi yoluyla eniyi veya yaklaşık eniyi sonuçlar elde etmişler ve bu sonuçları Fisher (1976)'in sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır (Wu vd., 2007).

Eren ve Güner öğrenme etkili tek makine toplam geç bitirme problemini çalışmışlardır. Bu problemin öğrenme etkisi olmayan durumunun NP-zor olduğunu Du ve Leung (1990) çalışmalarında göstermişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmalarında küçük boyutlu problemlerin çözümü için tam sayılı programlama modeli geliştirmişler ve büyük boyutlu problemler için ise sezgisel yöntemlerden Tabu Arama ile çözüm yaklaşımı önermişlerdir (Eren ve Güner, 2007).

Lee vd. konum esaslı öğrenme etkili tek makinede toplam akış zamanı ve toplam tamamlanma zamanı performans kriterlerinin birlikte enküçüklenmesi problemini ele almışlardır. Bu çalışmada baskınlık kuralı esaslı makul sürede 21 işe kadar çözüm üretebilen bir Dal-Sınır algoritması ve eniyi sonuçlardan bir alt sınır (lower bound) geliştirmişlerdir. Ayrıca eniyi çözüme yakın sonuçlar veren genetik algoritma önermişlerdir. Deneysel hesaplama sonuçlarından genetik algoritmanın çift noktalı çaprazlama ile daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir (Lee vd., 2009).

Mani vd. öğrenme etkili tek makinede toplam tamamlanma zamanı ve toplam tamamlanma zamanları mutlak farkı performans kriterlerinin birlikte enküçüklenmesi problemini ele almışlardır. İki kriterli taşıma problemi çözme metodolojisini yani, Aneja ve Nair (1979) Metodunu kullanarak eniyi sıralamaları elde etmişlerdir (Mani vd., 2009).

2.3.1.1.1. İş Bağımlı Konum Esaslı Öğrenme Etkisi

İlk defa iş bağımlı öğrenme etkisi Mosheiov ve Sidney (2003)'in çalışmalarında incelemiştir:

$$P_{ir} = P_i r^{a_i} \quad a_i \leq 0 \quad i=1 \dots n \quad (2.2)$$

Mosheiov ve Sidney işin işçinin öğrenme sürecine önemli etkileri olabileceğini düşünmüşler ve $1/P_{ir} = P_i r^{a_i} / C_{max}$, $1/P_{ir} = P_i r^{a_i}$, $d_i = d / \sum (w_1 E_i + w_2 T_i + w_3 d)$ ve $1/P_{ir} = P_i r^{a_i} / \sum C_i$ problemlerinin $O(n^3)$ zamanda çözümünün sağlanacağını göstermişlerdir. Ayrıca $Q_m/P_{ir} = P_i r^{a_i} / \sum C_i$ problemini atama problemi olarak ele almışlar ve işlerin var olan makinelere atanmasını sağlamışlardır (Mosheiov ve Sidney, 2003; Biskup, 2008).

Mosheiov ve Sidney diğer bir araştırmalarında tek makinede geciken iş sayısının enküçüklenmesi problemini ($1/P_{ir} = P_i r^{a_i}$, $d_i = d / \sum U_i$) ele almışlar ve klasik atama problemlerinin farklı versiyonlarını kullanarak $O(n^3 \log n)$ zamanda çözümünün sağlanacağını göstermişlerdir (Mosheiov ve Sidney, 2005). Lin ise $1/P_{ir} = P_i r^a / \sum U_i$ ve $1/P_{ir} = P_i r^{a_i} / \sum U_i$ problemlerinin NP-zor problemler olduğunu doğrulamıştır (Lin, 2007).

Mosheiov ve Sidney, yukarıda belirtilen araştırmalarında üstel öğrenme fonksiyonlarını kullanmamışlar ve öğrenme fonksiyonunu genel iş bağımlı öğrenme fonksiyonu olarak ele almışlardır (Biskup,2008).

2.3.1.1.2.Otonom Konum Esaslı ve Teşvik Edilmiş Öğrenme

Biskup ve Simons işçilerin teknik bilgi kapasitesi ve ayrıca öğrenmeyi becerebilme olasılığı üzerinde durmuşlardır. İşçilerin eğitimi, el kitabı dağıtılması, uyarı levhalarının asılması vb. faaliyetler çok genel olarak teknik bilgiye yatırımı sağlar. Eniyi öğrenme oranının belirlenmesi, teşvik edilmiş öğrenmenin zaman ve para açısından kritik problemidir. Biskup ve Simons (2004) “Otonom Konum Esaslı ve Teşvik Edilmiş Öğrenme Etkisini” şu şekilde formüle etmişlerdir (Biskup, 2008):

$$P_{ir} = P_i r^{\log_2(1-x)LR} \quad (2.3)$$

Bu yatırım bir konveks azalmayan maliyet fonksiyonu $k(x)$ ile gösterildiği zaman öğrenme oranı (standart veya otonom) x 'e bağlı olarak azaltılabilir, ($0 \leq x \leq x_{max} < 1$) (Biskup ve Simons, 2004; Biskup, 2008).

Biskup ve Simons araştırmalarında ortak teslim tarihli çizelgeleme probleminde erken ve geç bitirme cezalarının ve teşvik edilmiş öğrenmenin maliyetinin toplamını

enküçüklemeyi amaçlamışlardır. Daha sonra araştırmacılar amaç fonksiyonu için çeşitli konveks sonuçlar üretmişler ve bu problemi $O(n^3)$ zamanda bir algoritma ile çözmüşlerdir. Fakat çizelgeleme problemlerinde teşvik edilmiş öğrenme etkisi tabii ki zordur, bu nedenle çoğu çizelgeleme problemlerinde zaman esaslı (maliyet esaslı değil) amaç fonksiyonu kullanılır (Biskup ve Simons, 2004).

2.3.1.1.3. Konum Esaslı Öğrenme ve Kötüleşen İşler

Wang (2006) çizelgeleme problemlerinde işlerin, başlangıç zamanı t ile negatif ve öğrenme etkisiyle pozitif etkilendiğini dikkate almıştır. Wang (2006), “wt” her bir ünitenin başlama zamanındaki gecikmeyle, işlem zamanındaki artışın miktarını göstermek üzere; öğrenme etkisini şu şekilde ifade etmiştir (Biskup, 2008):

$$P_{ir} = (P_i + wt)r^a \quad (2.4)$$

Wang (2006) $1/P_{ir} = (P_i + wt)r^a / C_{\max}$, $1/P_{ir} = (P_i + wt)r^a$, $P_i = cw_i / \sum w_i C_i$ ve $1/P_{ir} = (P_i + wt)r^a / \sum C_i$ problemlerini SPT sıralamasıyla çözmüştür. Uygun ağırlıklarda $1/P_{ir} = (P_i + wt)r^a / \sum w_i C_i$ ve $1/P_{ir} = (P_i + wt)r^a$, $P_i = P / \sum w_i C_i$ problemlerini ise eniyi olarak WSPT sıralamasıyla çözmüştür. Uygun teslim tarihli $1/P_{ir} = (P_i + wt)r^a / L_{\max}$ ve $1/P_{ir} = (P_i + wt)r^a$, $P_i = P / L_{\max}$ problemlerinin de EDD sıralamasıyla eniyi çözümünü elde etmiştir (Wang, 2006; Biskup, 2008).

Wang ve Cheng işlere ait özel ağırlıkların ve normal bir işlem süresinin olduğu biraz farklı bir model üstünde çalışmışlardır: $P_{ir} = (P + w_i t)r^a$. Araştırmacılar makalelerinde tüm işler için $P=1$ alarak, $1/P_{ir} = (1 + w_i t)r^a / C_{\max}$ problemine konsantre olmuşlar ve işlerin w_i 'nin artmayan düzenine göre sıralanmasıyla, en çok gelişme oranlı çizelgeyi göstermişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, w_i 'nin bazı çok özel durumlarıyla polinom zamanlı çözümlerini çıkarmışlardır (Wang ve Cheng, 2007).

Wang 2007'de kötüleşen işlere yönelik kötüleşme ve öğrenme etkisinin farklı ağırlıklandırıldığı biraz daha değişik bir düşünce üretmiştir: $P_{ir} = P_i(w_1(t) + w_2 r^a)$. Tek makine için $1/P_{ir} = P_i(w_1(t) + w_2 r^a) / C_{\max}$, $1/P_{ir} = P_i(w_1(t) + w_2 r^a) / \sum C_i$ ve $1/P_{ir} = P_i(w_1(t) + w_2 r^a) / \sum C_i^2$ problemlerini SPT sıralamasıyla, uygun

ağırlıklarda $1/P_{ir} = P_i(w_1(t) + w_2r^a) / \sum w_i C_i$ ve $1/P_{ir} = P_i(w_1(t) + w_2r^a), P_i = P / \sum w_i C_i$ problemlerini ise WSPT sıralamasıyla ve ayrıca $1/P_{ir} = P_i(w_1(t) + w_2r^a) / T_{max}$ ve $1/P_{ir} = P_i(w_1(t) + w_2r^a), P_i = P / T_{max}$ problemlerini ise EDD sıralamasıyla çözmüştür (Wang, 2007).

2.3.1.1.4. Konum Esaslı Lineer Öğrenme Fonksiyonu

İlk olarak Cheng ve Wang (2000) tarafından yapısal olarak farklı bir öğrenme fonksiyonu önerildi:

$$P_{ir} = P_i - V_i * \min \{r - 1, n_{0i}\} \quad (2.5)$$

P_i işlem zamanı, V_i öğrenme katsayısı ve $n_{0i} \leq n-1$ başlangıç seviyesi göstergesi olup, pozitif işlem zamanı için $V_i < (P_i/n_{0i})$ şartının sağlanması gerekmektedir. Cheng ve Wang (2000) tek makinede lineer öğrenme fonksiyonlu en büyük gecikme probleminin NP-zor olduğunu göstermişlerdir. Eğer işler aynı öğrenme katsayısı ve aynı başlangıç seviyesine sahipse problem EDD sıralamasıyla, eğer işler genel bir teslim tarihine sahipse; atama problemi formülasyonu ile çözülebileceğini göstermişlerdir (Biskup, 2008).

Bachman ve Janiak lineer öğrenme fonksiyonunu daha da basitleştirerek, $P_{ir} = P_i - V_i * r$ haline getirmişlerdir; yine burada da pozitif işlem zamanı için $V_i < (P_i/n_{0i})$ şartının sağlanması gerekmektedir. Araştırmacılar $1/P_{ir} = P_i - V_i * r / C_{max}$ probleminin öğrenme katsayısı V_i 'nin azalmayan sıralamasıyla işler atanarak, hazırlık zamanlı benzer NP-zor bir problem olan $1/r_i, P_{ir} = P_i - V_i * r / C_{max}$ probleminin işlerin hazırlık zamanlarının azalmayan sıralamasına göre işler atanarak çözülebileceğini göstermişlerdir (Bachman ve Janiak, 2004).

Wang ve Xia çok makineli çizelgeleme için biraz farklı ancak yapısal olarak benzer bir öğrenme etkisini tanımlamışlardır: $P_{ijr} = P_{ij} (W - V * r)$. Yine aynı şekilde pozitif işlem süreleri için $V < (W/n)$ şartının sağlanması gerekmektedir. Wang ve Xia ilk olarak tek makine durumuna konsantre olmuşlardır. SPT sıralaması ile $1/P_{ir} = P_i (W - V * r) / \sum C_i$ ve $1/P_{ir} = P_i (W - V * r) / C_{max}$ problemlerinin eniyi

çözümlerini elde etmişlerdir. Johnson kuralının 2 makineli akış tipi çizelgelemede $F2/P_{ijr} = P_{ij}(W - V * r)/C_{max}$ problemi için eniyi çözümü garanti etmediğini göstermişlerdir. Baskın makinelerin artan serisi özel durumunda, $Fm/P_{ijr} = P_{ij}(W - V * r), idm / \sum C_i$ ve $Fm/P_{ijr} = P_{ij}(W - V * r), idm / C_{max}$ problemlerinin m makineye n işi permutasyon akış tipi düzenleyen çözümünü SPT sıralamasıyla eniyi olarak bulmuşlardır (Wang ve Xia, 2005).

Konum esaslı lineer öğrenme fonksiyonları genelde öğrenme katsayısı üzerinde bazı matematiksel limitlere sahiptir. Bu limitlerde genellikle iş sayısı (n) göz önünde bulundurulur. Öğrenme perspektifinden, “Niçin iş sayısı öğrenme katsayısını etkileyebilir?” ve “Niçin öğrenme katsayısı iş sayısına uyarlanır?” soruları tartışılabilir (Biskup, 2008).

2.3.1.2. İşlem Zamanlarının Toplamı Esaslı Öğrenme Etkisi

Konum esaslı öğrenme etkisi daha önce üretilmiş işlerin işlem zamanlarını ihmal etmektedir. Eğer insan etkileşimleri işlemler sırasında anlamlı bir etkiye sahipse, işlem zamanı işçinin deneyimine eklenecektir ve öğrenme etkisine sebep olacaktır. Bu durumda Zamana Bağlı Öğrenme Etkisini dikkate almak daha uygun olacaktır. Kuo ve Yang öğrenme için şu formülü önermişlerdir (Biskup, 2008):

$$P_{ir} = P_i(1 + P_{[1]} + P_{[2]} + \dots + P_{[r-1]})^a = P_i \left(1 + \sum_{k=1}^{r-1} P_{[k]}\right)^a \text{ ve } a \leq 0 \quad (2.6)$$

Formüldeki 1 ilk yapılan işin işlem zamanına eşit olmasını sağlamaktadır. Kuo ve Yang tek makinede toplam tamamlanma zamanını enküçükleme amaçlanırsa SPT sıralamasını kullanmanın eniyi çizelgeyi vereceğini göstermişlerdir. Bunun ispatı daha karmaşık olsa da, iş çiftlerinin değiştirilerek şekillendirilmesi tekniğine dayandırmışlardır (Kuo ve Yang, 2006a).

Kuo ve Yang tek makine grup çizelgeleme problemleri üstüne de çalışmışlardır. Grup çizelgeleme problemlerinde, aynı grubun ardışık iki işi arasında hazırlık zamanına ihtiyaç duyulmaz, ancak grup g'nin ilk işine başlamadan önce hazırlık zamanına (s_g) ihtiyaç duyulur. Ayrıca, her bir grup kendi öğrenme indeksine (a_g) sahiptir. Benzer olarak öğrenme etkisi: $P_{igr} = P_{ig}(1 + P_{[1]g} + P_{[2]g} + \dots + P_{[r-1]g})^{a_g}$

şeklindedir. P_{igr} r. pozisyonda çizelgelenmiş g grubunun i işinin işlem zamanı göstermektedir. Anılan sıraya göre, P_{ig} i işinin normal işlem zamanı iken $P_{[i]g}$ g grubunun i işinin normal işlem zamanıdır. Kuo ve Yang'ın araştırmalarında, G grup çizelgeleme problemi olduğunu ve S ise bağımsız sıralı grup hazırlık süresinin olduğunu gösterir. Araştırmacılar $1/G, S, P_{igr} = P_{ig} \left(1 + \sum_{i=1}^{r-1} P_{[i]g}\right)^{ag} / C_{max}$ probleminde işler grup içinde SPT kuralına göre sıralanırsa eniyi çizelgenin elde edileceğini ve grupların keyfi tertiplenebileceğini göstermişlerdir. Hazırlık zamanı sıralamadan bağımsız olduğu ve her bir grup için öğrenme tekrarlandığından, grup sıralamasının eniyi çözüm üzerinde etkisi yoktur. Ayrıca $1/P_{ir} = P_i \left(1 + \sum_{k=1}^{r-1} P_{[k]}\right)^a / C_{max}$ problemi de SPT kuralı ile eniyilenebilir. Kuo ve Yang ayrıca $1/G, S, P_{igr} = P_{ig} \left(1 + \sum_{i=1}^{r-1} P_{[i]g}\right)^{ag} / \sum C_i$ problemi üzerinde çalışmışlar ve eniyi çizelgenin iki gereksinime bağlı olduğunu tespit etmişlerdir: Birincisi; Her bir grup içinde işlerin SPT sıralamasına göre düzenlenmesi, İkincisi ise; grupların $\left(s_g + \sum_{i=1}^{n_g} P_{ig}^A\right) / n_g$ 'nin azalmayan sırasında düzenlenmesi. "A" işareti işlem zamanının normal işlem zamanı değil gerçek işlem zamanı olduğunu gösterir (eğer g grubunun i işi r. pozisyonda çizelgelendi ise: $P_{ig}^A = P_{igr}$ olur) (Kuo ve Yang, 2006b).

Kuo ve Yang başka bir çalışmada basit işlem zamanlarının toplamı esaslı öğrenme etkisi formülünde 1'i atarak ufak bir değişiklik yaptılar: $r \leq 2$ için $P_{i1} = P_i$ ve $P_{ir} = P_i (P_{[1]} + P_{[2]} + \dots + P_{[r-1]})^a = P_i \left(\sum_{k=1}^{r-1} P_{[k]}\right)^a$. $1/P_{i1} = P_i$ and $P_{ir} = P_i \left(\sum_{k=1}^{r-1} P_{[k]}\right)^a$ for $r \leq 2/C_{max}$ problemi için eniyi sıralamayı işleri SPT kuralına göre düzenleyerek gösterdiler (Kuo ve Yang, 2006c).

Koulamas ve Kyparisis, "İşlem Zamanlarının Toplamı Esaslı Öğrenme Etkisinden"

farklı bir yaklaşım önerdiler: $b \geq 1$ şartıyla $P_{ir} = P_i \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{r-1} P_{[i]}}{\sum_{i=1}^n P_{[i]}}\right)^b = P_i \left(\frac{\sum_{i=r}^n P_{[i]}}{\sum_{i=1}^n P_{[i]}}\right)^b$.

Koulamas ve Kyparisis tek makine için $1/P_{ir} = P_i \left(\sum_{i=r}^n P_{[i]} / \sum_{i=1}^n P_{[i]}\right)^b / \sum C_i$ ve

$1/P_{ir} = P_i (\sum_{i=r}^n P_{[i]} / \sum_{i=1}^n P_{[i]})^b / C_{max}$ problemleri ve iki makineli akış tipi için

$F2/P_{ijr} = P_{ij} (\sum_{i=r}^n P_{[ij]} / \sum_{i=1}^n P_{[ij]})^b, prp / \sum C_i$ ve $F2/P_{ijr} = P_{ij} (\sum_{i=r}^n P_{[ij]} / \sum_{i=1}^n P_{[ij]})^b, prp / C_{max}$

problemlerinde SPT sıralamasının eniyi çizelgeye götüreceğini göstermişlerdir. Öğrenme perspektifinden bu öğrenme etkisi problemsiz görünür: $n=10$ iş, $P_i=1$ ve $b=1$ varsayımıyla öğrenme etkisiyle 2. işin işlem zamanı 0.9 olacaktır. Fakat anılan sıraya göre, üç durum için öğrenme deneyimi temel olarak aynı olsa da, $n=5$ veya $n=20$ iş olsaydı ikinci işin işlem zamanı 0.8 veya 0.95 olabilirdi. Bu durumda öğrenme etkisinin gelecek işlerin işlem zamanlarına ve bitmiş işlerin deneyimine güçlüce bağlı olması durumunu ortaya çıkaracağını ve ayrıca $n=10$ iş, $P_i=1$ ve $b=1$ varsayımli örnek için $P_{[10]} \leq 0.1$ olacağını, bunun ise çok yüksek bir öğrenmeyi göstereceğinden, $b \geq 0$ olarak kullanmanın daha uygun olabileceğini savunmuşlardır (Koulamas ve Kyparisis, 2007).

2.3.2.Çizelgelemede Erken/Geç Tamamlanma Problemleri ve Literatür Araştırması

Çizelgeleme teorisi ile ilgili literatürün önemli bölümü toplam akış zamanı, geciken iş sayısı, toplam gecikme gibi düzenleyici ölçüt ağırlıklıdır. TZÜ konusuna olan artan ilgi ile birlikte ürünlerin önceden belirlenen teslim tarihinde tamamlanarak erken bitmesinin ya da gecikmesinin ortadan kaldırılması veya en aza indirgenmesi hedeflenmektedir. İmalat açısından TZÜ sistemi dağıtım stratejisi bazı zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bir tam zamanında çizelgeleme yapısında, erken tamamlanan işler teslim tarihlerine kadar üreticinin elinde kalır. Bu da ürünün bozulmasından kaynaklanan maliyetler ile depolama veya sigorta gibi maliyetler getirir. Buna ilaveten, bitmiş ürün stoğu dolaylı olarak fırsat maliyeti taşıyan verimsiz bir yatırımdır. Diğer yandan, teslim tarihlerinden sonra tamamlanan işler müşteri tatminsizliği, sözleşme cezaları, satış kayıpları ve itibar kaybı gibi olumsuzluklara yol açar. Bu nedenle, ideal bir çizelge için tüm işler teslim tarihlerinde tamamlanmalıdır (Baker, 1997; Gordon vd., 2001; Toksarı, 2008).

E/G tamamlanma problemleri erken tamamlanmanın ve gecikmenin aynı anda en küçüklenmesini amaçlayan çizelgeleme problemleridir. Bu iki amacın amaç fonksiyonunda ifade edilmesi ile ilgili literatürde farklı yaklaşımlar ortaya

konulmuştur. Bu farklılıklar temel olarak dört grupta incelenebilir. Bunlar; işe bağımlı erken tamamlanma ve gecikme maliyeti, eşit olmayan ceza maliyeti, eşit ceza maliyeti ve işe bağımlı oranlanabilen ceza maliyeti olarak sınıflandırılabilir. Bir j işinin erken ve geç tamamlanması sırasıyla E_j ve T_j ile gösterilirse bu miktarlar şöyle belirlenir (Baker, 1997);

$$E_j = \max\{0, d_j - C_j\} = (d_j - C_j)^+ \quad (2.7)$$

$$T_j = \max\{0, C_j - d_j\} = (C_j - d_j)^+ \quad (2.8)$$

Her bir iş ile ilgili birim erken tamamlanma cezası $\alpha_j > 0$ ve geç tamamlanma cezası $\beta_j > 0$ 'dır. Ceza fonksiyonlarının doğrusal olduğu varsayımı altında bir S çizelgesi için temel E/G tamamlanma amaç fonksiyonu $f(S)$ olarak yazılabilir;

$$f(S) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [\alpha_i (d_j - C_j)^+ + \beta_i (C_j - d_j)^+] \text{ ve } \{\alpha, \beta > 0\} \quad (2.9)$$

yukarıda verilen eşitliklere göre genel formül şu şekilde olur:

$$f(S) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i E_j + \beta_i T_j) \quad (2.10)$$

Buna göre “erken tamamlanma ve gecikme maliyetlerinin bütün işler için aynı ama birbirine eşit olmadığı” durumda eşitlik şu şekilde yazılabilir;

$$f(S) = \sum_{j=1}^n [\alpha E_j + \beta T_j] \text{ ve } \alpha \neq \beta \quad (2.11)$$

“Erken tamamlanma cezası $\alpha = 1$ ve geç tamamlanma cezası $\beta = 1$ kabul edilerek” problemin karmaşıklığı azaltılarak şu fonksiyon elde edilebilir (Gordon vd., 2001):

$$f(S) = \sum_{j=1}^n [E_j + T_j] \text{ ve } \alpha = \beta = 1 \quad (2.12)$$

Oranlanabilen ceza maliyetlerinde her işe ait erken tamamlanma ve gecikme maliyetleri işe ait bir özellik olarak hesaplanmaktadır. Sun ve Wang çalışmalarında amaç fonksiyonunu şu eşitlikleri kullanarak belirlemişlerdir (Sun ve Wang, 2003):

$$\min z(\sigma) = \sum_{j \in J} w_j |C_j - d_j| \quad \text{ve} \quad w_j = \alpha \times p_j \quad (2.13)$$

Literatürde teslim tarihinin belirlenmesi üzerine temelde iki farklı alanda çalışmalar mevcuttur. Bu alanlardan birincisinde teslim tarihi ortak kabul edilmişken, diğerinde her işin kendisine ait teslim tarihi mevcuttur. Bunlara ek olarak zorunlu teslim tarihlerinin olduğu problemler de literatürde ele alınmaktadır (Baker, 1997).

2.3.2.1.Ortak Teslim Tarihli Problemler

E/G problemlerinin önemli bir özel durumu, ortak teslim tarihinden işin tamamlanma zamanlarının mutlak sapmasının toplamının en küçüklenmesini ele alır. Bu durumda, tüm d_j 'ler d 'ye eşittir. Teslim tarihinin işlerin ortasında olduğu bir çizelge oluşturulması arzu edilecektir. En temel maliyet fonksiyonu: $f(S) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i E_j + \beta_i T_j)$

$d_j = d$ şeklindedir ve α , β ve d 'nin durumuna göre farklı problemler literatürde incelenmiş ve incelenmektedir (Baker, 1997; Gordon vd., 2001).

Eğer d yeterince büyükse, yani çözüm takvimi açısından rahatça hareket edebilecek bir alan varsa bu tarz problemler literatürde “kısıtlandırılmamış versiyon” olarak adlandırılır. Aksi durumda, yani d yeterince büyük değilse, yani çözüm alanı rahatça hareket etmeyi engelliyorsa bu tarz problemler literatürde “kısıtlandırılmış versiyon” olarak ifade edilir. Bir başka şekilde ifade edilirse; $\Delta = p_n + p_{n-2} + p_{n-4} + \dots$ olsun. Δ 'nın önemi problemin kısıtlandırılmış ya da kısıtlandırılmamış olarak tanımlanması ile ilişkilidir. Ortak teslim tarihli problemler için çözüm alanı kısıtlandırılmamış ise ($d \geq \Delta$) “Kısıtlandırılmamış Versiyon”, çözüm alanı kısıtlandırılmış ise ($d < \Delta$) “Kısıtlandırılmış Versiyon” olarak sınıflandırılır (Baker, 1997):

Kısıtlandırılmamış Versiyon

$d \geq \Delta$ iken problemin kısıtlandırılmamış versiyonu elde edilir. Genel olarak bu tarz problemlerin çözümünde ispatları da olan şu özelliklere dikkat edilmesi gerekir:

Özellik 1: Temel E/G modelinde boş zaman içermeyen çizelgeler baskın bir set oluşturur.

İspat:

İşler (j)	1	2	3	4	5	6
P_i	1	3	4	6	7	9

Ortak teslim tarihi $d=24$ için;

(i, j) iş çiftleri arasındaki boş zamanın kullanılması ile toplam ceza maliyeti azaltılır.

Alternatif	Sıra	Tamamlanma Süreleri	i, j iş çifti ve aralarındaki boş zaman	Teslim tarihinden sapmalar (Toplam ceza maliyeti)
SPT	1-2-3-4-5-6	0-1-4-10-16-23-32	(2.-3. işler) boş zaman:2	23+21+20+8+1+8 = 81
Açıklama	i işi boş zaman kadar geç başlatılır	2-3-6-10-16-23-32		22+21+18+8+1+8 = 78
LPT	6-5-4-3-2-1	0-9-16-22-26-31-32	(5.-6. işler) boş zaman:2	15+8+2+2+7+8 = 42
Açıklama	j işi boş zaman kadar erken başlatılır	0-9-16-22-26-29-30		15+8+2+2+5+6 = 38

Özellik 2: Temel E/G modelinde, teslim tarihlerinden önce ve teslim tarihlerinde tamamlanan işler LPT sırasında sıralanırken, teslim tarihlerinden sonra başlayan işler SPT sırasında sıralanabilir.

İspat:

İlgili örnek için;

Alternatif	Sıra	Tamamlanma Süreleri	Teslim tarihinden sapmalar (Toplam ceza maliyeti)
Rasgele 1	2-3-4-5-1-6	0-3-7-13-20-21-30	21+17+11+4+3+6 = 62
Özellik 2'ye göre Rasgele 1'in düzenlenmesi	5-4-3-2-1-6	0-7-13-17-20-21-30	17+11+7+4+3+6 = 48
Rasgele 2	5-6-4-3-2-1	0-7-16-22-26-29-30	17+8+2+2+5+6 = 40
Özellik 2'ye göre Rasgele 2'nin düzenlenmesi	6-5-4-1-2-3	0-9-16-22-23-26-30	15+8+2+1+2+6 = 34

Özellik 3: Temel E/G tamamlanma modelinde, bir işin tam olarak teslim tarihinde tamamlandığı bir eniyi çizelge vardır.

İspat:

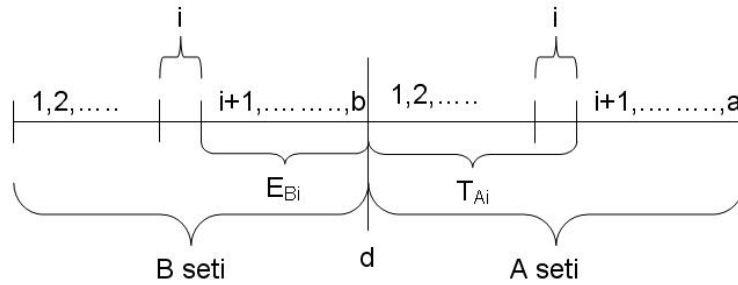
Eniyi bir S çizelgesinde bir i işinin teslim tarihinden önce başlayıp ondan sonra tamamlandığı kabul edilsin; $C_i - p_i < d < C_i$.

Sıralamada b tane işin erken tamamlandığı ve a tane işin geç tamamlandığı kabul edilsin. $a > b$ için; çizelgedeki i işinin tamamlanma zamanı tam olarak d zamanında bitecek şekilde çizelge daha erken başlatılsın. Yani diğer bir ifadeyle, bütün işler $\Delta t = C_i - d > 0$ miktarı kadar daha erken sürede tamamlanacaktır. Bu takdirde erken tamamlanma ceza fonksiyonu $b * \Delta t$ kadar artacak geç tamamlanma ceza fonksiyonu $a * \Delta t$ kadar azalacaktır. Bu değişkenliği ceza fonksiyonu üzerindeki net etkisi $(b - a) * \Delta t$ olacaktır ve negatif değerdedir. Diğer taraftan $b \geq a$ olduğu durum için; $\Delta t = d - (C_i - p_i) > 0$ 'dır. Bu takdirde de bu değişikliğin toplam ceza fonksiyonundaki etkisi $(a - b) * \Delta t$ olacaktır ve bu da pozitif değildir. Her iki durumdan birisi

olduğunda Özellik 3'te belirtildiği gibi en az S çizelgesi kadar iyi bir çizelge bulunabilir.

Özellik 3'ün sonucuna göre, her iş ya tamamen teslim tarihinden önce ya da tamamen sonra işlem görecektir. Yani bir çözüm işleri iki sete bölebilir. Erken ve geç iş setleri. Önce bu setlerin üyeleri bilinir ve set içindeki işlerin sırası Özellik 2 ile belirlenebilir. Ulaşılan çizelge V-biçimli çizelge olarak tanımlanır. Çünkü eşitlik haricinde ilk set işlem zamanlarının azalan sırasına göre sıralanacak ve ikinci set işlem zamanlarının artan sırasına göre sıralanacaktır. Önce erken sette işlerin nasıl atanacağı bilinir ve geç sette sıralanacak işler belli olur. Sonuç olarak bir eniyi değeri bulmak için $n!$ sıra yerine 2^n sıranın incelenmesine gerek kalır.

Teslim tarihinden önce veya teslim tarihinde tamamlanan işlerin setinin B ile temsil edildiği kabul edilsin ve bu set içindeki eleman sayısı b ile ifade edilsin. Aynı şekilde teslim tarihlerinden sonra tamamlanan işlerin seti A ile gösterilsin ve $a=|A|$ olsun. Ayrıca B_i , B setindeki i'nci işin indeksini gösterecek ve A_i 'de A setindeki i'nci işin indeksi olsun. B_i işinin erken tamamlanma cezası B setinde kendisinden daha sonra tamamlanan işlerin işlem zamanları toplamıdır. Bu doğrultuda aşağıdaki şekil üzerinde değerlendirirsek (Baker, 1997):



Şekil 2.2. Erken ve geç tamamlanan iş setleri

E_{B_i} : E setindeki B_i işinin erken tamamlanma cezası dersek;

$E_{B_i} = P_{B_{i+1}} + P_{B_{i+2}} + \dots + P_{B_b}$ ve $E_{B_b} = 0$ 'dır. Bu durumda B setindeki ve benzer şekilde A setindeki işlerin toplam cezası şu şekilde olur:

$$C_B = 0P_{B_1} + 1P_{B_2} + \dots + (b-2)P_{B_{(b-1)}} + (b-1)P_{B_b} . \quad (2.14)$$

$$C_A = aP_{A_1} + (a-1)P_{A_2} + \dots + 2P_{B_{(a-1)}} + 1P_{A_a} \quad (2.15)$$

Amaç fonksiyonu C_B ve C_A 'nın toplamıdır. a ve b bilindiğinde çarpımların toplamı toplam içindeki en küçük katsayı en büyük işlem zamanıyla eşleşerek, benzer şekilde eşleşmelere devam edilerek toplam en küçüklenir. En küçük katsayının sıfır olarak, C_B içinde yer aldığına dikkat edilmelidir. Böylece en uzun işlem zamanlı iş Özellik 2'nin ışığında B setine atanır ve sıradaki birinci iştir. Bir sonraki en küçük katsayı 1'dir ve hem C_B 'de hem de C_A 'da görünür. Yani bir sonraki en uzun işlem süreli işten birisi bu setin son işi olarak A setine atanabilir ve diğeri ise ikinci iş olarak B setine atanabilir. Bu işleme devam edildiğinde en kısa süreli iş ya B setinde son iş olarak veya A setinde ilk iş olarak atanacaktır. Orta aşamalarda her iş çiftini atamak için iki yol vardır. Bu çiftler A ve B seti arasında bölünmelidir. Eğer iş sayısı tek ise çiftleri oluşturmak için hayali bir iş eklenir. Böylece potansiyel olarak eniyi çözelgelerin toplam sayısı 2^r olur.

$$n \text{ tek} \Rightarrow r = \frac{n-1}{2} \text{ ve } n \text{ çift} \Rightarrow r = \frac{n}{2} \quad (2.16)$$

İlgili örnek için;

Alternatif	Sıra	Tamamlanma Süreleri	Teslim tarihinden sapmalar (Toplam ceza maliyeti)
Rasgele 2	5-6-4-3-2-1	0-7-16-22-26-29-30	$17+8+2+2+5+6 = 40$
Özellik 2'ye göre Rasgele 2'nin düzenlenmesi	6-5-4-1-2-3	0-9-16-22-23-26-30	$15+8+2+1+2+6 = 34$
Özellik 3'e göre Rasgele 2'nin 2. kez düzenlenmesi	6-5-4-1-2-3	1-10-23-24-27-31	$14+7+1+0+3+7 = 32$
Açıklama	$b \geq a$ olduğu için çizelgenin başlama tarihi ileri alınır.		

İşleri derecelendiren ve onları derecelendirilmiş listeden sırasıyla pozisyona atayan sisteme Algoritma 1 adı verilir. Bu algoritma Özellik 3'ü desteklemektedir ve en uygun çözümü vermektedir (Baker, 1997):

Algoritma 1

Temel E/G tamamlanma problemini çözmek için;

Adım 1. En uzun işlem zamanlı işi B setine ata.

Adım 2. Sonraki en uzun işlem zamanlı iki işi bul. Birini B diğeri A setine ata.

Adım 3. Hiçbir iş kalmayana kadar 2. adımı tekrarla veya bir iş kalıncaya kadar yöntemi tekrarla ve kalan bu işi ya A setine ya da B setine ata.

Örnek olarak aşağıdaki işler, zamanları ve ortak teslim tarihi $d=24$ için ele alalım:

İşler (j)	1	2	3	4	5	6
P_1	1	3	4	6	7	9

B seti: 6(kesin)-(5 veya 4)-(3 veya 2)-1(olabilir veya olmayabilir)

A seti : (5 veya 4)-(3 veya 2)-1(olabilir veya olmayabilir)

B setindeki işler	A setindeki işler	Sıra	B seti için zaman	Başlama zamanı
6,5,3,1	2,4	6-5-3-1-2-4	21 (9+7+4+1)	24-21 = 3
6,5,3	1,2,4	6-5-3-1-2-4	20	24-20 = 4
6,5,2,1	3,4	6-5-2-1-3-4	20	24-20 = 4
6,5,2	1,3,4	6-5-2-1-3-4	19	24-19 = 5
6,4,3,1	2,5	6-4-3-1-2-5	20	24-20 = 4
6,4,3	1,2,5	6-4-3-1-2-5	19	24-19 = 5
6,4,2,1	3,5	6-4-2-1-3-5	19	24-19 = 5
6,4,2	1,3,5	6-4-2-1-3-5	18	24-18 = 6

Algoritma bu problem için $2^r=8$ eniyi çözüm verir.

Toplam ceza maliyeti:

Alternatif	Tamamlanma Süreleri	Teslim tarihinden sapmalar (Toplam ceza maliyeti)
6-5-3-1-2-4	3-12-19-23-24-27-33	12-5-1-0-3-9 = 30
6-5-3-1-2-4	4-13-20-24-25-28-34	11-4-0-1-4-10 = 30
6-5-2-1-3-4	4-13-20-23-24-28-34	11-4-1-0-4-10 = 30
6-5-2-1-3-4	5-14-21-24-25-29-35	10-3-0-1-5-11 = 30
6-4-3-1-2-5	4-13-19-23-24-27-34	11-5-1-0-3-10 = 30
6-4-3-1-2-5	5-14-20-24-25-28-35	10-4-0-1-4-11 = 30
6-4-2-1-3-5	5-14-20-23-24-28-35	10-4-1-0-4-11 = 30
6-4-2-1-3-5	6-15-21-24-25-29-36	9-3-0-1-5-12 = 30

İkinci ölçüt B setindeki toplam işlem zamanını enküçüklemek olsun. Algoritma 1'de 2. adımın her safhasında daha kısa işlem zamanlı işi B'ye atayarak bu amaç gerçekleştirilir. Bu uygulamaya Algoritma 1* diyelim. Algoritma 1*, E/G problemlerinin çözümü için her zaman kullanılabilir. Buradan şu sonuçlar çıkartılır (Baker, 1997):

Sonuç 1. Algoritma 1* uygulanması ile a ve b değerlerinin belirlenmesi ile ilgilidir. n çift ise C_B ve C_A 'nın toplamını $b=a$ olarak, n tek ise $b=a+1$ olarak en küçükleyebiliriz. Bu sonuç Özellik 4 ile şu şekilde ifade edilebilir:

Özellik 4: Temel E/G modelinde, sıradaki b'inci işin ortak teslim tarihi d'de tamamlandığı ve b'nin $n/2$ 'ye eşit veya daha büyük en küçük tamsayı olduğu bir eniyi çizelge vardır. Özellik 4 hangi işin tam olarak teslim tarihinde tamamlanması gerektiğini belirler.

Sonuç 2. İşlerin SPT (1-2-3-4-5-6) sırasında incelendiği varsayımı ile P_6 (9) en uzun işlem zamanına sahiptir.

Algoritma 1* kullanılarak B setindeki toplam işlem zamanı $\Delta = p_n + p_{n-2} + p_{n-4} + \dots$ şeklinde yazılabilir. Δ 'nın önemi problemin kısıtlandırılmış ya da kısıtlandırılmamış versiyon olarak tanımlanması ile ilişkilidir. Ortak teslim tarihli problemin çözüm alanı kısıtlandırılmamış ise $d \geq \Delta$, kısıtlandırılmış ise $d < \Delta$ 'dır. Çözüm alanı daraltılmış (kısıtlandırılmış) bir problem verildiğinde Algoritma 1 eniyi çizelgeyi üretmeyebilir. Problem çözüm alanı daraltılmamış (kısıtlandırılmamış) ise Algoritma 1* eniyi çizelgeyi garanti edecektir (Baker, 1997). Örnek için;

$$b = \frac{n}{2} = \frac{6}{2} = 3 \quad \Delta = p_6 + p_4 + p_2 = 9 + 6 + 3 = 18$$

Verilen örnekteki iş seti için, ortak teslim tarihi $d=18$ olduğunda dahi teslim tarihi açısından problem kısıtlandırılmamış olup, Algoritma 1* eniyi bir çizelge üretecektir. $d < 18$ için ise problem kısıtlandırılmış versiyon olacaktır.

Kısıtlandırılmış Versiyon

$d < \Delta$ iken problemin kısıtlandırılmış versiyonu elde edilir. Kısıtlandırılmış versiyonda Özellik 1 ve 2 geçerlidir, ama Özellik 3 her zaman geçerli değildir. V-biçimli çizelgede en kısa işlem zamanlı iş, teslim tarihinde veya teslim tarihinden önceki son iş olabilir veya teslim tarihinden sonraki ilk iş olabilir. Bunların yanında teslim tarihinden önce başlayan teslim tarihinden sonra tamamlanan iş de olabilir. Ama Özellik 3'e göre her zaman için eniyi çözümde en kısa işlem zamanlı iş, teslim tarihinden önce başlayıp teslim tarihinden sonra tamamlanır. Son olarak Özellik 4, Özellik 3'e bağlı olduğu için bu da her zaman için geçerli değildir. Hall vd. (1991) kısıtlandırılmış versiyon problemin NP-tam olduğunu göstermişlerdir. Kısıtlandırılmış versiyonda başlangıçta sıfır alınır ve zamanla ileriye doğru kaydırılır (Baker, 1997): Örneğin;

İşler (j)	1	2	3
P_j	1	1	10

değerleri ve ortak teslim tarihi $d=5$ için; eğer başlangıç noktası 0 seçilirse 6 muhtemel çizelgeden 1-2-3 ve 2-1-3 çizelgeleri 14 ceza puanı ile eniyi çizelgeler seçilir. Eğer başlangıç noktası 3'e kaydırılırsa ceza puanı 11'e indirilir. Bu örnek gösteriyor ki eniyi çizelgede başlangıç geciktirilebilir.

Bu nedenle, her zaman için ya 0 noktasında başlayan çizelge ya da tam olarak teslim tarihinde tamamlanan işin olduğu çizelge eniyi çizelge olmayabilir. Kısıtlandırılmış versiyon için eniyi çözümü bulmak her zaman için kolay değildir. Eniyi çözümü bulmak için kolay bir teknik olmamasına rağmen, Sundararaghavan ve Kunnathur (1994) tarafından geliştirilen etkili bir sezgisel mevcuttur. Bu sezgisel “0 (sıfır)” zamanında başlayan ve V-biçimli çizelge üreten bir tekniktir (Baker, 1997).

Her atama için L (teslim tarihinden önceki işler) ve R (teslim tarihinden sonraki işler) değerleri belirlenmelidir:

$$L = d \text{ ve } R = \left(\sum_{j=1}^n p_j - d \right) \quad (2.17)$$

Öncelikle işler en uzun işlem zamanlıdan başlayarak sıralanır. Daha sonra aşağıdaki karar kuralı kullanılır;

Eğer $L > R$ ise sonraki iş baş tarafa atanır.

Eğer $L \leq R$ ise sonraki iş son tarafa atanır.

J işini çizelgede ilk pozisyona atarsak L’den P_j çıkartılır. Eğer j işi son pozisyona atanırsa R’den p_j çıkarılır. $d = 90$ için;

İşler (j)	1	2	3	4	5	6
P_j	1	10	11	48	50	53

Öncelikle L ve R belirlenir ve atamalar yapıldıkça değerleri güncellenir.

$$L = d = 90 \text{ ve } R = \left(\sum_{j=1}^n p_j - d \right) = 83 ,$$

İşler işlem zamanının azalan sırasına göre sıralanarak atamanın başa mı sona mı yapılacağı kararlaştırılır.

L	R	Atama	Sıra
90	83	6. iş başa atanır ($L > R$)	6-*.~*~*~*~*
37	83	5. iş sona atanır ($L \leq R$)	6-*.~*~*~*~5
37	33	4. iş başa atanır ($L > R$)	6-4-*.~*~*~*~5
-11	33	3. iş sona atanır ($L \leq R$)	6-4-*.~*~*~3-5
-11	22	2. iş sona atanır ($L \leq R$)	6-4-*.~*~2-3-5
-11	12	1. iş sona atanır ($L \leq R$)	6-4-1-2-3-5

Toplam ceza 198’dir.

Çizelgenin başlama zamanını geciktirerek toplam cezayı azaltabiliriz. Teslim tarihinden önce biten işlerin sayısı e olsun; (n-e) teslim tarihinden sonra biten veya

teslim tarihinde biten işlerin sayısıdır. Δt gibi bir değerin desteğiyle çizelgenin başlama zamanı geciktirilebilir. Δt sayesinde hem “e” hem de “(n-e)” kadar işin cezaları azaltılır. Eğer $e * \Delta t > (n - e) * \Delta t$ ise toplam ceza azalacaktır. $e * \Delta t > (n - e) * \Delta t \cong e > \frac{n}{2}$ ise, yani işlerin yarısından fazlası erken tamamlanıyorsa çizelgenin başlama zamanı geciktirilebilir. Bu miktar teslim tarihinden en son erken biten işin tamamlanma süresi çıkartılarak bulunabilir (Baker, 1997).

Yukarıdaki örnek için çizelge 6-3-2-1-4-5 ve $d=90$ olsa idi, ceza maliyeti 213 olacaktı.

Alternatif	Tamamlanma Süreleri	Teslim tarihinden sapmalar (Toplam ceza maliyeti)
6-3-2-1-4-5	0-53-64-74-75-123-176	$37+26+16+15+33+86 = 213$

Bu durumda önce biten işlerin sayısı (e) (6,3,2,1 işleri ile) dördür. $e > n/2$ olduğundan teslim tarihinden en son erken biten işin tamamlanma süresi çıkartılarak $\Delta t = 90 - 75 = 15$ bulunur ve buna göre çizelge 15 birim geciktirilebilir.

Alternatif	Tamamlanma Süreleri	Teslim tarihinden sapmalar (Toplam ceza maliyeti)
6-3-2-1-4-5	15-68-79-89-90-138-191	$22+11+1+0+48+101 = 183$

Böylece ceza maliyeti 30 br indirilmiş olur.

2.3.2.1.1.Farklı Erken ve Geç Tamamlanma Cezalı Modeller

$f(S) = \sum_{j=1}^n (\alpha E_j + \beta T_j)$ şeklinde işlerin her birisine ait ceza maliyetlerinin farklı olması,

problemi daha karmaşık hale getirecektir. Daha önce belirtildiği gibi, her bir iş ile ilgili birim erken tamamlanma cezası $\alpha > 0$ ve geç tamamlanma cezası $\beta > 0$ 'dır. Bu cezalar farklıdır, çünkü $\alpha > 0$ genellikle iç faktörlere, $\beta > 0$ genellikle dış faktörlere bağlıdır (Baker, 1997; Gordon vd., 2001).

Kısıtlandırılmamış Versiyon

Bu problemin hem kısıtlı hem de kısıtsız durumları mevcuttur. Kısıtsız durum için, eniyi çözüm Özellik 1, 2 ve 3'e göre tespit edilir. Buna göre (Baker, 1997);

1- Boş zaman yoktur (Özellik 1).

2- Teslim tarihinde veya öncesinde tamamlanan işler LPT sırasında, geç tamamlanan işler SPT sırasında sıralanır (Özellik 2).

3- Bir iş ortak teslim tarihi olan d'de tamamlanır (Özellik 3).

Amaç fonksiyonunun bileşenleri, B ve A için toplam ceza Eşitlik 2.14 ve 2.15'te C_B ve C_A olarak verilmiştir.

Amaç fonksiyonu C_B ve C_A 'nın toplamıdır. Çarpımların toplamı, toplamdaki en küçük katsayı ile en büyük işlem zamanını, bir sonraki en küçük katsayı ile bir sonraki en büyük işlem zamanını ve benzer şekilde katsayı ve işlem zamanları eşleştirilerek en küçüklenebilir. Bu yöntemle eniyi çizelge bulunur. Farklı erken ve geç cezalara sahip E/G problemleri için ise şu algoritma uygulanabilir (Baker, 1997);

Algoritma 2

Adım 1. Başlangıçta, B ve A setleri boştur ve işler LPT sırasındadır.

Adım 2. Şayet $\alpha|B| < \beta(1+|A|)$ ise takip eden işi B'ye, değilse takip eden işi A'ya ata.

Adım 3. Tüm işler çizelgelene kadar Adım 2'yi tekrar et.

İşler (j)	1	2	3	4	5	6
P_j	1	3	4	6	7	9

ortak teslim tarihi $d = 24$, erken tamamlanma cezası $\alpha = 5$ ve geç tamamlanma cezası $\beta = 2$ için; Algoritma 2'de ki adımlar aşağıdaki tabloda listelenmiştir:

B	A	α	β	$\alpha B $	$\beta(1+ A)$	Sonuç
0	0	5	2	0	2	6. işi B'ye ata
1	0	5	2	5	2	5. işi A'ye ata
1	1	5	2	5	4	4. işi A'ye ata
1	2	5	2	5	6	3. işi B'ye ata
2	2	5	2	10	6	2. işi A'ye ata
2	3	5	2	10	8	1. işi A'ye ata

Buna göre çizelge 6-3-1-2-4-5 şeklinde oluşur. Başlama zamanı 11, toplam ceza 84 olur.

Temel E/G modelinde olduğu gibi ilave edilecek iki sonuç vardır.

Sonuç 1. Özellik 4'dür.

Özellik 4. Erken ceza α ve geç bitirme cezasının β olduğu temel E/G modelinde b'inci sıradaki işin d'de tamamlandığı ve b'nin $\frac{n\beta}{(\alpha+\beta)}$ 'ye eşit veya daha büyük en küçük tamsayıya eşit olduğu bir eniyi çizelge vardır ($\alpha=\beta=1$ olduğunda bir temel E/G problemi elde edilir).

Örneğimizde; $b = \frac{12}{7}$ 'den yaklaşık olarak $b = 2$ 'dir.

Sonuç 2. Δ eniyi çizelgede B setindeki toplam işlem zamanına bağlıdır.

$\Delta = p_{B_1} + p_{B_2} + \dots + p_{B_{(b-1)}} + p_{B_b}$ olarak; problem $d \geq \Delta$ ise kısıtlandırılmamış, $d < \Delta$ ise kısıtlandırılmış versiyon olarak adlandırıldığından; örnek problem için, $\Delta = 13$ 'tür ve $d < 13$ için problem kısıtlandırılmış versiyon olacaktır.

Kısıtlandırılmış Versiyon

$d < \Delta$ iken problemin kısıtlandırılmış versiyonu elde edilir. Bu durumda Özellik 1 ve 2 halen geçerlidir. Temel E/G probleminin kısıtlandırılmış versiyonu için önerilen sezgisel yaklaşım genelleştirilir. $L > R$ yerine $\alpha L > \beta R$, çizelgenin başlama zamanı için $e > \frac{n}{2}$ yerine $e > \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)}$ kullanılır. Temel E/G modelinde kabul edilen $\alpha = \beta = 1$ ifadesi geçerli olmadığı iki durum incelenirse (Baker, 1997):

Durum 1. Hiç bir iş ortak teslim tarihi d 'de tamamlanmamış olsun.

“b” zamanında tamamlanan veya bu tarihten önce tamamlanan işlerin sayısı olsun ve çizelgeyi Δt kadar geciktirelim. Bu durumda erken tamamlanan b işin erken tamamlanmasını Δt kadar düşürmüş oluruz. $(n-b)$ tane geç kalan işin gecikme miktarını aynı miktar (Δt) yükseltmiş oluruz. Bu gecikmenin toplam cezaya etkisi $(n - b)\beta\Delta t - b\alpha\Delta t$ 'dir. Bu değer $b > \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)}$ koşulu altında negatif olur.

Eğer elde edilen bu ifade sağlanırsa çizelgenin başlama zamanını Δt kadar geciktirmek uygun olur.

Durum 2. En az bir iş tam olarak teslim tarihinde tamamlansın $C_b = d$.

Çizelgeyi Δt kadar geciktirelim. Bu gecikmenin toplam cezaya etkisi $(n - b + 1)\beta\Delta t - (b - 1)\alpha\Delta t$ 'dir. Bu miktar $b > \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)} + 1$ durumunda negatiftir.

Şayet bu yeni düzenlenmiş çizelge başlangıçta zamanında tamamlanmış olan bir veya daha fazla işin gecikmesine sebep oluyorsa, geciken işleri SPT'ye göre sıralayarak toplam cezada iyileşme sağlanması mümkün olabilir.

SPT'ye göre sıralayarak toplam cezayı iyileştirmek mümkündür. Ancak, sıranın ilk kısmında yer alan işlerin LPT sırasına göre, ikinci kısımda yer alan işlerin SPT sırasına göre sıralanması kuralına dikkat edilmelidir. Bu durumda koşul şöyledir;

$$b > \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)} + 1 \text{ ve } t_b > t_{b+1} \text{ burada;}$$

α , β : birim erken ve geç tamamlanma maliyetleri

n: çizelgelenecek işlerin sayısı

d: ortak teslim tarihi

b: erken biten ve zamanında tamamlanan işlerin sayısı

t_b : zamanında tamamlanan son işin işlem süresi

C_b : zamanında tamamlanan son işin tamamlanma zamanı

Algoritma 3

Adım 1. Algoritma 1 kullanılarak başlangıç çizelgesi elde edilir ($L > R$ yerine $\alpha L > \beta R$ kullanılmalıdır).

Adım 2. d'de tamamlanan bir iş var ise 3. adıma geç, aksi takdirde;

a) Eğer $b < \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)}$ ise DUR.

b) Eğer $b = \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)}$ ve $t_{b+1} \leq t_{b+2}$ ise DUR.

c) Eğer $b = \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)}$ ve $t_{b+1} > t_{b+2}$ ise işlerin başlamasını $C_b = d$ olacak şekilde geciktir ve Adım 4'e git.

d) Eğer $b > \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)}$ ise $C_b = d$ olacak şekilde geciktir ve Adım 3'e git.

Adım3. $b \leq \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)} + 1$ ise Adım 4'e, değil ise t_b kadar başlama zamanını geciktir.

$b \rightarrow b-1$ yap ve Adım 3'ü tekrarla.

Adım 4. Geciken işleri SPT sırasında olacak şekilde yeniden sırala.

Örnek

Erken veya geç tamamlanma cezalarının sırasıyla 8 TL ve 10 TL olduğu bir firmada 7 işin tek makinede çizelgelenmesi istenmektedir. Teslim tarihi 313 ve işlem zamanları aşağıdaki gibi olduğuna göre en düşük ceza maliyetli çizelge nasıldır?

İşler (j)	1	2	3	4	5	6	7
P_i	14	21	24	75	83	86	96

Adım 1. Algoritma 1 uygulandığında 7-6-5-3-2-1-4 başlangıç çizelgesi elde edilir.

Alternatif	Tamamlanma Süreleri	Toplam ceza maliyeti
7-6-5-3-2-1-4	0-96-182-265-289-310-324-399	(217+131+48+24+3)*8 + (11+86)*10 = 4354 TL

$b = 5$ 'dir.

Adım 2. Hiçbir iş teslim tarihinde tamamlanmadığına göre Adım 2'deki koşulları test ediyoruz.

$$\frac{n\beta}{(\alpha + \beta)} = \frac{7 * 10}{10 + 8} = 3,89 \quad \text{ise} \quad b > \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)} \text{ 'dir.}$$

Buna göre işler $C_b = d$ olması için 3 zaman birimi geç başlatılır (böylece 2 nolu iş 310 zaman biriminde değil 313 zaman biriminde tamamlanır).

Alternatif	Tamamlanma Süreleri	Toplam ceza maliyeti
7-6-5-3-2-1-4	0-96-182-265-289-310-324-399	(217+131+48+24+3)*8 + (11+86)*10 = 4354 TL
7-6-5-3-2-1-4	3-99-185-265-292-313-327-402	(214+128+45+21+0)*8 + (14+89)*10 = 4294 TL

$b=5$ 'dir. Toplam ceza maliyeti 4294 TL'ye düşürülür.

Adım 3.

$$\frac{n\beta}{(\alpha + \beta)} + 1 = \frac{7 * 10}{10 + 8} + 1 = 4,89 \quad \text{ise} \quad b > \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)} + 1 \text{ 'dir.}$$

Böylece başlama zamanı $t_5=21$ (2 no'lu iş) kadar geciktirilir. $b \rightarrow b-1$ olur ve Adım 3 tekrarlanır.

Alternatif	Tamamlanma Süreleri	Toplam ceza maliyeti
7-6-5-3-2-1-4	0-96-182-265-289-310-324-399	(217+131+48+24+3)*8 + (11+86)*10 = 4354 TL
7-6-5-3-2-1-4	3-99-185-265-292-313-327-402	(214+128+45+21+0)*8 + (14+89)*10 = 4294 TL
7-6-5-3-2-1-4	24-120-206-286-313-334-348-423	(193+107+27+0)*8+(21+35+110)*10 = 4276 TL

$b=4$ 'dür. Toplam ceza maliyeti 4276 TL'ye düşürülür.

$$\frac{n\beta}{(\alpha + \beta)} + 1 = \frac{7 * 10}{10 + 8} + 1 = 4,89 \quad \text{ise} \quad b < \frac{n\beta}{(\alpha + \beta)} + 1 \text{ 'dir. Adım 4'e geçilir.}$$

Adım 4. Geciken işler (2-1-4) SPT sırasına göre yeniden düzenlenir (1-2-4). Buna göre oluşan son çizelge ve oluşan ceza maliyetleri şu şekilde oluşur.

Alternatif	Tamamlanma Süreleri	Toplam ceza maliyeti
7-6-5-3-2-1-4	0-96-182-265-289-310-324-399	(217+131+48+24+3)*8 + (11+86)*10 = 4354 TL
7-6-5-3-2-1-4	3-99-185-265-292-313-327-402	(214+128+45+21+0)*8 + (14+89)*10 = 4294 TL
7-6-5-3-2-1-4	24-120-206-286-313-334-348-423	(193+107+27+0)*8+(21+35+110)*10 = 4276 TL
7-6-5-3-1-2-4	24-120-206-289-313-327-348-423	(193+107+27+0)*8+(14+35+110)*10 = 4206 TL

Oluşan son ceza maliyeti 4206 TL olur.

Örnekten de görüldüğü gibi Algoritma 3 son adıma kadar başlangıç çizelgesini değiştirmez sadece çizelgenin başlangıç noktasını belirlemeye çalışır. Sadece Adım 4'de çizelgede değişiklik yapar.

2.3.2.1.2.İşe Bağımlı Erken ve Geç Tamamlanma Cezalı Modeller

E/G tamamlanma cezaları işe bağımlı olarak değiştiğinde amaç fonksiyonu Eşitlik 2.10'daki gibi $f(S) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i E_j + \beta_i T_j)$ olarak yazılabilir. Bu problemin kısıtlandırılmamış durumu Hall ve Posner (1991) tarafından incelenmiştir. Hall ve Posner, Özellik 1 ve 2'nin ilgili varyasyonlarını ve eniyi sıra için gerekli koşulları sağlayan bazı üstünlük özelliklerini ispatlamıştır. En önemli sonuçları ise problemin kısıtlandırılmış versiyonunun NP-tam olduğunun ispatıdır. Sahte polinom olduğunu gösterdikleri dinamik programlama algoritmasını geliştirmeye devam etmişlerdir. Ek olarak, yüzlerce iş içeren problemleri ele alarak ve makul çözüm sürelerinde eniyi sonuçları elde ederek algoritmalarının işlemsel etkililiğini göstermişlerdir (Hall ve Postner, 1991).

Baker ve Scudder (1990) problemin sıralama yönünü ihmal ettiğini belirterek, Özellik 1'in hala geçerli olduğunu göstermiş, Özellik 3'ü sağlanmış ve Özellik 2 ve 4'ü şu şekle dönüştürmüşlerdir:

Özellik 2: Eniyi çizelge V-biçimlidir, B'deki işler P_j/α_j oranının azalan sırasına göre sıralanır; A'daki işler (P_j/β_j) oranının artan sırasına göre sıralanır.

Özellik 4: Eniyi çizelgede sıradaki b. iş d'de tamamlanır. Burada b, $\sum_{j=1}^b (\alpha_j + \beta_j) \geq \sum_{j=1}^n (\beta_j - \delta_j)$ eşitsizliğini sağlayan en küçük tamsayıdır.

Hino vd. tek makinede ortak teslim tarihli bir problemi inceleyerek, işlerin erkenlik ve geçlik cezalarının ağırlıklı toplamının enküçüklenmesini sağlamaya çalışmışlardır. Bu problem NP-zor olduğu için tabu arama (TA) tabanlı bir sezgisel ve bir genetik algoritma önermişlerdir. Bu metotların performansını artırmak için melez stratejileri de analiz etmişlerdir. Önerilen yaklaşımlar Biskup ve Feldmann (2001)'in makalelerinden seçilen 280 standart problem ile karşılaştırılmıştır (Hino vd., 2005).

2.3.2.1.3.Doğrusal Olmayan Cezalı Modeller

Bazı durumlarda teslim tarihinden büyük sapmalar kesinlikle istenmez. Bu nedenle performans ölçütü olarak ortak teslim tarihinden sapmaların karelerinin kullanılması

daha uygun olabilir ve bu durumda amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir (Baker, 1997):

$$f(S) = \sum_{j=1}^n (d - C_j)^2 = \sum_{j=1}^n (E_j^2 + T_j^2) \quad (2.18)$$

Bagchi vd. bu problemin kısıtlandırılmamış halinin, Eilon ve Chowdhury (1977), Kanet (1981a), Vani ve Raghavachari (1987) tarafından çalışılan tamamlanma zamanı varyansı problemine denk olduğunu göstermiştir (Bagchi vd., 1987a).

Eilon ve Chowdhury (1977) Özellik 2'yi ispatlamış ve karesel problemi çözmek amacıyla da bitişik iş çiftlerinin yer değiştirmesini kullanarak ilk sezgisel algoritmayı önermiştir. Kanet (1981a) problemin, işlerin tamamlanma sürelerinin toplamını enküçükmeye denk olduğunu göstermiş, karesel mutlak sapma problemine yönelik bir algoritmayı, bir sezgisel olarak uyarlamış ve Eilon ve Chowdhury (1977)'nin sonuçlarını geliştirmiştir. Vani ve Raghavachari (1987) tüm iş çiftlerinin yer değiştirmesinin kullanımını incelemiş ve diğer sezgisellerden daha iyi sonuçlar elde etmiştir (Baker ve Scudder, 1990).

Bagchi vd. hem kısıtlandırılmış hem de kısıtlandırılmamış problem için uygulanan birerleme yöntemlerini hızlandırmak için birkaç üstünlük özelliği kullanmıştır. Bununla birlikte, kısıtlandırılmış durum için çizelgenin sıfır zamanında başladığı varsayılmıştır (Bagchi vd., 1987b). De vd. bu noktayı incelemiş ve çizelgenin sıfır zamanında başladığı varsayımını kullanmadan birerleme çözüm yöntemi geliştirmiştir (De vd., 1989).

Bagchi vd. erken ve geç tamamlanma cezalarının farklı olduğu durumu da incelemiştir. Yine üstünlük özellikleri geliştirmişler ve onları, problemi çözmek için uygulanan bir arama yöntemi ile birleştirmişlerdir. Bununla birlikte, yaklaşımları esas olarak birerleme şeklinde kalmıştır. Karesel cezaların olduğu durumda Özellik 1 ve 2 sağlanır, fakat Özellik 3 sağlanmaz. Doğrusal olmayan cezalar durumu için Özellik 4'ün herhangi bir geliştirilmesi mevcut değildir (Bagchi vd., 1987b).

Leung her birinin bir işlem süresine ve ortak teslim tarihine sahip olduğu n işin tek makine üzerinde sıralanması ile ilgili problemi dikkate almıştır. Ortak teslim tarihinin tüm işlerin teslim tarihine dek tamamlanabilecek kadar büyük olduğu

varsayılmıştır ve erken ve geç tamamlanmanın en küçük olduğu çizelgeyi bulmak için $O(n \log n)$ karmaşıklıkta bir algoritma olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada ikili ölçütlü bir çizelgenin bulunması amaçlanmıştır. Birincil hedef, erkenlik ve geçlik toplamının en küçüklenmesidir. İkincil hedefler ise (1) en büyük erkenlik ve geçliğin; (2) en büyük erkenliğin karesi ve en büyük geçliğin karesinin toplamının; (3) erkenlik ve geçliğin karelerinin toplamının en küçüklenmesidir. İlk iki ölçüt için problemlerin NP-zor olduğu gösterilmiş ve her ikisi için tamamıyla polinom zamanlı yaklaşım planı verilmiştir. Son iki ölçüt için en kötü çizelgenin eniyi çizelgeye oranının $3/2$ 'den fazla olmadığı gösterilmiştir. Araştırmacının dikkate aldığı birincil hedef; $t(S) = \sum_{i=1}^n (E_i + T_i)$, ikincil hedefler ise; $f(S) = \sum_{i=1}^n (E_i^2 + T_i^2)$, $g(S) = \max_{i=1}^n \{E_i^2\} + \max_{i=1}^n \{T_i^2\}$ ve $h(S) = \max_{i=1}^n \{E_i, T_i\}$ şeklinde ifade edilebilir (Leung, 2002).

Valente ve Goncalves doğrusal erken tamamlanma cezalı doğrusal olmayan geç tamamlanma cezalı aylak zamanı olmayan tek makine çizelgeleme problemi ($f(S) = \sum_{i=1}^n (E_i + T_i^2)$) için bir genetik algoritma yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımla küçük boyutlu problemler için eniyi sonuca ulaşmışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda iyi çözümlere daha kısa sürede ulaşıldığını göstermişlerdir (Valente ve Goncalves, 2009).

2.3.2.1.4. Teslim Tarihi Toleranslı Modeller

Bazı yaklaşımlarda, tamamlanma zamanı teslim tarihine yeterince yakınsa cezanın sıfır olmasına izin verilir. Burada yeterince yakınlıkla kastedilen belli bir toleranstır. j işinin ceza almaması için tamamlanma zamanının $d-u_j$ ve $d+v_j$ tolerans aralığına düşmesi gerekir. Cheng ölçütün, toplam mutlak sapma olduğu ve bütün u_j ile v_j 'lerin özdeş olduğu özel durumu analiz etmiş ve kısıtlandırılmamış durumda Özellik 1 ve 2'nin doğrudan, Özellik 3 ve 4'ün de küçük değişikliklerle sağlandığını göstermiştir. Fakat bu model için "Model, teslim tarihinin her iki tarafındaki tolerans aralığında tamamlanan bir iş için ceza tanımlanmamasına rağmen diğer işler için erken ve geç tamamlanma, tolerans aralığının sonundan değil teslim tarihinden hesaplanır" varsayımını yapmıştır. j işi için daha geleneksel ve uygun bir varsayım dikkate

alınırsa erken ve geç tamamlanma sadece tolerans aralığının sonundan ölçülür. Böylece E ve T şu şekilde ifade edilir (Cheng, 1988):

$$E_j = (d - C_j - u_j)^+ \text{ ve } T_j = (C_j - d - v_j)^+ \quad (2.19)$$

Toleranslı modelde Özellik 1 ve 2 sağlanmaya devam eder. Özellik 3'ün genelleşmiş hali eniyi çözümde herhangi bir cezaya uğramayan bir b işi olduğunu ifade eder. Özellik 4'ün genelleşmiş hali ise eniyi sırada b için gerekli bir koşul sağlar (Baker ve Scudder, 1990).

Özellik 3(G): Eniyi çizelgede, j işi $d-u_j$ ya da $d+v_j$ 'de tamamlanır.

Özellik 4(G): Eniyi çizelgede b, geçlik cezasına uğramayan işlerin sayısını gösterebilir. b işinin tamamlanma zamanı aşağıdaki koşulları sağlar.

$$C_b = d - u_b \text{ eğer } \sum_{i<b} \alpha_i < \sum_{i \geq b} \beta_i \text{ ve } \sum_{i<b} \alpha_i \geq \sum_{i>b} \beta_i \quad (2.20)$$

$$C_b = d + v_b \text{ eğer } \sum_{i<b} \alpha_i < \sum_{i>b} \beta_i \text{ ve } \sum_{i \leq b} \alpha_i \geq \sum_{i>b} \beta_i \quad (2.21)$$

2.3.2.2.Farklı Teslim Tarihli Problemler

Genel E/G tamamlanma modelinde, her iş kendine ait bir teslim tarihine sahip olabilir. Bu özellik ortak teslim tarihli probleme göre en küçük maliyetli çizelgeyi belirlemek açısından daha fazla zorluk taşımaktadır (Baker, 1997).

Seidmann vd. farklı teslim tarihli tek makine E/G tamamlanma problemini ele almıştır. Modellerinde, teslim tarihleri karar değişkenleri olarak davranır ve amaç, tedarik zamanı, erkenlik ve geçlik cezalarının toplamını en küçükmektir. İşlerin tümü, işlem sürelerinin azalan sırasına göre dizilir. A tedarik zamanını göstermek üzere, buna bağlı olarak problemin amaç fonksiyonu şu şekilde yazılabilir (Seidmann

vd., 1981): $A_j = \max(0, d_j - A)$ ve $f(S, d) = \sum_{j=1}^n (xA_j + \alpha E_j + \beta T_j)$. Burada x, α ve

β sırasıyla birim tedarik zamanı, birim erken teslim cezası ve gecikme cezasını gösterir. Araştırmacılar, en kısa işlem süreli işin ilk işlenmesine dayalı dağıtım kuralını uygulayarak eniyi çözüm veren bir algoritma sunmuşlardır. $X \leq \beta$ ise her işin

teslim tarihi $d_j^* = \sum_{i=1}^j p_i$ olarak belirlenir. Aksi takdirde, her işin teslim tarihi

$d_j^* = \min\{A, \sum_{i=1}^j p_i\}$ olarak belirlenir (Seidmann vd., 1981).

Garey vd. bu problemin NP-tam olduğunu ilk olarak gösteren araştırmacılar olmuştur. Bu problem modellerinde Özellik 1 ve 2 sağlanmaz. Eniyi sıra V-biçimli olmayabilir ve eniyi çizelge için arama, iyi bir iş sırası bulma ve boş zamanı yerleştirme gibi iki alt probleme ayrıştırılabilir (Garey vd., 1988).

Soroush ve Friendall farklı teslim tarihli ve stokastik işlem süreli tek makine E/G tamamlanma problemini incelemişlerdir. Herhangi bir S çizelgesi için, C_s , toplam beklenen E/G tamamlanma maliyeti; \hat{C}_s , işlerin beklenen tamamlanma zamanından kaynaklanan toplam deterministik E/G tamamlanma maliyeti; ve \bar{C}_s , işlerin standart varyasyonundan kaynaklanan toplam deterministik E/G tamamlanma maliyetini göstermektedir. Araştırmacılar, toplam beklenen E/G tamamlanma maliyeti C_s için alt ve üst sınırların $\hat{C}_s \leq C_s \leq \hat{C}_s + \bar{C}_s$ şeklinde gösterilebileceğine işaret etmişlerdir. Araştırmacılar bu alt sınır ve üst sınır özelliğine dayalı üç farklı sezgisel önermişlerdir. İlk sezgisel \hat{C}_s 'nin alt sınır maliyetini en küçükler, ikinci sezgisel $\hat{C}_s + \bar{C}_s$ 'nin üst sınır maliyetini en küçükler ve son sezgisel \bar{C}_s 'nin maliyetini en küçükler ve sonuca göre bunların arasından en düşük maliyetli çözüm seçilir (Soroush ve Friendall, 1994).

2.3.2.2.1. Aylak Zamanların Yer Almadığı Modeller

Gupta ve Sen çizelgede aylak zaman olmayacağı varsayımı altında farklı teslim tarihli ve karesel ceza fonksiyonlu modeli incelemişlerdir. Gupta ve Sen bu zor problemi çözmek için bir Dal-Sınır algoritması tanımlamışlar, fakat işlemsel testleri sonucunda sınır hesaplamalarının çok güçlü olmadığını göstermişlerdir (Gupta ve Sen, 1983).

Abdul-Razaq ve Potts teslim tarihi cezası içeren aylak zamanların yer almadığı çizelgeleri dikkate almışlardır. Bir Dal-Sınır algoritması önermişler ve iyi sınırlar elde etmek için yumuşatılmış bir dinamik programlama yöntemi kullanmışlardır.

Çalışmalarında, 20'den fazla iş içeren problemlerin çok fazla çözüm süresi gerektireceğini göstermişlerdir (Abdul-Razaq ve Potts, 1988).

Valente ve Alves çalışmalarında tek makinede ağırlıklı erken ve geç tamamlanma toplamını enküçükleme problemini ele almışlardır. Aylak zaman içermeyen bu problem için filtreli ve iyileştirilmiş doğrudan arama algoritmaları sunmuşlardır. Çalışma sonucunda, iyileştirilmiş doğrudan arama algoritmalarının benzerlerinden daha üstün olduğunu kanıtlamıştır. Bu çalışmada eniyi çözümler komşuluk arama algoritması ile elde edilmiş olmasına rağmen bu yöntem işlemsel olarak yoğundur ve sadece küçük veya orta büyüklükteki örneklere uygulanabilmektedir (Valente ve Alves, 2005).

Farklı teslim tarihli E/G tamamlanma problemleri genellikle NP-tam problemlerdir. Araştırmacılar bilinen eniyi çizelgeyi bulmak için problem parçacıklarına odaklanırlar. Hendel ve Sourd çalışmalarında bir zamanlama algoritması geliştirmişlerdir. Bu zamanlama algoritması karmaşık süreçlerde kullanılabilir. Araştırmacılar bu çalışmada tek makine zamanlama problemlerinde en hızlı ve verimli olduğunu iddia ettikleri oldukça genel bir algoritma ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar ayrıca bu algoritmanın akış tipi permutasyon programlamaya adapte edilebileceğini ifade etmişlerdir (Hendel ve Sourd, 2007).

2.3.2.2.2.Aylak Zamanların Yer Aldığı Modeller

Bir iş sırası bulunduktan sonra, doğrusal bir programlama probleminin çözülmesiyle aylak zamanın yeri ayarlanarak eniyi çizelge üretilebilir (Baker, 1997).

Fry vd. farklı teslim tarihlerine ve farklı ceza değerlerine sahip işleri içeren tek makine E/G tamamlanma problemini çalışmışlardır. Araştırmacılar, ağırlıklı mutlak sapmayı enküçükleme amacıyla problemi doğrusal bir programlama modeliyle çözerek belli bir sıraya aylak zamanı yerleştiren bir algoritma geliştirmişlerdir. Ayrıca, iş sıralamasını yapan ikili yer değiştirme tekniğini ve iş pozisyonlarını belirleyen aylak zaman yerleştirme metodunu kullanarak sezgisel bir algoritma ortaya koymuşlardır (Fry vd., 1987).

Yano ve Kim ağırlıklar üzerinde sınırlandırması olan tek makine E/G tamamlanma problemini incelemiştir. Burada ağırlıkların, işlerin işlem süreleri ile oranlı olduğu varsayılır. Dal-Sınır yönteminde dikkate alınandan pek çok mümkün çözümü eleyen bazı üstünlük özelliklerini kullanan iyi bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yöntem, önce bir dinamik programlamayla belli bir sıra için işlerin eniyi zamanlamasını belirlemekte, daha sonra ise basit bir sınıflandırma yapmaktadır (Yano ve Kim, 1991).

Szwarc ve Mukhopadhyay farklı teslim tarihli tek makine E/G tamamlanma çizelgeleme probleminde belli bir sıraya aylak zaman yerleştirmek için “En Uygun Zamanlama Algoritması” sunmuşlardır. İşleri kümeler halinde gruplayan algoritma “Eğer $d_{j+1} - d_j \leq P_{j+1}$ ise j ve j+1 işleri aynı kümede olmalıdır” kuralına dayalıdır (Szwarc ve Mukhopadhyay, 1995).

2.3.2.3.Zorunlu Teslim Tarihli Problemler

Bu tip problemlerde teslim tarihlerinden ziyade zorunlu teslim tarihleri ele alınmaktadır. Teslim tarihleri geçlik maliyetini ihlal edebilirken zorunlu teslim tarihleri karşılanmak zorundadır ve ihlal edilemez. Örneğin; eğer son işin tamamlanma zamanı izin verilen en son zorunlu teslim tarihini aşarsa problemin çözümü mümkün olmaz. Bununla birlikte, sonsuz β_j 'li E/G modelleri gibi modeller ve böylece problemin çeşitli özel durumları da görülebilir (Baker, 1997).

Ahmadi ve Bagchi zorunlu teslim tarihlerini karşılama kısıtı altında toplam erkenliği enküçükleme amacını dikkate almıştır. Bu problemin, hazır olma zamanları ve ortak teslim tarihi kısıtı altında tüm işlerin toplam bekleme zamanını enküçüklemeye denk olduğunu göstermişlerdir. Problem NP-tam olduğu için bir Dal-Sınır algoritması geliştirmişlerdir. Çözüm uzayını sınırlandırmak için en son tamamlanma zamanı algoritmasına dayalı bir alt sınır prosedürü ve en kısa işlem sürelerine dayalı bir üst sınır prosedürü kullanılmıştır. Dört tane de üstünlük özelliği geliştirmişlerdir. İşlemsel testlerde Dal-Sınır algoritmasınının 40 işe kadar iyi sonuç verdiği gözlenmiştir (Ahmadi ve Bagchi, 1986).

Bagchi, hem ortak teslim tarihli hem de zorunlu teslim tarihli olan E/G tamamlanma problemini araştırmıştır. Ele aldığı modelin en büyük özelliği müşteri siparişleri

kavramıdır. İşler kümesi, her biri kendi teslim tarihine ve cezasına sahip birkaç müşterinin alt gruplarına ayrılır. Bagchi'nin bu çalışmasında "bir müşteri siparişi, siparişteki tüm birimler tamamlanana kadar sevk edilemez" varsayımı yapılmıştır. Bagchi ortak teslim tarihli bir modelin nasıl bazı büyük problemlerin bir parçası olarak ortaya çıkabildiğini göstererek, daha önceden atanmış teslim tarihlerinin bulunduğu durumlarla ilgilenmemiş fakat gelecek araştırmalar için bu problemlerin bazı ilginç uzantılarını sunmuştur (Bagchi, 1987).

2.3.2.4.Farklı Özelliklerdeki Diğer Problemler

Koulamas keyfi zaman aralıklı tek makine E/G tamamlanma problemini incelemiştir. Bu problemde tek bir makinede işlenmeyi bekleyen n tane iş vardır. Her iş deterministik bir işlem süresine (p_j) ve aralık uzunluğu $w_j=d_j-b_j$ olan bir zaman aralığına sahiptir. Her iş için zaman aralığının, işin işlem süresinden daha uzun olduğu varsayılmaktadır. Eğer bir iş kendi zaman aralığında tamamıyla işlenirse (kendi zaman aralığında işin işlenmesi başlar ve biterse) hiç ceza almaz. Diğer taraftan, eğer j işinin başlama zamanı b_j 'yi veya j işinin tamamlanma zamanı d_j 'yi geçerse ilgili sapmayla oranlı bir erkenlik ya da geçlik cezası alır. Bu doğrultuda amaç, toplam E/G cezasını enküçükleyen çizelgeyi belirlemektir (Koulamas, 1996).

Shabtay diğerlerinden farklı amaç fonksiyonlu tek makine çizelgeleme probleminde üç farklı teslim tarihi atamayı ele almıştır. İki farklı amaç fonksiyonunu hesaba katmıştır: İlki erken ve geç tamamlanmayı kapsayan maliyet fonksiyonu ve teslim tarihi atama cezaları ve ikincisi ise geciken iş sayısını ve teslim tarihi atamalarını kapsayan ceza fonksiyonudur. Shabtay çalışmasında bu amaç fonksiyonunun enküçüklenmesine yönelik metotlar geliştirmiştir (Shabtay, 2008).

Sakuraba vd. yaptığı çok güncel bir çalışmada ise iki makine akış tipi üretimde ortak teslim tarihinden ortalama mutlak sapma problemi incelenmiş ve bu probleme yönelik tamsayı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Ardından geliştirilen üç sezgisel dokuz adet sıralama kuralı monte edilerek sonuçlar alınmış ve Sarper (1995) tarafından yapılan çalışmadan daha iyi sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir. Ayrıca her bir operasyon için başlama zamanlarını hesaplayan Hendel ve Sourd (2007)'un zamanlama algoritmasından faydalanılmıştır (Sakuraba vd., 2009).

2.3.2.4.1. İlave Cezalar İçeren Modeller

Bu tip problemlerde; temel E/G tamamlanma ölçütünü genişletmek için performansın, diğer cezaların değerlendirildiği boyutları probleme ilave edilir. Böyle iki boyut, yani teslim tarihi cezası ve akış zamanı cezası, Panwalkar vd. tarafından tanımlanmıştır. Araştırmacılar ortak teslim tarihine göre ceza verilen tek makineli bir E/G tamamlanma problemi çalışmıştır. Problemleri, işlerin ceza ağırlıklarına bağımlı olduğunu varsayar. δ katsayısı, her zaman birimi için teslim tarihi atama maliyetini ve d_0 parametresi, kabul edilebilir en büyük teslim tarihini göstermek üzere amaç fonksiyonu şu şekilde yazılabilir (Panwalker vd., 1982):

$$f(d,S) = \sum_{j=1}^n [\alpha E_j + \beta T_j + \delta(d - d_0)^+] \quad (2.22)$$

Panwalkar vd. bu problemin birerleme dışında bir yöntemle çözülemeyeceğini ifade etmiştir. Tek istisna d_0 'ın sıfır olduğu özel durumdur. Bu durumda amaç fonksiyonu Eşitlik 2.22'den $f(d,S) = \sum_{j=1}^n (\alpha E_j + \beta T_j + \delta d)$ olarak yazılabilir. Bu problem için

Özellik 1, 2 ve 3 sağlanır ve Özellik 4 aşağıdaki gibi olur (Panwalker vd., 1982):

Özellik 4: Eniyi çizelgede sıradaki b . iş d 'de tamamlanır. Burada b , $n(\beta - \delta)/(\alpha + \beta)$ 'ya eşit ya da bu değerden daha büyük en küçük tamsayıdır.

Panwalkar vd. pozisyona göre ceza kavramını kullanarak problemi eniyi şekilde çözmek için bir algoritma sunmuştur. Erken işler kümesindeki işlerin pozisyona göre cezaları $\{n\delta + 0\alpha, n\delta + 1\alpha, n\delta + 2\alpha, \dots\}$ ve geciken işler kümesindeki işlerin pozisyona göre cezaları $\{\dots, 3\beta, 2\beta, 1\beta\}$ şeklinde yazılabilir. Algoritma daha uzun işlem süreli bir işi daha küçük cezalı bir pozisyona yerleştirir. Başka bir deyişle, en uzun işlem süreli iş, en soldaki pozisyona yerleştirilmelidir veya ilk olarak işlenmelidir (Panwalker vd., 1982).

Chang ve Joo işlerin değişik zamanlarda hazır olmalarına izin veren ortak teslim tarihli bir tek makine E/G tamamlanma problemini ele almışlardır. Her iş isteğe bağlı bir zamanda işlem sürecine başlayabilir, fakat iş belirlenen hazır olma zamanından önce işlenmeye başladığında başlama zamanı cezasına maruz kalır. Amaç, erkenlik, geçlik ve başlama-zamanı cezalarının toplamını enküçükleyen çizelgeyi bulmaktır. Araştırmacılar, belli bir sıra için her işin eniyi başlama zamanını belirlemek amacıyla

bir algoritma önermişlerdir. Probleme iyi bir çözüm bulmak için de eniyi başlama zamanı algoritmasının kullanıldığı bir sezgisel arama sunulmuştur (Chang ve Joo, 1992).

Panwalkar ve Rajagopalan işlerin işlem sürelerinin doğrusal bir maliyetle kontrol edilebilen değişkenler olduğu statik bir tek makine E/G tamamlanma problemini incelemişlerdir. Problemlerinde, bir işin işlem süresi normal bir değere sabitlenebilir. Bununla birlikte, ilave maliyetler ödeyerek, işlem süresini azaltmak için makine daha yüksek hızda çalıştırılabilir. j işinin işlem süresini azaltmanın birim maliyeti G_j olarak verildiğinde, x_j , sıkıştırılan j işinin gerçek zaman miktarını, j ise herhangi bir sıra, S , için j pozisyonundaki işi gösterir. Böylece problemin amaç fonksiyonu olarak $f(d,S) = \sum_{j=1}^n (\alpha E_j + \beta T_j + G_j x_j)$ eşitliğini ele almışlardır. Araştırmacılar, bir $n \times n$ maliyet matrisi oluşturarak problemin bir atama problemi olarak eniyi şekilde çözülebileceğini göstermişlerdir (Panwalkar ve Rajagopalan, 1992).

Her iş için geçlik cezasının belirlenmiş olduğunu varsayan modelin aksine, Liman vd. zamanın bir fonksiyonu olarak hem erkenlik hem de geçlik cezalarını içeren problemi çalışmışlardır. Problemlerinde, ortak teslim aralığı D , belirli bir parametredir. Birim zamandaki erkenlik cezası (α), birim zamandaki geçlik cezası (β) ve teslim aralığının konum cezasının (δ) sabit olduğu varsayılır. Amaç, erkenlik, geçlik ve ortak teslim aralığı konum cezalarının ağırlıklı toplamını enküçükleyen iş çizelgesini ve ortak teslim aralığı konumunu belirlemektir. Araştırmacılar, problemin özelliklerini araştırmış ve problemi eniyi şekilde çözebilmek için polinom zamanlı bir algoritma önermiştir. Basit çözümlerden elde edilebilen iki durumu da dikkate almışlardır. Birincisi $\delta \geq \beta$ olma durumudur. Bu durumda, teslim aralığının konumu ve eniyi çizelge, $d_1=0$, $d_2=D$ alınmasıyla ve işlerin, işlem sürelerinin artan sırasına göre dizilmesiyle belirlenebilir. İkincisi $(\beta + \alpha)/(\delta + \alpha) \geq 0$ olma durumudur. Teslim aralığının konumu ve eniyi çizelge $d_2 = \sum_{j=1}^n p_j$ ve $d_1=d_2-D$ alınmasıyla ve işlerin, işlem sürelerinin azalan sırasına göre dizilmesiyle belirlenebilir (Liman vd., 1996).

Ventura vd. kaynağa-bağımlı geliş tarihleri ve kısıtlandırılmamış ortak teslim tarihli bir tek makine E/G tamamlanma problemini çalışmışlardır. Bir işin kaynak tüketimi

maliyetinin, işin geliş tarihinin azalan bir doğrusal fonksiyonu olduğu ve bu fonksiyonun tüm işler için ortak olduğu varsayılmıştır. Amaç, toplam kaynak tüketimi ile erkenlik ve geçlik cezalarını enküçükleyen çizelgeyi ve işlerin geliş tarihlerini bulmaktır. Problemin NP-zor olduğu gösterilmiştir. Küçük ve orta büyüklükteki problemler için bir dinamik programlama modeli geliştirilmiştir. Büyük boyutlu problemler için de bir sezgisel algoritma önerilmiş ve sezgisel ile eniyi çözümler arasındaki işlemsel karşılaştırma değerlendirilmiştir. Eniyi çözümlerin yapısını karakterize etmek ya da önerilen sezgisel algoritma ile gelişmiş çözümleri bulmak için bazı özellikler gösterilmiştir. Eniyi çözümü bulma garantisi olmamasına rağmen önerilen sezgisel algoritmanın yüksek kalitede çözümler sağlayabildiği gösterilmiştir (Ventura vd., 2005).

2.3.2.4.2. Hazırlık Süreleri İçeren Modeller

E/G tamamlanma literatürünün çoğunda makinenin, işleri işlemek üzere daima hazır olduğu ve hazırlığa ihtiyaç duymadığı varsayılır. Bazı durumlarda ise hazırlık süresi işlem süresinin içinde yer alır. İkinci durum ilkinden çok farklı değildir, çünkü her iki durumda da makinenin, işlerin sırasına bakılmaksızın yani sıradan-bağımsız aynı hazırlık süresini gerektirdiği varsayılmıştır. Bununla birlikte, pek çok gerçek durumda hazırlık süreleri, işlenecek olan iş kadar son işlenen işin tipine de bağlıdır, yani sıraya-bağımlıdır (Baker, 1997; Toksarı, 2008). Genel olarak, sıraya-bağımlı hazırlık süreleri içeren çizelgeleme problemleri NP-zor olan “Gezgin Satıcı Problemine” benzerdir (French, 1982). Allahverdi vd. hazırlık süreleri içeren çizelgeleme literatürünü incelemiştir. Makalelerinde literatürü iki kategoriye ayırmışlardır: Yığın ve yığın-olmayan problemler. Kategorilerin her birinde araştırmacılar, hazırlık süreleri literatürünü sıraya-bağımlı ve sıradan-bağımsız olmak üzere iki bölümde sınıflandırmıştır (Allahverdi vd., 1999).

Keyser ve Sarper hazırlık zamanlarının sıfır olmadığı ve işlem öncesi bekleme süresi için cezaların olduğu tek makine E/G tamamlanma problemini incelemişlerdir. Araştırmacılar, “ilk gelen ilk işlem görür” öncelik fonksiyonu ve en küçük gevşeklik sıralama kurallarını kullanmışlar ve bitişik ikilileri yer değiştirme (API) yöntemini kullanan bir algoritma geliştirmişlerdir. Algoritmada her sıralama kuralı ile birlikte işlerin başlama zamanını belirlemek için iki metot uygulamışlardır. Bunlardan ilki

işleri mümkün olduğunca kısa sürede çizelgelerken, ikincisi işleri hedef başlama zamanı ile çizelgeler. Algoritmanın sonunda üç sıralama kuralıyla bulunan maliyetler birbirleriyle karşılaştırılır ve en düşük maliyetli çizelge seçilir (Keyser ve Sarper, 1991).

Coleman tek makinede n işin çizelgelenmesi için 0/1 tamsayılı programlama modeli sunmuştur. Amaç, yığın-olmayan sıraya-bağımlı hazırlık süreleri söz konusu olduğunda ağırlıklı erkenlik ve geçliği enküçükmektir. İşe-bağımlı cezalar varsayılmıştır ve teslim tarihleri farklı olarak verilmiştir. Coleman tamsayılı programını test etmiş ve 8 işe kadarki problem örnekleri için eniyi çözümleri bulmuştur. İşlerin sayısı arttığında tamsayılı programın yüksek işlem zamanı gerektirme sorunu ortaya çıkmıştır. Coleman'ın çalışması küçük sayıdaki işler için sıraya-bağımlı hazırlık sürelerini içeren E/G tamamlanma problemiyle ilgili birkaç makaleden biridir (Coleman, 1992).

Chen yığın sıraya-bağımlı hazırlık süreleri içeren E/G tamamlanma problemini ele almış ve iki bölümde inceleme yapmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde, her bir iş yığını belli bir ortak teslim tarihi ve eşit olmayan cezalara sahip bir problemi ele almıştır. Sadece iki iş yığını olması ve iki teslim tarihinin kısıtlandırılmamış derecede büyük olması durumunda problemin NP-zor olduğunu göstermiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde teslim tarihlerinin karar değişkenleri olarak alınması dışında aynı problem ele alınmıştır. Araştırmacı, problem için bazı eniyileyici özellikler sunmuş ve iki yığın işli problemi çözmek için bir polinom dinamik programlama algoritması önermiştir. Ayrıca farklı yığınlar için ortak teslim tarihleri eşit olduğunda her iki problemin özel bir durumunu dikkate almıştır. Özel durum için her iki problemi çözmek amacıyla bir dinamik programlama algoritması oluşturmuştur (Chen, 1997).

Schaller ve Gupta makalelerinde işlerin sayısı verilen tek makinede hazırlık zamanı var olduğunda toplam E/G tamamlanmanın enküçüklenmesi problemini incelemişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmalarında eniyi Dal-Sınır algoritması önermişlerdir. Ayrıca daha geniş boyutlu problemlerin çözümünde kullanılabilecek bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Araştırmacılar önerdikleri algoritmaları ampirik olarak çeşitli boyut ve parametrelerdeki problemler üzerinde değerlendirilmişlerdir. Bu çalışmada ayrıca yalın üretim metotları uygulaması sonucunda hazırlık

sürelerindeki azalmanın toplam E/G tamamlanmayı nasıl etkileyeceğini de incelenmişlerdir (Schaller ve Gupta, 2008).

2.3.2.4.3.Paralel Makineli Modeller

Kısıtlandırılmamış durumun temel analizi paralel makineleri içeren modellere genişletilmiştir. Sundararaghavan ve Ahmed (1984), Hall (1986) ve Emmons (1987) çalışmalarında paralel çalışan m özdeş makineli sistemde toplam mutlak sapmanın en küçüklenmesi konusunu ele almışlardır (Toksarı, 2008).

Sundararaghavan ve Ahmed, Kanet (1981b)'in çalışmasını m-paralel özdeş makineye genişletmiştir. Problemlerinde kısıtlandırılmamış ortak teslim tarihi ele alınmıştır. Eniyi çözümü veren iki-adımlı bir algoritma geliştirmişlerdir. İlk adım, makinelerin m alt kümelerindeki işlerin kümesi için eniyi bölmeyi bulmaktır. İkinci adım, Kanet (1981b)'in algoritmasını kullanarak her bir makinedeki işlerin çizelgesini belirlemektir. İlk işin sıfır zamanında başlamak zorunda olduğu varsayımına dayalı olarak, araştırmacılar kısıtlandırılmış ortak teslim tarihli tek makine problemini çözmek için bir de sezgisel sunmuşlardır (Sundararaghavan ve Ahmed, 1984).

Emmons farklı erkenlik ve geçlik cezaları için bu analizi genişletmiştir. Ek olarak, özdeş olmayan paralel işlemcileri ele almıştır. Çoklu makine yöntemi, en kısıdan en uzuna katsayıların ve işlem sürelerinin eşlenmesini uygulayarak bu duruma kolaylıkla adapte edilmiştir. Emmons ayrıca, eniyi sonuçlar için son işin tamamlanma zamanının en küçüklenmesi veya en küçük teslim tarihinin elde edilmesi gibi ikincil ölçütleri ele almış ve özel durumlar için çözümler sağlamıştır (Emmons, 1987).

Panwalkar vd. (1982) tarafından incelenen problem, Cheng tarafından paralel makine durumuna genişletilmiştir. Amacı, erkenlik, geçlik ve teslim tarihi cezalarını enküçükleyen m paralel makinedeki çizelgeyi belirlemektir. Paralel makineli sistemler için eniyi teslim tarihinin sıraya bağımlı olduğunu göstermiş ve problemi çözmek için bir sezgisel incelenmiştir. Bu sezgisel, paralel makineleri sanki m bağımsız tek makineymiş gibi dikkate alan bir yapıda olmuştur. Bu yaklaşımda işler, Panwalkar vd. (1982) çalışmasına benzer şekilde pozisyona göre ceza kavramını kullanarak atanmıştır (Cheng, 1989).

Adamopoulos ve Pappis ortak teslim tarihi altında m paralel bağlantısız makinedeki n bağımsız işin çizelgelendiği problemi çalışmıştır. Modelde, teslim tarihi karar değişkenidir. Hem erkenlik hem de geçlik cezaları işlerden bağımsızdır. Her iş makineden makineye değişen bir işlem süresi gerektirir. i makinesindeki j işinin erkenliği ve geçliği E_{ij} ve T_{ij} şeklinde alınırsa, ele aldıkları problem $f(d,S) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\delta d + \alpha E_{ij} + \beta T_{ij})$ amaç fonksiyonunu enküçükleyen eniyi ortak teslim tarihini ve m makine üzerindeki n işin çizelgesini belirlemektir. Algoritma dört farklı safhaya bölünebilir. Birinci safha m makineye n işin tahsis edilmesi problemini ele alır. Çatışan iki ölçüt dikkate alınır. İlki, her işin, işlem süresinin mümkün olduğunca küçük olduğu bir makineye atanmasıdır. İkincisi, farklı makinelerdeki en büyük akış zamanları arasındaki geniş farklılıklardan kaçınmaktır. İkinci safha bir makine üzerindeki n kümesinin sırasını belirlemek amacıyla araştırmacı tarafından sunulan pozisyon etiketi kavramını kullanarak işleri pozisyonlarına tahsis etmektir. Üçüncü safhada, her makinedeki işlemin başlama zamanıyla birlikte bir ortak teslim tarihi belirlenir. Son safha olarak, çizelgeden elde edilen amaç fonksiyonu hesaplanır (Adamopoulos ve Pappis, 1998).

Biskup ve Cheng erkenlik, geçlik ve tamamlanma zamanı cezalarından oluşan amaç fonksiyonunu enküçüklemek amacıyla m paralel özdeş makine üzerinde n işin çizelgelenmesi problemini çalışmışlardır. Problemden karar değişkeni olarak kısıtlandırılmamış ortak teslim tarihi alınmış ve araştırmacılar problemin NP-zor olduğunu kanıtlamışlardır. Problemi çözmek için bir sezgisel sunulmuştur. Sezgisel, makineye düzgün bir şekilde işlerin atanmasıyla başlar. Düzgün bir şekilde işlerin atanmasıyla mümkün olduğunca çok iş yükü eş zamanlı olarak dengelenmeye çalışılır. m tane en büyük iş makinelerine her atandığında, tüm makinelerin iş yükü hesaplanır ve en uzun iş, en küçük iş yüklü makineye atanır. İşleri makinelere atadıktan sonra, m -tek makine problem bağımsız olarak çözülür. m -tek makine probleminin çözümüyle farklı makineler için farklı teslim tarihleri elde etmek olasıdır. Bu nedenle, sezgiselin son adımında, her makinenin ilk işinin başlama zamanı ve ortak teslim tarihi, bir doğrusal programlama probleminin çözülmesiyle eş zamanlı olarak hesaplanır (Biskup ve Cheng, 1999).

Panwalkar ve Liman makine çalıştırma maliyeti olan, tek operasyonlu E/G tamamlanma çizelgeleme problemini ele almıştır. Problemlerinde, sıfır zamanında işlenmeyi bekleyen n iş vardır. İşin yapılması için çalıştırılmaya hazır çok sayıda özdeş makine vardır. Çalıştırılan her makine belirli bir makine çalıştırma maliyeti, x , meydana getirir. Bir makinede çizelgelenmiş işler için, makineden makineye değişen bir ortak teslim tarihi vardır. k , ($1 \leq k \leq n$) kullanılan özdeş makinelerin sayısını, B_i , i makinesinde işlenecek bir yığına giren işlerin kümesini gösterir ve d teslim tarihlerinin (d_1, d_2, \dots, d_k) kümesidir. Amaç çizelgeyi, S , bulmaktır. Kullanılan makinelerin sayısı k ve her makinenin ortak teslim tarihi d olmak üzere $f(S, k, d) = kx + \sum_{i=1}^k \sum_{j \in B_i} (\alpha E_j + \beta T_j)$ fonksiyonunu enküçükleyen d_i , B_i yığınının teslim tarihidir. Araştırmacılar tarafından sunulan problemin çözümü için k makinesine pozisyona göre ceza kavramı uygulanmıştır. Her makine aynı pozisyona göre ceza modeline sahiptir. Buna göre teslim tarihinden önce $\{0, 1\alpha, 2\alpha, 3\alpha, \dots\}$ ve teslim tarihinden sonra $\{\dots, 3\beta, 2\beta, 1\beta\}$ modelleri kullanılır. Makalede önerilen algoritmada $k=1$ olarak belirlenir, pozisyona göre ceza hesaplanır, işlerin pozisyona göre aldıkları cezaları sıralanır ve toplam maliyet hesaplanır. Böylece, k 'nın değeri her iterasyonda bir artacak ve hesaplama tekrar yapılacaktır. Algoritma k ve $k-1$ makinelerinin toplam maliyetlerinin farkı en fazla δ 'ya eşit oluncaya kadar tekrarlanır. En uygun makine sayısı $k-1$ 'dir (Panwalkar ve Liman, 2002).

Sun ve Wang çalışmalarında ortak teslim tarihli, erken ve geç tamamlanma cezaları orantılı olan m paralel özdeş makine üzerinde n işin çizelgelenmesi problemini çalışmışlardır. Araştırmacılar problemin NP-zor olduğunu göstermişler ve problemi çözmek için bir dinamik programlama algoritması önermişlerdir. Ayrıca bu çalışmalarında iki sezgisel önermişlerdir (Sun ve Wang, 2003).

Toksarı ve Güner çalışmalarında “sıra bağımlı” ve “zamana bağlı” öğrenme, “doğrusal” ve “doğrusal olmayan” bozulma etkileri altında, paralel makineli, ortak teslim tarihli E/G tamamlanma problemini ele almışlar ve belli uygun koşullar altında V-biçimli çizelgenin eniyi çözüm olacağını göstermişlerdir. Ayrıca bu problem için eniyi sonuçları veren bir matematiksel model tasarlamışlar ve geliştirdikleri bir algoritmayı, 1000 iş 3 dakika ortalamalı 4 paralel makine için

çözümler olarak, geliştirilen matematiksel modelin sonuçlarıyla bu algoritmanın performansını test etmişlerdir (Toksarı ve Güner, 2009; 2010).

2.3.3.Çizelgeleme Problemlerinin Zorluğu ve Literatürün Değerlendirilmesi

Çizelgeleme problemlerinde alternatifler arasından eniyisini bulmanın zorluk derecesi çok yüksektir. Örneğin: Dünyanın en hızlı bilgisayarının saniyede $136.8 \cdot 10^{12}$ işlem yapıyor olduğu varsayılarak, çeşitli problemler için aşağıda işlem süreleri hesaplanmıştır (İşler vd., 2009c);

- Tek makine 20 iş için alternatif sıralama miktarı: $20! = 2.43 \cdot 10^{18} s \approx 5$ gün
- İki makine 20 iş için alternatif sıralama miktarı: $(20!)^2 = (2.43 \cdot 10^{18})^2 s \approx 25$ gün
- Tek makine 100 iş için sıralama miktarı: $100! = 9.33 \cdot 10^{157} s \approx 2.16 \cdot 10^{136}$ yıl.

Erken/Geç tamamlanma problemlerinin öğrenme etkisiz ve tek makinede dahi NP-zor zorluk derecesine sahip olduğu Hall vd. (1991), Lee vd. (1991), Sarper (1995), Biskup ve Cheng (1999), Mondal ve Sen (2001), Feldman ve Biskup (2003), Celso vd. (2005), Rym (2007) ve Liao ve Cheng (2007) gibi birçok yayında ifade edilmiştir. Ayrıca Hendel ve Sourd (2007) araştırmalarında farklı teslim tarihli E/G tamamlanma problemlerinin NP-tam zorluk derecesine sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Literatür incelendiğinde çizelgelemede E/G tamamlanma problemleri ile ilgili çalışmaların başlangıçlı öğrenme etkili çalışmalardan daha öncedir. Çizelgelemede öğrenme etkisinin 1999'da Biskup tarafından yapılan çalışmanın ardından yoğunluk kazandığı görülmüştür. Literatürde, öğrenme etkisi ve E/G tamamlanma problemi bir arada Biskup (1999); Mosheiov (2001a); Mosheiov ve Sidney (2003); Biskup ve Simons (2004); Kuo ve Yang (2007); Toksarı ve Güner (2009 ve 2010); İşler vd. (2009a ve 2009b)'nin çalışmalarıyla farklı şekillerde ele alınmıştır.

Bu çalışmada ele alınan problem literatür açısından (öğrenme etkisi ve E/G tamamlanmanın çizelgelemede uygulanması) incelenerek, literatürde henüz ele alınmamış “öğrenme etkili iki makineli akış tipi çizelgelemede ortak teslim tarihinden sapmaların enküçüklenmesi” problemi için literatüre uygun yaklaşımlarla çözümler elde edilmiştir.

3.ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1.PROBLEMİN VARSAYIMLARI, NOTASYONU VE FORMÜLASYONU

Atölyeye gelen n iş sıfıncı zamanda işleme hazırdır. Bu işler önce birinci makinede sonra ikinci makinede işlem görecektir. P_{ik} ; i işinin j sırasında k makinesindeki işlem zamanını göstermektedir ($i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, n$; $k=1,2$). Yani bu iş çizelgede birinci sırada çizelgelenirse i işinin işlem zamanıdır (hangi makinede olursa olsun). Daha önce de açıklandığı gibi bir işin işlem zamanı sıradaki pozisyonun bir fonksiyonu olarak azalır. Biskup (1999) vb. çalışmalarda kullanıldığı gibi klasik konum esaslı öğrenme etkisi yaklaşımı, i işinin k makinesindeki gerçekleşen işlem zamanı eğer j . pozisyonda çizelgelenmiş ise $P_{ij} = P_i j^a$ olarak etkileneceğini ifade eder (Biskup, 2008). Burada $a \leq 0$ olan sabit bir öğrenme indeksidir. İncelenen amaç, ortak teslim tarihinden ağırlıklı mutlak sapmaların toplamının (farklı erken/geç tamamlanma cezaları toplamının) enküçüklenmesidir. Buna göre problem $n/2/P_{ij} = P_i j^a$, $d = d_i / \sum_{j=1}^n (\alpha E_j + \beta T_j)$ şeklinde gösterilebilir. Burada n iş sayısını, 2 makine sayısını, $P_{ij} = P_i j^a$ öğrenme etkisinin şeklini, $d=d_i$ problemin ortak teslim tarihli olduğunu, $\sum_{j=1}^n (\alpha E_j + \beta T_j)$ toplam ağırlıklı erken/geç tamamlanmayı enküçükleyen amaç fonksiyonunu ifade etmektedir.

Çalışmada kullanılan diğer varsayımlar şöyledir:

- ◆ Makine hazırlık zamanları önceden bilinmekte olup işlem zamanına dâhil edilmiştir.
- ◆ İş kesintisine izin verilmeyip başlanan iş makinede tamamlanmadan başka bir iş başlayamaz.
- ◆ Makinelerin çizelgeleme periyodu süresince sürekli çalıştığı varsayılmaktadır.
- ◆ Ayrıca bir makinede aynı anda tek iş yapılabilir.
- ◆ İki makine arasında sınırsız ara stok tutulabilmektedir.
- ◆ Ortak teslim tarihi d işlerin işlem sürelerinin bir fonksiyonudur.

$$(d = [\sum_{i=1}^n (P_{i1} + P_{i2})] * h ; h: kısıtlayıcı faktör.)$$

Modelde kullanılan parametreler ve değişkenler aşağıda verilmektedir:

Parametreler

n: Çizelgelenecek iş sayısı

d: Ortak teslim tarihi

P_{ik} : i işinin k makinesindeki işlem zamanı

α : İşlerin erken tamamlanma cezası

β : İşlerin geç tamamlanma cezası

LR: Öğrenme oranı (%80 öğrenme eğrisi için $LR=0.8$ 'dir ve LR küçüldükçe öğrenme etkisi artar.)

$a=\log(LR)/\log(2)$ (Öğrenme indeksi)

Değişkenler

x_{ij} : Eğer i işi j. pozisyona atanırsa 1, aksi takdirde 0

C_{j1} : 1. makinede j. pozisyondaki işin tamamlanma zamanı

C_{j2} : 2. makinede j. pozisyondaki işin tamamlanma zamanı

E_j : j. pozisyondaki işin erken tamamlanma zamanı

T_j : j. pozisyondaki işin geç tamamlanma zamanı

I_{jk} : Pozisyon j ile j+1 arasında k makinesinin aylak zamanı

W_{j2} : Pozisyon j'deki işin iki makine arasında bekleme zamanı

3.1.1. Tamsayı Programlama Modeli

İki makineli akış tipi çizelgeleme probleminin öğrenme etkisini dikkate alan ve toplam ağırlıklı erken/geç bitirme cezalarını enküçükleyen model aşağıda verilmiştir. Bu model Sakuraba vd. (2009) çalışmasından faydalanılarak hazırlanmıştır (İşler vd., 2009a).

Model

Amaç Fonksiyonu:

$$\min \sum_{j=1}^n (\alpha E_j + \beta T_j) \quad (3.1)$$

Kısıtlar:

$$C_{j,2} = d - E_j + T_j \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

$$C_{1,1} = \sum_{i=1}^n (P_{i,1} * x_{i,j}) + I_{1,1} \quad \text{ve} \quad C_{1,2} = C_{1,1} + \sum_{i=1}^n (P_{i,2} * x_{i,j}) + I_{1,2} \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.3)$$

$$C_{j,1} = C_{j-1,1} + I_{j,1} + \sum_{i=1}^n (P_{i,1} * x_{i,j} * j^a) \quad (3.4)$$

$$C_{j,2} = \max\{C_{j-1,2}, C_{j,1}\} + I_{j,2} + \sum_{i=1}^n (P_{i,2} * x_{i,j} * j^a) \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.5)$$

$$I_{j,1} + \sum_{i=1}^n [P_{i,1} * x_{i,j+1} * (j+1)^a] + W_{j+1,2} = W_{j,2} + \sum_{i=1}^n (P_{i,2} * x_{i,j} * j^a) + I_{j,2} \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1 \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3.7)$$

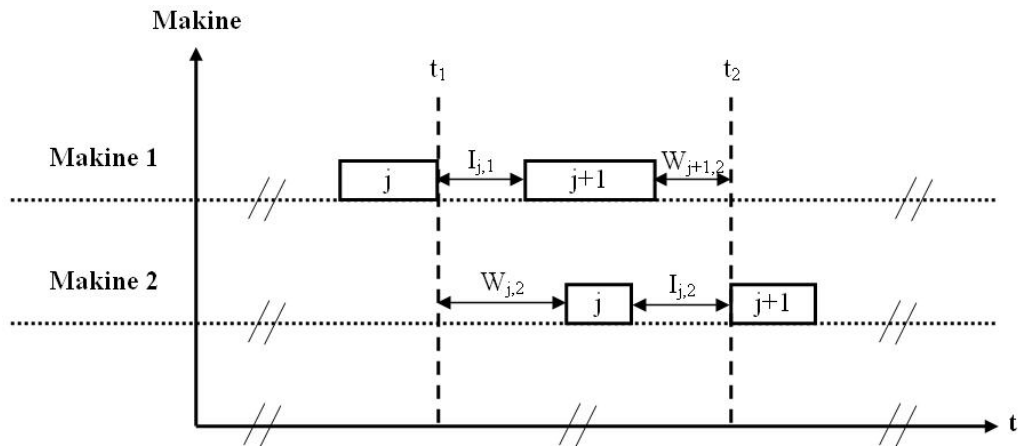
$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} = 1 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3.8)$$

$$I_{j,k} \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n; k=1, 2$$

$$W_{j,2} \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n$$

$$E_j, T_j \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$$



Şekil 3.1. Kısıt 3.6'nın grafik gösterimi (Sakuraba vd., 2009; İşler vd., 2009)

Amaç fonksiyonu (3.1) ortak teslim tarihinden sapma cezalarının enküçüklenmesini ifade etmektedir. Kısıtlardan ilki (3.2) işlerin erken ve geç tamamlanma değerlerini hesaplar. İkinci kısıt fonksiyonu (3.3) ilk sırada çizelgelenen işin birinci ve ikinci makinede tamamlanma zamanları olup özellikle problemlerin kısıtlandırılmış versiyonlarında ihtiyaç duyulmaktadır. (3.4)'teki kısıt işlerin birinci makinede tamamlanma zamanlarını hesaplar. (3.5)'deki kısıt işlerin ikinci makinede tamamlanma zamanlarını (permutasyon akış tipi) hesaplar. (3.6) kısıtı değişkenlere yönelik problemin fiziksel kısıtlarını ifade etmektedir. Bu fiziksel kısıtı daha iyi anlamak için Şekil 3.1 incelenebilir. Bu şekil t_1 (j . işin makine 1'deki tamamlanma

zamanı) ve t_2 ($j+1$ pozisyonundaki işin makine 2'de başlama zamanı) arasındaki aylak, bekleme ve işlem süreleri arasındaki ilişkiyi gösteren Gantt şemasıdır. (3.7) ve (3.8) kısıtları her bir pozisyona sadece bir işin atanmasını sağlar. Diğer kısıtlar değişkenler için pozitif değer almayı ve x_{ij} için 0,1 değerlerinden birini almayı sağlarlar.

Örnek

Önerilen matematiksel model 6 işli 2 makineli akış tipi bir problem için denenmiştir. İşlerin makinelerdeki işlem zamanları aşağıdaki gibidir. Bu verilerin yanı sıra örnekte diğer veriler; erken tamamlanma ceza katsayısı $\alpha=2$, geç tamamlanma ceza katsayısı $\beta=3$, öğrenme eğrisi parametresi $LR=0.8$, buna bağlı olarak $a=-0.322$ ve ortak teslim tarihi belirleme katsayısı $h=0.4$ alındığında $d=27.2$ olarak kullanılmıştır. Bütün bu veriler kullanılarak ortak teslim tarihinden sapmaların toplamının enküçüklenmesi hedeflenecektir.

i	P_{i1}	P_{i2}
1	7	6
2	3	4
3	7	9
4	4	8
5	5	1
6	6	8

Problem önerilen model kullanılarak öğrenme etkisi dikkate alındığında ortak teslim tarihinden sapmaların toplamı 3-6-1-5-2-4 sıralaması ile $\sum(\alpha E_j + \beta T_j) = 61.42404$ şeklinde mutlak eniyi olarak çözülmüştür. Problem öğrenme etkisiz düşünüldüğünde ise ortak teslim tarihinden sapmaların toplamı 4-3-1-5-2-6 sıralaması ile $\sum(\alpha E_j + \beta T_j) = 98.40$ şeklinde mutlak eniyi olarak çözülmüştür.

3.1.2. Sezgisel Yaklaşımlar

Küçük boyutlu problemler Dal-Sınır, Dinamik Programlama ve Tamsayı Programlama gibi çözüm yaklaşımları ile eniyi olarak çözülebilir. Çoğu çizelgeleme problemi NP-zor tipindedir. Bazı endüstrilerdeki gerçek problemler daha büyük boyutlu problemler olabilmektedir. Araştırmacılar bu problemleri etkin ve kısa süre çözebilmek amacıyla sezgisel yaklaşımlar geliştirmişlerdir (Eren ve Güner, 2007).

3.1.2.1.Çizelge Başlangıç Zamanı Belirleme Algoritması (ÇBZBA)

Yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği gibi “Öğrenme Etkisi” aynı veya benzer işlerin tekrarlanmasıyla üretim sürecinde işlerin tekrar sayısı nispetinde daha kısa sürede yapılmasını ifade eden etkidir. Yine bilindiği üzere ortak teslim tarihi (d) normal işlem zamanları ve kısıtlayıcı faktöre (h) bağlı olarak hesaplanır. Öğrenme etkisi, normal işlem süreleri ve iş sayısı kısıtlayıcı faktörün etkinliğini etkiler. Yani öğrenme etkisi, normal işlem süreleri ve iş sayısına bağlı olarak kısıtlayıcı faktörle çizelge kısıtlandırılmayabilir. Bu durumda toplam erken/geç tamamlanma cezalarının enküçüklenmesi için çizelge başlangıç zamanı geciktirilebilir. Bu sezgisel yaklaşımlarda kullanılmak üzere geliştirilen algoritma toplam erken/geç tamamlanma cezalarının enküçüklemek için sezgisel olarak çizelge başlangıç zamanı belirler:

1. toplam _ islem _ zamani = $\sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^n P_{ik}$ k=1,2 and i=1,2,...n

2. ortalama _ islem _ zamani = (toplam _ islem _ zamani) / n

3. toplam _ ogrenme _ indeksi = $\sum_{j=1}^n j^a$ j=1,2,...n

4. varsayim _ C_{max} = ortalama _ islem _ zamani * toplam _ ogrenme _ indeksi

5. V _ bicim _ indeksi = $\begin{cases} \alpha \leq \beta \rightarrow [\alpha / (\alpha + \beta)] \\ \alpha > \beta \rightarrow [\beta / (\alpha + \beta)] \end{cases}$

6. geciktirme _ zamani = d - (varsayim _ C_{max} * V _ bicim _ indeksi)

7. cizelge _ baslangic _ zamani = $\begin{cases} geciktirme_zamani \geq 0 \rightarrow cizelge_baslangic_zamani = geciktirme_zamani \\ geciktirme_zamani < 0 \rightarrow cizelge_baslangic_zamani = 0 \end{cases}$

3.1.2.2.Genetik Algoritma

Genetik Algoritmalar (GA), doğal seçim ve doğal genetik mekanizması temeline dayanan arama algoritmalarıdır. Holland ve meslektaşları tarafından 1960’lı yıllarda Michigan Üniversitesinde geliştirilmiş olan GA’nın teorik ve sistematik yapısı Holland (1975)’in “Adaptation in Natural and Artificial Systems” isimli kitabında sunulmuştur. Yöneylem araştırması açısından bakıldığı zaman GA, rassal arama işleminin zeki olarak kullanımı şeklinde ifade edilebilir. Literatürde çözüm uzayının rassal olarak örneklenmesi yoluyla elde edilen bilgileri kullanarak problemlerin çözülmesi yönünde birçok çalışma bulunmasına rağmen, birçok problem tipi için GA

yaklaşımı bu yöntemlerden daha esnek ve genel bir yapı sunar (Goldberg, 1989; Reeves, 1995; Kellegöz, 2006).

Başlangıçta sürekli olmayan eniyileme problemlerine uygulanan GA, sonraları gezgin satıcı, yerleşim çizelgeleme gibi problemlere başarıyla uygulanmıştır. Genetik algoritmayı diğer arama ve eniyileme yöntemlerinden farklı kılan özellikler şunlardır (Goldberg, 1989; Biroğul, 2005):

1-GA parametre kodlarıyla ilgilenir, parametrelerin kendileri ile doğrudan ilgilenmez.

2-GA tek bir nokta yerine popülasyonun büyüklüğü kadar noktadan arama yapar.

3-GA ne yaptığını değil nasıl yaptığını bilir. Yani amaç fonksiyonu bilgisini kullanır, önceden elde edilmiş veya başka bir yardımcı bilgiyi kullanmazlar.

4-GA algoritmasında kullanılan operatörler, genelde rassallık esasına dayanır.

GA'da kullanılan operatörler şunlardır (Goldberg, 1989; Biroğul, 2005):

1- Parametre kodlama operatörü (Başlangıç popülasyonu oluşturma)

2- Üreme operatörü (Çaprazlanacak bireylerin seçimi)

3- Çaprazlama operatörü (Bireylerin genlerini taşıyan yavruların oluşumu)

4- Mutasyon operatörü (Oluşan yavruların genlerinin değişime uğraması)

Başlangıç Popülasyonu Oluşturma

Genetik algoritmalar, problem çözmeye popülasyonun büyüklüğü kadar noktadan başladığından ilk olarak bir başlangıç popülasyonu oluşturulmalıdır. Başlangıç popülasyonu oluşturulurken, popülasyonun boyutu kadar birbirinden farklı bireyler oluşturulur. Tamamen rastgele atamalarla başlangıç çözümleri oluşturulması yerine tanımlanan kısıtlamaların bir kısmına dikkat edilerek daha iyi adaylar oluşturulmasının araştırma işleminde zaman kazandırdığı görülmüştür. Ancak başlangıç popülasyonunda uygunluk bakımından kötü bireyler de bulunursa çeşitlilik sağlanır ve bölgesel bir eniyi değerinde takılma ihtimali azalır (Goldberg, 1989; Gülcü, 2006).

Uygunluk Değeri

Uygunluk değerinin hesaplanması, bir çözümün, tanımlanan sert ve yumşak kısıtlamalara uyup uymamasına göre alacağı değeri hesaplayan bir fonksiyon

kullanarak yapılır. Populasyondaki her bir bireyin çözümü, bu fonksiyon ile incelenerek her bir bireyin taşıdığı çözüm hakkında bilgi sahibi olunur ve o populasyondaki eniyi birey bulunur. Her bir jenerasyonda elde edilen eniyi çözüm kaybedilmemeli, sonraki jenerasyondaki eniyi çözümle karşılaştırılmak üzere saklanmalıdır. Yeni jenerasyonlar üretildikçe, elde edilen çözümler arasındaki kalite farkı başlangıç çözümüne göre daha az olacağından uygunluk değerinin hesaplanması işlemi hassas olmalıdır (Goldberg, 1989; Gülcü, 2006).

Üreme (Seçim) Operatörü

Üreme ya da seçim işlemi, bir sonraki jenerasyondaki bireyleri oluşturacak ebeveynlerin belirlenmesidir. En çok uygulanan seçme tekniği olan rulet tekeri seçme tekniği gibi tekniklerde, uygunluk değeri yüksek olan bireylerin sonraki nesile aktarılma olasılıkları daha yüksek olsa da seçme işlemi, daha düşük değerli bireylerin de seçilmesine olanak sağlayacak şekilde dengeli olmalıdır. Aksi takdirde populasyon tamameniyi bireylerle dolabilir ve sonraki iterasyonlarda erken yakınsamayı önleyecek farklılıklar kaybolabilir. Bununla birlikte içinde, uygunluk değeri düşük çok sayıda birey bulunan bir populasyonun ilerlemesi çok yavaş olabilir. Üreme operatörünün uygulanması için kullanılan birçok metod mevcuttur. Bu metodlardan en çok kullanılanı rulet tekerleği (roulette wheel) metodudur.

Aşağıda bu metodlardan bazıları kısaca açıklanmıştır (Goldberg, 1989; Mitchell, 2002; Gülcü, 2006):

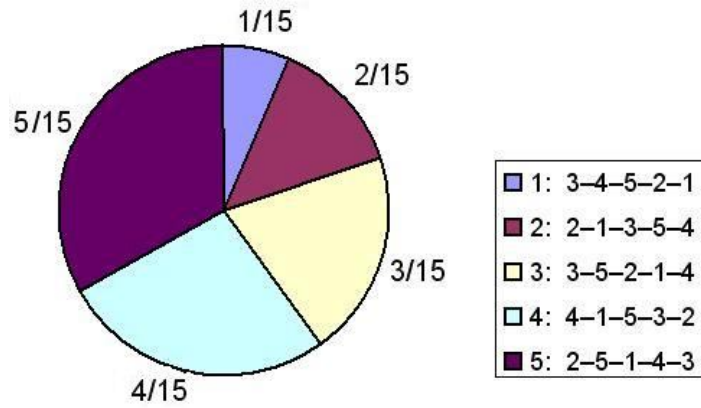
Rulet Tekerli Seçme Tekniği: Monte Carlo seçimi de denen bu teknik, uygunluk değeri ile orantılı olan bir seçme tekniğidir. Populasyondaki her bir bireye ilk bireyden başlanarak sırayla, uygunluk değerine göre daireden bir dilim verilir. Tekerlek populasyondaki birey sayısı kadar çevrilir. Her bir çevirme işleminde tekerleğin işaretçisi altındaki birey sonraki populasyonu oluşturacak ebeveyn olmak üzere ebeveyn havuzuna koyulur.

Sigma Ölçekleme (Sigma Scaling): Rulet seçme yöntemi ile algoritmanın erken yakınsamasını engellemek üzere geliştirilmiş bir methodur. Sigma ölçekleme işleminde bir bireyin seçilme şansı; uygunluk değeri, populasyonun ortalama uygunluk değeri ve populasyonun standart sapmasıyla orantılıdır.

Elitizm: Elitizm, algoritmanın her bir jenerasyonda eniyi bireyleri tutmasıdır. Bu bireyler seçilmeyerek kaybedilebilir ya da çaprazlama ya da mutasyon işlemleriyle değiştirilebilirler. Araştırmalar elitizmin genetik algoritmaların performansını önemli derecede geliştirdiğini göstermiştir.

Sıralı Seçim Tekniği: Amacı, erken yakınsamayı önlemek olan metodlardan birisidir. Bu metodda, popülasyondaki bireyler uygunluk değerlerine göre sıralanırlar. Bir bireyin seçilme sayısı, o bireyin uygunluk değerinden çok bireyin sırasına bağlıdır.

Turnuva Seçim Tekniği: Bu teknikte popülasyondan rastgele iki birey seçilir. 0 ile 1 arasında bir rastgele r sayısı seçilir. Bu r sayısı önceden belirlenmiş bir k parametresi ile karşılaştırılır. Eğer $r < k$ ise iki bireyden daha yüksek uygunluk değeri olan birey seçilir, aksi takdirde uygunluk değeri düşük birey seçilir. Bu seçilen iki birey sonraki seçme işlemlerinde de kullanılmak üzere orjinal popülasyona geri bırakılırlar.



Şekil 3.2. Örnek bir rulet tekeri seçim tekniği

Çaprazlama Operatörü

Basit genetik algoritma olarak da adlandırılan standart genetik algoritmada ikili kodlama yapısı, tek noktalı çaprazlama ve bit değiştirme mutasyon operatörü kullanılmaktadır. İkili kodlama yapısında probleme ait her bir çözüm belli sayıda 0 veya 1 değeri içeren kromozomla ifade edilir. Tek noktalı çaprazlama işleminde ise seçilen bir çaprazlama noktasına kadar olan genler birinci ebeveynden geriye kalanlar ise diğer ebeveynden alınarak birinci yavru kromozom oluşturulur. İkinci yavru kromozom elde edilirken ebeveynlerin rolü değiştirilir (Goldberg, 1989; Rayward-Smith, 1996; Kellegöz, 2006). Yani tek noktalı çaprazlama birinci ve ikinci kromozom üzerinde ortak belirlenen rasgele nokta temel alınarak, birinci

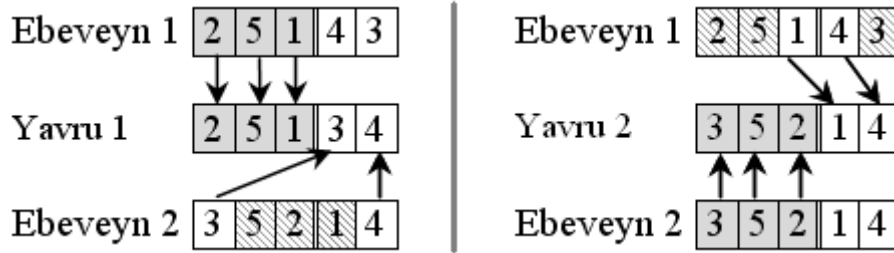
kromozomun bu noktadan önceki kısmı ile ikinci kromozomun bu noktadan sonraki kısmı birleştirilerek yeni bir kromozom elde edilir. İkinci kromozom için de kromozomların diğer kısımları birleştirilir. Çift noktalı çaprazlama ise kromozomlar üzerinde rasgele belirlenen iki nokta esas alınarak, kromozomların bu noktalar arasında kalan kısımlarının karşılıklı değiştirildiği çaprazlamadır. Örnek verilecek olursa (Erdem, 2008):

Tek Noktalı Çaprazlama

Kromozom 1	1 0 1 1 0 1 0 0	Yeni Kromozom 1	1 0 1 1 0 1 1 0
Kromozom 2	1 1 0 0 0 1 1 0	Yeni Kromozom 2	1 1 0 0 0 1 0 0

Çift Noktalı Çaprazlama

Kromozom 1	1 0 1 1 0 1 0 0	Yeni Kromozom 1	1 0 1 0 0 1 0 0
Kromozom 2	1 1 0 0 0 1 1 0	Yeni Kromozom 2	1 1 0 1 0 1 1 0

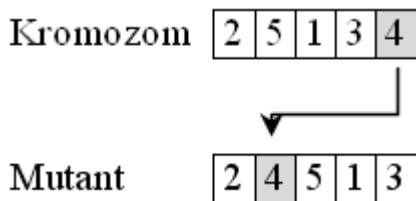


Şekil 3.3: Çizelgeleme problemleri için örnek bir tek noktalı çaprazlama

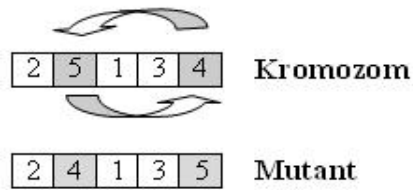
Mutasyon Operatörü

Standart GA'da mutasyon işlemi bit bazında gerçekleştirilir. Öyle ki, kromozomda bulunan her bir bit, belirli bir mutasyon olasılığıyla, 0 ise 1 değerine veya 1 ise 0 değerine dönüştürülür. Mutasyon operatöründe problemin çözümünde etkin olabilecek farklı stratejiler uygulanabilir (Reeves, 1995; Rayward-Smith, 1996; Kellegöz, 2006). Aşağıda kullanılan stratejilerden iş çiftlerinin yer değiştirmesi stratejisi ve araya iş ekleme stratejisine ait örnekler verilmiştir:

Araya İş Ekleme Mutasyon Operatörü



İş Çiftlerinin Yer Değiştirmesi Mutasyon Operatörü



Şekil 3.4. Mutasyon operatörlerinin işleyişine örnek

GA'nın performansını etkileyen etkenler şunlardır (Erdem, 2008):

- 1. Kromozom sayısı:** Kromozom sayısını arttırmak çalışma zamanını arttırırken azaltmak da kromozom çeşitliliğini yok eder.
- 2. Değişim oranı:** Kromozomlar biribirine benzemeye başladığında hala çözüm noktalarının uzağında bulunuyorsa değişim işlemi GA'nın sıkıştığı yerden kurtulması için tek yoldur. Ancak bu orana yüksek bir değer vermek GA'yı kararlı bir noktaya ulaştırmaktan alıkoyacaktır.
- 3. Kaç noktalı çaprazlama yapılacağı:** Normal olarak çaprazlama tek noktada gerçekleştirilmekle beraber yapılan araştırmalar bazı problemlerde çok noktalı çaprazlamanın daha yararlı olduğunu göstermiştir.
- 4. Çaprazlama sonucunda elde edilen bireylerin nasıl değerlendirileceği:** Çaprazlama sonucunda elde edilen iki bireyin hemen kullanılıp kullanılmayacağı bazen önemli olmaktadır.
- 5. Başarı değerlendirmesinin nasıl yapıldığı:** Akıllıca belirlenmemiş bir değerlendirme fonksiyonu çalışma zamanını uzatabileceği gibi çözüme hiçbir zaman ulaşılmamasına da neden olabilir.

Cheng ve Chang (2007) akış tipi çizelgeleme problemleri için GA ile çözüm yaklaşımlarında farklı seçim mekanizmaları içinden Rulet Tekerli Seçim mekanizmasını önermişlerdir. Murata vd. (1996) ise akış tipi çizelgeleme problemlerine GA ile çözümde çift noktalı çaprazlama operatörünün ve araya iş ekleme mutasyon operatörünün daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemişlerdir. Ele alınan problemin çözümünde kullanılan ve literatür dikkate alınarak oluşturulan GA parametreleri Çizelge 3.1'de ve GA yapısı Şekil 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Ele alınan problemin çözümünde kullanılan GA parametreleri

Parametre	Değer
Başlangıç Popülasyonu	Sakuraba vd. (2009) çalışmasında kullanılan bazı kurallara göre ve rasgele oluşturulan sıralamalar
Uygunluk Değeri	$\sum(\alpha E_i + \beta T_i)$ değeri enküçüklenmesi
Seçim Mekanizması	Rulet tekerli seçim mekanizması
Çaprazlama Operatörü	Çift noktalı çaprazlama
Mutasyon Operatörü	Araya iş ekleme mutasyon operatörü
Sonlandırma Koşulu	2n iterasyonda iyileşme olmadığında durdurulması

3.1.2.3.Tabu Arama

İnsan hafızasını taklit eden Tabu Arama (TA) algoritması Glover (1986) tarafından önerilmiştir. TA, kombinatoriyel eniyileme problemine bir mutlak eniyi bulmak üzere geliştirilmiş genel bir arama metodudur. Bu metotta da diğer sezgisel algoritmalarda olduğu gibi, bir başlangıç noktasından başlanır. Komşu arama yaklaşımı ve tabu listesi, bu metodun temel prensiplerini oluşturur. Metot, arama işlemini yönlendirmek ve aramanın bir yerel eniyi değere düşmesini engellemek için arama sürecine çeşitli kısıtlamalar getirir. TA algoritması, bir başlangıç çözümünden başlayıp mevcut çözümün belirlenen kısıtı sağlayan komşusuna ilerlemek yoluyla arama işlemini gerçekleştirir ve belirlenen bir durdurma kriteri sağlanıncaya kadar arama işlemi devam eder. Her bir iterasyonda mevcut çözümün komşuları içerisinde eniyi performans ölçütü değerine sahip olan çözüme, mevcut çözümdeniyi olmasına bakılmaksızın hareket edilir. Metot, döngüyü engellemek ve arama işlemini çözüm uzayının aranmamış bölgelerine yönlendirmek için belirli özelliklere sahip bazı çözümleri(tabu) yasaklar. Bu işlemi bazı özel kısa ve uzun dönemli hafıza fonksiyonlarıyla gerçekleştirir. Kısa dönemli ve yenilik tabanlı hafıza “Tabu Listesi” olarak adlandırılır. TA algoritmasının en basit yapısında bulunması gereken temel bileşenler: Başlangıç çözümü, komşu çözüm üretme mekanizması, tabu listesi ve durdurma kriteridir (Glover, 1989; 1990; Glover ve Laguna, 1997).

Komşu Arama Stratejisi (Yeni Çözüm Oluşturma Fonksiyonu)

Komşu arama stratejisi problem yapısına bağlıdır ve çözüm performansını doğrudan etkiler. Bir kurala bağlı değişiklikler yaparak yeni uygun çözümler elde edilmesini hedefler. Bu stratejilerden en yaygın kullanılanı “Bitişik İş Çiftlerinin Yer Değiştirmesidir(API)”. Bir diğer strateji de bütün iş çiftleri yer değiştirilerek (PI) yeni ve uygun çözümler aranması stratejisidir. Bunların yanı sıra problemin özelliğine göre farklı komşuluk üretme stratejileri de geliştirilip uygulanabilir (Eren, 2004).

Tabu Arama Hafızası

Tabu arama metodu, hafızada tuttuğu bilgileri kullanarak araştırma işlemine yön verdiği için, akıllı bir metottur. Tabu arama, geçmişte karşılaştığı durumları aklında tutar ve stratejik seçimler yaparak ilerlemeye çalışır. Glover ve Laguna (1997), kötü

bir stratejik seçimin iyi bir rastgele çözümden daha çok bilgi verebileceğini; hafızanın kullanıldığı bir sistemde belirli bir stratejiye göre yapılan kötü bir seçimin, stratejinin daha verimli hale getirilmesi için ipuçları içerebileceğini belirtmektedirler. Kısa dönemli hafıza tabu listesi olarak da bilinir ve arama sırasında karşılaşılan durumları tutar ve tekrarını önler. Uzun dönemli hafıza ise bulunan eniyi çözümü ve elit çözümleri tutarak iyi çözümlerin kaybolmasını engeller (Gülcü, 2006).

Tabu Listesi

Tabu listesi belli bir süre müddetince tekrar göz önüne alınmaması gereken çözümleri karakterize eden özellikleri saklar. Genellikle listeye ilk-giren-ilk-çıkarm stratejisi uygulanır. Listedeki varlık sayısı liste uzunluğuna ulaştıktan sonra listeye yeni varlıklar tepeden girdikçe eski varlıklar birer aşağı kayar ve en dipteki varlık listeden düşer. Komple bir çizelgeyi bütün olarak tabu listesinde saklamak büyük bir hafıza israfına neden olur. Bu yüzden sadece bu seçimi temsil eden bir özellik listede tutulur (Glover ve Laguna, 1997).

Tabu listesi uzunluğu belirlenmesi gereken önemli bir parametredir. Liste uzunluğu sabit veya belli bir aralıkta değişken olabilir. Eniyi liste uzunluğunu tespit eden kesin bir kural yoktur; deneme yanılma ile tespit edilmeye çalışılır. Etkin tabu listesi uzunluğunun seçimi problem hacmine ve kullanılan taşıma tipine bağlıdır. Ancak bütün problem sınıfları için etkin tabu listesi uzunluğu tasarlayacak tek bir kural yoktur. Tabu listesi uzunluğu bazı deneylerle kolayca belirlenebilir. Aşırı küçük tabu listesi uzunlukları, periyodik olarak tekrarlı amaç fonksiyonu değerleri veya çevrim meydana gelmesini ima eden diğer fonksiyon göstergelerine neden olur. Aşırı büyük tabu listesi uzunlukları ise bulunan çözümlerin kalitelerini kötüleştiren bir etkiye sahiptir (Glover ve Laguna, 1997).

Aspirasyon Ölçütü

Aspirasyon ölçütü bir taşıma üzerindeki tabu durumunun etkisini iptal eden bir koşul olarak tanımlanır. Aspirasyon ölçütüne başvurma ihtiyacı iki durumda ortaya çıkar. İlk durumda, komşuluktaki bütün taşımalar tabudur ve hiçbiri o ana kadar elde edilen amaç değerinden daha iyi değildir. Şu halde içlerinden birisi seçilerek arama devam

ettirilecektir. Buna uygun birkaç aspirasyon ölçütü şekli tanımlanmaktadır (Glover ve Laguna, 1997):

Peşinen aspirasyon: Eğer mevcut bütün taşımalar tabu ve diğer bazı aspirasyon kriterleriyle kabul edilemez ise, “en düşük tabu” taşıması yeni çözüm olarak seçilir.

Rasgele-aspirasyon: Eğer mevcut bütün taşımalar tabu ise içlerinden birisi rasgele seçilerek taşıma yapılır.

Arama-yönlü aspirasyon: Aramanın yönünü (ister iyileşen ister iyileşmeyen) değiştirmeyen bir taşımanın tabu durumu kaldırılarak taşımaya izin verilebilir.

Etki ile aspirasyon: Eğer düşük etkili bir taşıma kendinden sonra yüksek etkili bir taşımaya yol açmış ise, düşük etkili taşımanın tabu durumu iptal edilebilir.

İkinci durumda ise, bütün taşımalar tabu değildir, fakat tabu olan taşımanın değeri tabu olmayanlardan daha iyidir; ya belli bir eşik değeri kadar iyidir, ya da şimdiye kadarki eniyi amaç değerinden bile daha iyidir. Bu durumda aşağıdaki gibi aspirasyon ölçütleri oluşturulabilir (Glover ve Laguna, 1997):

Küresel-amaçlı aspirasyon: Eğer bir taşıma o ana kadar elde edilen eniyi çözüm değerinden daha iyi bir çözüm üretirse, tabu olsa bile o taşımaya izin verilir.

Bölgesel-amaçlı aspirasyon: Eğer bir taşıma bulunduğu bölgede o ana kadar elde edilen eniyi çözüm değerinden daha iyi bir çözüm üretirse, o taşımaya izin verilir.

Literatürde en yaygın kullanılan tabu yıkma(aspirasyon) kriteri, tabu olan çözümün arama boyunca o ana kadar bulunmuş eniyi çözümden daha iyi bir amaç değerine sahip olması durumunda tabu olmasına rağmen yapılabilmesidir. Bu kriter kaliteli bir çözümün elde edilme fırsatının tabu kriteri yüzünden kaçırılmasını önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra daha farklı stratejilere göre farklı aspirasyon ölçütleri uygulanabilir (Ben-Daya ve Al-Fawzan, 1998).

Durdurma Kriteri

Basit bir durdurma ölçütü, yapılan taşıma sayısını tutan bir sayaca bağlı olarak oluşturulabilir. Mesela, yapılan taşıma sayısı belli bir üst sınıra ulaşması bir

durdurma ölçütü olarak kullanılabilir. Bir diğeri, önceden belirlenmiş sayıda taşıma yapılmasına rağmen, amaç fonksiyonunda küresel bir iyileşme olmamışsa yine bu bir durdurma ölçütü olarak kullanılabilir. Bunların yanı sıra daha farklı stratejilere göre farklı durdurma kriterleri uygulanabilir (Glover ve Laguna, 1997).

Tabu listesi uzunluğu ve durdurma kriteri birçok çalışmada çizelgelenecek iş sayısına (n) bağlı olarak tanımlanmaktadır (Eren ve Güner, 2003; 2008). Ele alınan problemin çözümünde kullanılan ve Çizelge 3.2’de görülen TA parametreleri, Wan ve Yen (2002)’in çalışmalarından faydalanılarak belirlenmiştir.

Ayrıca kullanılan başlangıç çözümlerine göre TA methoduyla 10 farklı durum için çözümler elde edilmiştir. Bu kuralların numaraları ve tanımlamaları Çizelge 3.3’de görülebilir. TA methoduyla elde edilen çözümler, “#” Çizelge 3.3’deki kural numarasını göstermek üzere TA# şeklinde isimlendirilmiştir.

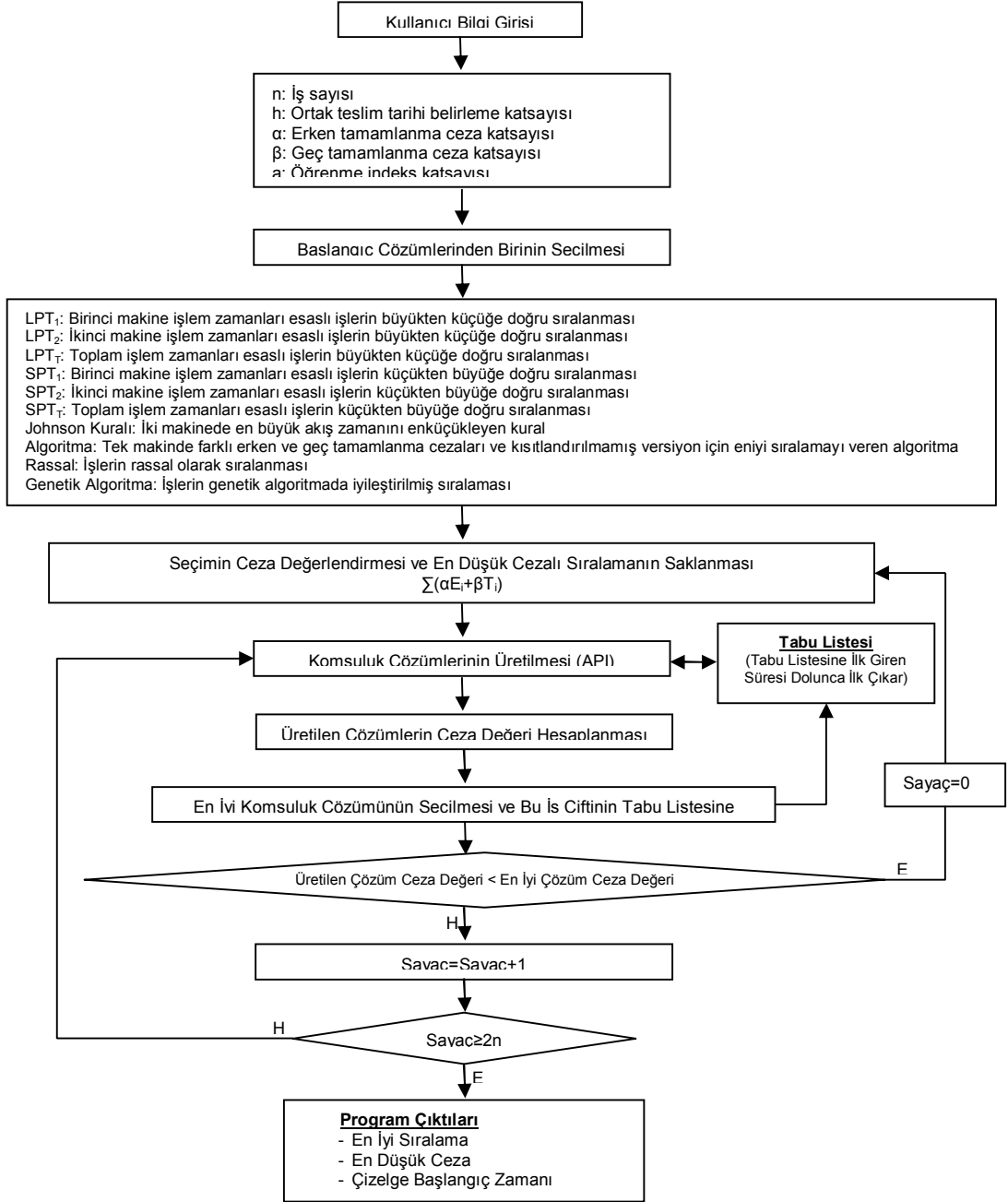
Çizelge 3.2. Ele alınan problemin çözümünde kullanılan TA parametreleri

Parametre	Değer
Başlangıç Çözümü	Çizelge 3.3’deki özel sıralama kurallarından, rasgele sıralamadan veya GA tarafından oluşturulan sıralamalardan biri
Uygunluk Değeri	$\sum(\alpha E_i + \beta T_i)$ değeri enküçüklenmesi
Komşu Arama Stratejisi	Bitişik iş çiftlerinin yer değiştirilmesi (API)
Tabu Listesi	İlk Giren İlk Çıkar Stratejisi&Çizelgelenecek İş Sayısına (n) bağlı bir tabu listesi uzunluğu
Aspirasyon Ölçütü	Eniyi çözümden daha iyi bir amaç değeri olması durumu
Durdurma Koşulu	2n iterasyonda iyileşme olmadığında durdurulması

Çizelge 3.3. TA için başlangıç çözümlerinin tanımı (İşler vd., 2009b)

Kural Numarası	Tanımı
0	Birinci makine işlem zamanlarına göre LPT kuralı.
1	İkinci makine işlem zamanlarına göre LPT kuralı.
2	İki makine işlem zamanlarının toplamına göre LPT kuralı
3	Birinci makine işlem zamanlarına göre SPT kuralı.
4	İkinci makine işlem zamanlarına göre SPT kuralı.
5	İki makine işlem zamanlarının toplamına göre SPT kuralı
6	Johnson kuralı (Johnson, 1954)
7	Tek makinde farklı erken ve geç tamamlanma cezaları için eniyi sıralamayı veren algoritma (Baker, 1997)
8	Rassal sıralama
9	GA sıralaması

Ele alınan probleme uygulanan TA yapısı Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Ele alınan probleme uygulanan TA yapısı

3.1.2.4. Rassal Arama

Rassal Arama (RA) çözüm uzayından rassal olarak belirli sayıda çözüm noktası (örneklem hacmi) seçen bir yaklaşımdır. RA seçilen noktaları amaç fonksiyonuna bağlı olarak değerlendirir ve çözüm örneklemi içerisindeki eniyi sıralamayı tanımlar. Eniyi sıralama kaydedilir ve süreç tekrar edilir. Eğer daha sonraki yinelemede eniyi sıralama öncekilerden daha iyi ise önceki eniyi sıralama bilgisi güncellenir. Bu arama süreci durdurma kriteri sağlanana kadar devam eder. RA

yaklaşımının “örneklem hacmi” ve “durdurma kriteri” olmak üzere iki parametresi vardır (Eren ve Güner, 2008). RA parametreleri, Eren ve Güner (2008)’in çalışmalarına benzer çizelgelenecek iş sayısına (n) bağlı olarak belirlenmiştir.

3.2.UYGULAMA

Problemleri tamsayılı programlama modeli ile çözmek için Extended LINGO Release 8.0 kullanılmıştır. LINGO literatürde birçok problemin çözümünde yaygın olarak kullanılan bir paket programdır (Toksarı ve Güner, 2009; 2010). Ayrıca sezgisel yaklaşımlar Visual C++ 6.0 ile kodlanmıştır. Bütün deneysel testler, Pentium IV/3Ghz işlemcili 512 MB RAM kapasiteli bir kişisel bilgisayarda yapılmıştır.

3.2.1.Tamsayılı Programlam Modeli İçin Literatürde Uygulama

3.2.1.1.Uygulamanın Planı

Ele alınan problem “Tam Sayılı Programlama Modeli” ile işlem zamanları Chou ve Lee (1999)’deki gibi 1 ile 10 arasında düzgün dağılımdan üretilerek ve belli koşullar altında çözüldüğünde; iş sayısı arttıkça ve/veya kısıtlayıcı faktör (h) azaldıkça çözüm için yapılması gereken yineleme sayısının ve gerekli çözüm zamanının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca çözümlerin “Mutlak Eniyi” olmasından dolayı elde edilen sonuçların ortak teslim tarihinden ağırlıklı mutlak sapmayı enküçüklediği anlaşılmış ve öğrenme etkisi altındaki iki makineli akış tipi problemlerin eniyi çözümünün bir permütasyon çizelgesi olacağı konusunda fikir vermiştir. Bu nedenle bu modelin büyük boyutlu problemleri, daha kısa sürede çözmek amacıyla geliştirilecek sezgisellerin performanslarının ölçümünde kullanılabilir (İşler vd., 2009a).

Çizelge 3.4. Literatür uygulamasına ait bilgiler

Parametre	Değerler
Erken(α)/Geç(β) Tamamlanma Cezaları (α, β)	(2,3); (3,2)
İş Sayısı	5; 20; 50; 100; 200; 500
Öğrenme Oranı (LR)	0.7; 0.8
Kısıtlayıcı Faktör (h)	0.1; 0.2; 0.3; 0.4
Herbir İş Hacmindeki Örneklem Sayısı	10
Toplam Problem	2x6x2x4x10=960

Yukarıdaki bilgiler ışığında Sarper (1995) tarafından kullanılan test problemlerinden faydalanılarak farklı çizelgelenecek iş sayısına (n) bağlı n=5, n=20, n=50, n=100,

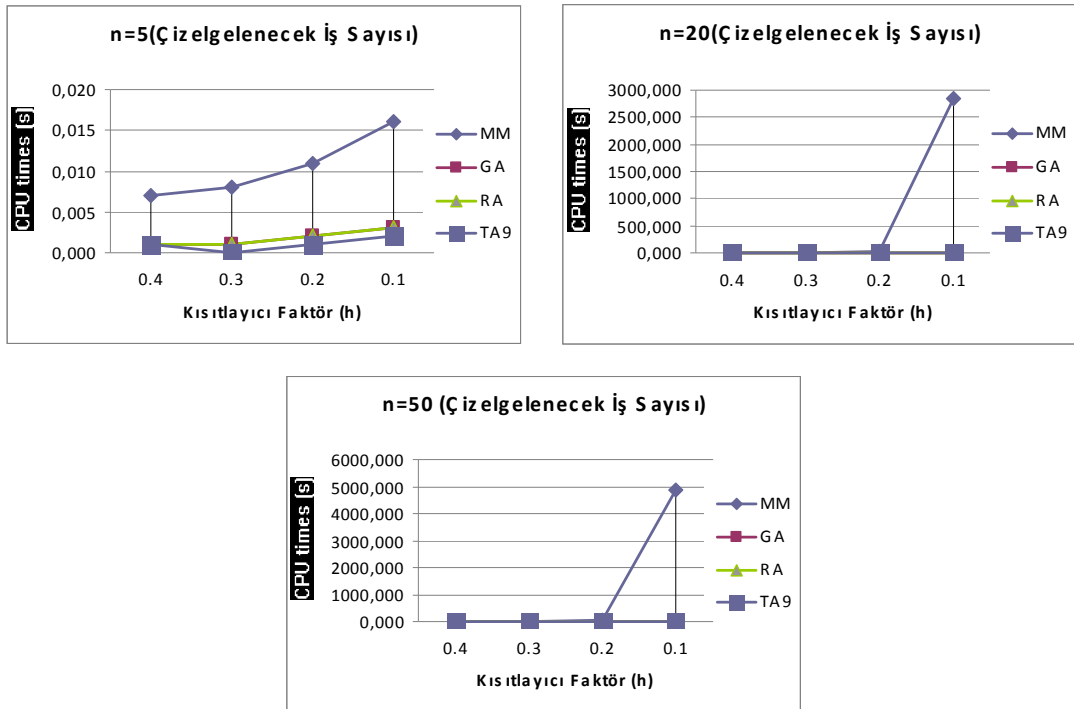
n=200 ve n=500 için yukarıda bahsedilen yaklaşımlarla çözümler elde edilmiştir. Her bir iş hacmi için 10 problem bulunmaktadır. Çizelge 3.4’de yapılan uygulamaya ait deneysel bilgiler görülebilir. Bu çalışmada matematiksel modelin çözüm zamanındaki artış (ana işlemci zamanı) göz önünde bulundurularak, deneysel sonuçlar çizelgelenecek iş sayısına (n) bağlı olarak iki bölümde incelenmiştir:

1- Küçük boyutlu problemler (n=5, 20 ve 50) hem matematiksel modelle (tamsayı programlama modeli) hem de sezgisel yaklaşımlarla (GA, TA9 ve RA) çözümlenerek değerlendirilmeler yapılmıştır.

2- Büyük boyutlu problemler (n=100, 200 ve 500) yukarıda ele alınan sezgisel yaklaşımların hepsi ile çözümlenerek değerlendirilmeler yapılmıştır.

3.2.1.1. Küçük Boyutlu Problemler

Küçük boyutlu literatür test problemleri MM (Matematiksel Model), GA (Genetik Algoritma), TA9 (GA çözüm sonucunu kullanan Tabu Arama) ve RA (Rassal Arama) ile çözülmüştür. Çözüm zamanlarının ortalaması iş sayıları için ayrı ayrı olmak üzere kısıtlayıcı faktöre (h) bağlı olarak Şekil 3.7’de verilmiştir. Şekil 3.7’den kısıtlayıcı faktör azaldıkça, çözüm alanının daralmasına bağlı olarak, ortalama çözüm sürelerinin üstel olarak arttığı görülebilir.



Şekil 3.7. Küçük boyutlu test problemleri için ortalama çözüm zamanı (s)

Çizelge 3.5. Küçük boyutlu problemler için ortalama %Hata değerleri

n	LR	Alpha-Beta	TA9 (Hybrid Meta-Heuristic)		GA		RA		RA* (Çizelge Başlangıç Zamanı Belirleme Algoritmasız)	
			Ortalama %Hata	En İyi Çözüm Sayısı*	Ortalama %Hata	En İyi Çözüm Sayısı*	Ortalama %Hata	En İyi Çözüm Sayısı*	Ortalama %Hata	En İyi Çözüm Sayısı*
5	0.8	A=3 B=2	3,68%	27	3,68%	27	5,02%	13	38,89%	0
		A=2 B=3	2,50%	28	2,50%	28	3,80%	15	29,15%	0
	0.7	A=3 B=2	3,81%	15	3,81%	15	5,11%	6	36,43%	0
		A=2 B=3	1,42%	31	1,42%	31	3,13%	17	26,48%	0
Ortalama			2,85%	63,13%	2,85%	63,13%	4,27%	31,88%	32,74%	0,00%
20	0.8	A=3 B=2	4,35%	2	4,39%	2	10,65%	0	341,93%	0
		A=2 B=3	1,48%	2	1,72%	1	8,23%	0	108,27%	0
	0.7	A=3 B=2	1,29%	2	1,44%	1	5,71%	1	461,28%	0
		A=2 B=3	1,33%	1	1,44%	1	7,98%	0	116,38%	0
Ortalama			2,11%	4,38%	2,25%	3,13%	8,14%	0,63%	256,97%	0,00%
50	0.8	A=3 B=2	4,95%	0	5,46%	0	28,86%	0	875,57%	0
		A=2 B=3	1,33%	0	1,73%	0	17,62%	0	270,18%	0
	0.7	A=3 B=2	0,68%	1	1,05%	0	12,55%	0	993,41%	0
		A=2 B=3	0,53%	0	0,86%	0	21,27%	0	265,29%	0
Ortalama			1,87%	0,63%	2,28%	0,00%	20,08%	0,00%	601,11%	0,00%

NOT: *Herbir satır için (4 farklı “h” değeri için) 4x10=40 problem çözülmüştür.

Küçük boyutlu problemler için sezgisel yaklaşımların etkinliğini ölçmek amacıyla literatürde de çokça başvurulan şu %Hata formülasyonu kullanılabilir (Eren ve Güner, 2008):

$$\%Hata = \frac{\text{Sezgisel Çözüm} - \text{Optimal Çözüm}}{\text{Optimal Çözüm}} \times 100$$

Yukarıda belirtilen sezgisel yaklaşımlar ve RA* (Rassal Arama ÇBZBA'sız) için çözüm sonuçları eniyi çözümle karşılaştırılarak %Hata değerleri hesaplanmış ve Çizelge 3.5'de verilmiştir. Çizelge 3.5 incelendiğinde TA9 ve GA çözümlerinin daha kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Ayrıca ÇBZBA'nın ortak teslim tarihinden toplam erken/geç tamamlanma cezalarının azaltıcı yönde etki yaptığı RA* sonuçları incelenerek anlaşılabilir.

3.2.1.2. Büyük Boyutlu Problemler

Büyük boyutlu literatür test problemleri sezgisel yaklaşımlarla çözülmüştür. Eniyi çözüm sonuçları bilinmediğinde sezgisel çözümlerin performansı eniyi çözümle kıyaslanarak değerlendirilebilir. Bu kıyaslama %Fark olarak ifade edilir ve şu şekilde formüle edilir (Eren ve Güner, 2008):

$$\%Fark = \frac{\text{Sezgisel Çözüm} - \text{En İyi Sezgisel Çözüm}}{\text{En İyi Sezgisel Çözüm}} \times 100$$

Sezgisel yöntemlerin çözümlerinin %Fark ortalaması Çizelge 3.6'da verilmiştir. Çizelge 3.6'dan görüleceği üzere TA9 (GA çözüm sonucunu kullanan Tabu Arama) bütün büyük boyutlu problemler için eniyi ve RA* (Rassal Arama ÇBZBA'sız) en kötü sonucu vermiştir.

Murata vd. (1996) akış tipi çizelgeleme problemleri için geleneksel sezgiseller içinde genetik algoritmanın eniyiye daha yakın performans gösterdiğini vurgulamışlardır. Ayrıca uygulaması yapılan GA başlangıç popülasyonu olarak TA# başlangıç çözümlerini TA9 hariç içermektedir. Bu bilgiler dikkate alınarak Çizelge 3.6 incelendiğinde beklendiği gibi GA'nın TA9 dışında TA ve RA yaklaşımlarından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca Çizelge 3.6'dan GA sıralamasına TA uygulanarak (TA9) çözümün yaklaşık %1 iyileştirilebildiği ve ÇBZBA'nın çizelge cezalarını azaltıcı fonksiyonu olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.6. Büyük boyutlu problemler için %Fark değerleri

n	LR	Alpha-Beta	GA	TA0	TA1	TA2	TA3	TA4	TA5	TA6	TA7	TA8	TA9	RA	RA*(ÇBZBA'sız)
Ortalama %Fark															
100	0.8	A=3 B=2	0,99%	25,54%	35,17%	20,65%	41,69%	14,41%	28,28%	15,54%	40,79%	33,20%	0,00%	45,18%	1257,43%
		A=2 B=3	0,69%	67,21%	74,47%	18,18%	23,85%	4,18%	61,75%	8,57%	34,12%	11,45%	0,00%	39,58%	431,42%
	0.7	A=3 B=2	0,86%	60,24%	48,06%	10,53%	20,59%	3,52%	53,69%	13,27%	24,87%	26,31%	0,00%	48,43%	1774,68%
		A=2 B=3	0,25%	61,31%	90,70%	16,98%	3,69%	8,88%	64,04%	12,38%	19,43%	35,43%	0,00%	76,78%	658,83%
200	0.8	A=3 B=2	1,32%	20,78%	44,08%	12,15%	68,38%	15,65%	30,33%	10,87%	46,59%	30,17%	0,00%	64,33%	1643,74%
		A=2 B=3	0,94%	106,65%	69,66%	27,54%	26,27%	6,43%	62,54%	12,53%	24,54%	20,40%	0,00%	44,11%	655,41%
	0.7	A=3 B=2	1,11%	68,72%	39,27%	15,49%	40,23%	4,59%	48,79%	13,49%	29,36%	24,68%	0,00%	80,24%	2048,23%
		A=2 B=3	0,67%	63,63%	107,85%	8,52%	18,58%	6,98%	66,38%	16,98%	22,58%	45,87%	0,00%	88,63%	953,89%
500	0.8	A=3 B=2	1,48%	30,74%	50,26%	20,47%	98,97%	18,91%	38,27%	17,04%	78,93%	31,07%	0,00%	93,06%	2028,96%
		A=2 B=3	1,03%	117,73%	78,89%	39,01%	33,42%	8,58%	63,55%	15,21%	42,13%	56,29%	0,00%	61,73%	957,61%
	0.7	A=3 B=2	1,87%	68,12%	36,57%	24,63%	49,71%	10,75%	107,08%	16,82%	30,35%	42,88%	0,00%	114,17%	2549,71%
		A=2 B=3	0,88%	66,65%	135,79%	27,68%	24,27%	26,84%	96,25%	28,19%	24,74%	78,14%	0,00%	106,44%	1325,45%
Ortalama			1,01%	63,11%	67,56%	20,15%	37,47%	10,81%	60,08%	15,07%	34,87%	36,32%	0,00%	71,89%	1357,11%

NOT: *Herbir satır için (4 farklı "h" değeri için) 4x10=40 problem çözülmüştür.

3.2.2.KOBİ’de Uygulama

Teorik literatürle sanayi uygulamalarını birleştirmek ve sanayi işletmelerinin özelliklede KOBİ’lerin gelişimine katkıları sunmak amacıyla bir KOBİ için uygulama yapılmıştır.

3.2.2.1.KOBİ’nin Tanıtımı ve Verilerin Elde Edilmesi

Uygulama yapılan KOBİ hakkındaki bazı teknik bilgiler şu şekildedir:

- ❖ Medikal 2000 A.Ş., 1998 yılında kurulmuş olup sağlık sektöründe hizmet vermekte olan bir firmadır. Kuruluşundan, 2006 yılı sonuna kadar “2. Organize Sanayi Bölgesi Ulukavak Sokak No: 11 Posta Kodu: 42300 Selçuklu/Konya Türkiye” adresinde hizmet vermiş olan firma, 2006 yılı sonu itibariyle yeni binasına taşınmıştır. “Konya Organize Sanayi Bölgesi Küçükyıldız Sokak No:4 Posta Kodu:42300 Selçuklu/Konya Türkiye” adresli yeni yerinde hizmetine devam eden firma; yaklaşık 1000 m² ek bina alanı, 9000 m² kapalı alan ve 3000 m² açık alan üzerine kuruludur.
- ❖ Firma üretim tesisinin bitişiğinde yaklaşık 13000 m²’lik eski bir tesisi satın almış ve üretim tesisini bu yeni arsayla birlikte genişletmeyi ve yeniden düzenleyerek depolarını ayırmayı planlamaktadır.
- ❖ Ürün yelpazesinde manuel ve elektromekanik hastane karyoları ve çeşitli hastane ekipmanları vardır. Medikal 2000 A.Ş. her geçen gün ürün yelpazesini genişletmek için çalışmalarda bulunmakta ve mevcut ürünlerini de daha iyi seviyelere taşımak için gerekli revizyon çalışmalarını yürütmekte ve AR-GE’ye büyük önem vermektedir.
- ❖ Firma ürünlerine yönelik metal aksamları kendi tesislerinde yapmakta, aksesuarlarını yurtiçi ve yurtdışı tedarikçilerden temin etmektedir.
- ❖ Firma yeterli üretim teknolojisine ve işçilik kapasitesine sahip olmakla birlikte, teknolojisini daha da geliştirmek için girişimlerde bulunmaktadır.
- ❖ Firmada 4 mühendis, 7 teknisyen, 6 usta, 71 işçi, 2 çırak ve 28 idari personel olmak üzere toplam 118 kişi çalışmaktadır.
- ❖ Firma motorlu karyolarını daha seri üretebilmek amacıyla yeni bir montaj hattı kurmuştur.

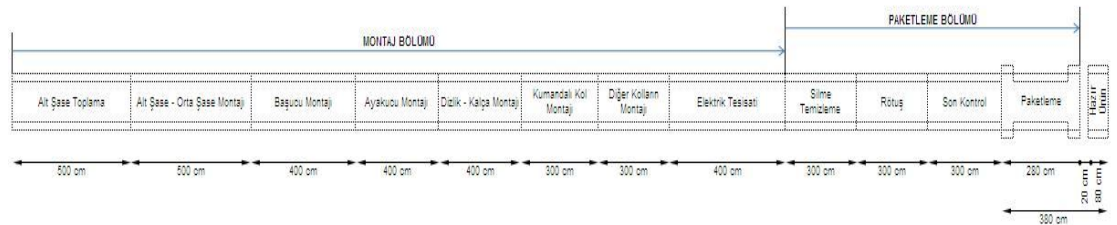
Medikal 2000 firması 8 adet motorlu karyola modeline sahiptir ve bunları montaj hattında üretmeyi planlamaktadır: Plus A2 ... Plus A9 → $i=1...8$ (İşler)

Uygulama için ürün gruplarına (işlere) yönelik ilk zamanları belirlemek üzere zaman etüdü çalışması (Kasım 2008 tarihli) yapılmıştır.

Şekil 3.8’de ele alınan montaj hattı incelendiğinde üretim sürecinin 12 ayrı işlem bölümünden oluştuğu görülmektedir. KOBİ’de uygulama yapılan süreç, ele alınan ve çözüm yaklaşımları geliştirilen probleme (İşler vd., 2009a) benzerliği yönünden firma mühendisleri ile değerlendirilmiş ve problemin çözümünü kolaylaştırmak için ayrı ayrı ele alınan bölümler, problemin çözümünde kullanılması düşünülen benzer nitelikteki bölümlerin bir arada ifade edilmesi çerçevesinde birleştirilerek 2 makineli akış tipi üretime geçiş yapılmıştır. Bu çerçevede:

Alt Şase Toplama, Alt Şase-Orta Şase Montajı, Başucu Montajı, Ayak Ucu Montajı, Dizlik-Kalça Montajı, Kumandalı Kol montajı, Diğer Kolların Montajı ve Elektrik Tesisatı bölümleri; Sanal 1. Makineyi yani Montaj Bölümünü oluşturmuştur.

Silme-Temizleme, Rötüş, Son Kontrol ve Paketleme bölümleri ise; Sanal 2. Makineyi yani Paketleme Bölümünü oluşturmuştur.



Şekil 3.8. KOBİ’de ele alınan montaj hattı (1.Makine: Montaj Bölümü, 2.Makine: Paketleme Bölümü)

Nadler ve Smith (1963), özellikle makine atölyelerinde öğrenme eğrilerini ve elde edilen sonuçları analiz ederek, bir ürünün imalatında kullanılan her bir temel işlemin, kendi öğrenme etkisine sahip olduğu sonucunu çıkarmışlardır. Bu doğrultuda; zaman etüdünde ayrı ayrı ele alınan alt işlem bölümleri işlem zamanlarına bağlı ağırlıklı ortalama mantığı çerçevesinde her iki makine için öğrenme oranı (LR) tespitine yönelik çalışmalar yapılmıştır:

İşçilerin aynı veya benzer işi tekrar yapımlarındaki işlem sürelerindeki azalma miktarı ölçülerek alt iş bölümlerine ait öğrenme oranları (LR) tespit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre; Alt Şase Toplama, Alt Şase-Orta Şase Montajı, Başucu

Montajı, Ayak Ucu Montajı, Dizlik-Kalça Montajı, Kumandalı Kol montajı ve Diğer Kolların Montajı alt işlem bölümleri için yapılan çalışmalarda öğrenme oranı (LR) yaklaşık olarak %75, Elektrik Tesisatı alt işlem bölümü için ise yaklaşık olarak %90 olarak tespit edilmiştir. Montaj bölümü (1. Makine) için ağırlık faktörleri (işlem zamanları) dikkate alınarak öğrenme oranı (LR) yaklaşık olarak %80 olarak tespit edilmiştir.

Heizer ve Render (2001) farklı ürünler için farklı öğrenme oranlarının olduğunu göstermişlerdir. 1920 ve 1988 yılları arasında Birleşmiş Milletlerde öğrenme oranının farklı imalat endüstrileri için %70 ile %90 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Örneğin çelik endüstrisinde %79 iken uçak imalatında %80 olarak tespit edilmiştir. Bunun dışında öğrenme etkisinin ilk uygulayıcılarından olan Biskup (1999) ve Mosheiov (2001a) çalışmalarında %80'i ele almışlar ve daha sonraları da birçok araştırmacı çalışmalarında bu oranı kullanılmışlardır (Toksarı, 2008). Literatürdeki bu değerlendirmeler dikkate alındığında üretim süreci içerisindeki Montaj Bölümüne yönelik yapılan tespitlerin literatürle tutarlı olduğu görülmektedir.

Paketleme Bölümü (2. Makine) için yapılan çalışmalarda öğrenme oranı (LR) yaklaşık olarak %95 olarak tespit edilmiştir. Buradaki öğrenmenin az oluşunun nedeni işlemlerin özellikle paketleme alt işleminin otomatik olarak gerçekleştirilmesi olarak düşünülmektedir.

Yapılan görüşmelerde her ürünün maliyetinin farklı olması nedeniyle erken ve geç tamamlanma maliyetlerinin (cezalarının) aynı olarak değerlendirilmesinin sağlıklı olmayacağı anlaşılmıştır.

Çizelge 3.7. KOBİ'deki işlere ait işlem zamanları ve erken/geç tamamlanma cezaları

i	P_{i1}	P_{i2}	α_i	β_i
1	2642	1220	0.000011	0.0030
2	2715	1208	0.000013	0.0035
3	2949	1248	0.000015	0.0040
4	3171	1273	0.000017	0.0045
5	3268	1302	0.000019	0.0050
6	3304	1338	0.000022	0.0055
7	3011	1346	0.000025	0.0060
8	2870	1395	0.000029	0.0070

Ayrıca firma yetkilileri ile yapılan görüşmede erken tamamlama ile geç tamamlamanın da aynı maliyet (ceza) olarak değerlendirilmesinin mümkün olmadığı ve geç tamamlamanın firma için anlaşmalardan kaynaklanan yaptırımlarının yüksek olduğu, müşteri memnuniyetsizliğinin ise hiç istenilmeyen bir durum olduğu ifade edilmiştir. Bu çerçevede her bir ürün grubu için erken ve geç tamamlanma cezaları (Zamanlar sn. cinsinden olduğu için birim ceza maliyeti sn. olarak firma mühendisleri ile belirlenmeye çalışılmıştır) yukarıdaki gibi belirlenmiştir.

3.2.2.2. Modelin Kurulması ve Uygulanması

Yukarıdaki bilgiler ışığında geliştirilen tamsayı programlama modeli (Sakuraba vd., 2009; İşler vd., 2009a) modifiye edilerek aşağıdaki şekle dönüştürülmüştür:

Amaç Fonksiyonu:

$$\min \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{i,j} (\alpha_i E_j + \beta_i T_j) \quad (3.9)$$

Kısıtlar:

$$C_{j,2} = d - E_j + T_j \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3.10)$$

$$C_{1,1} = \sum_{i=1}^n (P_{i,1} * x_{i,j}) + I_{1,1} \text{ ve } C_{1,2} = C_{1,1} + \sum_{i=1}^n (P_{i,2} * x_{i,j}) + I_{1,2} \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.11)$$

$$C_{j,1} = C_{j-1,1} + I_{j,1} + \sum_{i=1}^n (P_{i,1} * x_{i,j} * j^{a1}) \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.12)$$

$$C_{j,2} = \max\{C_{j-1,2}, C_{j,1}\} + I_{j,2} + \sum_{i=1}^n (P_{i,2} * x_{i,j} * j^{a2}) \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.13)$$

$$I_{j,1} + \sum_{i=1}^n [P_{i,1} * x_{i,j+1} * (j+1)^{a1}] + W_{j+1,2} = W_{j,2} + \sum_{i=1}^n (P_{i,2} * x_{i,j} * j^{a2}) + I_{j,2} \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.14)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1 \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3.15)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} = 1 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3.16)$$

$$I_{j,k} \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n; k=1, 2$$

$$W_{j,2} \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n$$

$$E_j, T_j \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$$

Amaç fonksiyonu (3.9) ortak teslim tarihinden ağırlıklı sapma cezalarının enküçüklenmesini ifade etmektedir. Kısıtlardan ilki (3.10) işlerin erken ve geç tamamlanma değerlerini hesaplar. İkinci kısıt fonksiyonu (3.11) ilk sırada çizelgelenen işin birinci ve ikinci makinede tamamlanma zamanının, 1 ve 2 makinelerindeki işlem sürelerine doğrudan bağlı olduğunu ifade etmektedir (öğrenme etkisi ikinci sırada çizelgelenecek işle beraber görüleceğinden) ve özellikle problemlerin kısıtlandırılmış versiyonlarında ihtiyaç duyulmaktadır. (3.12)'teki kısıt işlerin birinci makinede tamamlanma zamanlarını hesaplar. (3.13)'teki kısıt işlerin ikinci makinede tamamlanma zamanlarını hesaplar. (3.14) kısıtı değişkenlere yönelik problemin fiziksel kısıtlarını ifade etmektedir. Bu fiziksel kısıtı daha iyi anlamak için Şekil 3.1 incelenebilir. Bu şekil t_1 (j. işin makine 1'deki tamamlanma zamanı) ve t_2 (j+1 pozisyonundaki işin makine 2'de başlama zamanı) arasındaki aylak, bekleme ve işlem süreleri arasındaki ilişkiyi gösteren Gantt şemasıdır. (3.15) ve (3.16) kısıtları her bir pozisyona sadece bir işin atanmasını sağlar. Diğer kısıtlar değişkenler için pozitif değer almayı ve x_{ij} için 0,1 değerlerinden birini almayı sağlarlar (Sakuraba vd., 2009; İşler vd., 2009b).

Çizelge 3.8. KOBİ'den elde edilen verilere uygulanacak alternatif yöntemler ve açıklamaları

KURAL	AÇIKLAMASI
SPT_T	Toplam işlem zamanları esaslı işlerin küçükten büyüğe doğru sıralanması
SPT_1	Birinci makine işlem zamanları esaslı işlerin küçükten büyüğe doğru sıralanması
SPT_2	İkinci makine işlem zamanları esaslı işlerin küçükten büyüğe doğru sıralanması
LPT_T	Toplam işlem zamanları esaslı işlerin büyükten küçüğe doğru sıralanması
LPT_1	Birinci makine işlem zamanları esaslı işlerin büyükten küçüğe doğru sıralanması
LPT_2	İkinci makine işlem zamanları esaslı işlerin büyükten küçüğe doğru sıralanması
Johnson Kuralı	İki makinede en büyük akış zamanını enküçükleyen kural (Johnson, 1954)

Tamsayılı programlama modeli sıralaması, Çizelge 3.8'de açıklamaları verilen alternatif olabilecek nitelikteki kurallara göre sıralamalar ve rassal bir sıralama ile $h=0.4$, $h=0.3$, $h=0.2$ ve $h=0.1$ ortak teslim tarihi belirleme katsayıları kullanılarak Çizelge 3.9'daki çözümler elde edilmiştir. Problemi tamsayılı programlama modeli ile çözmek için Extended LINGO Release 8.0 kullanılmıştır. Ayrıca alternatif sıralama cezalarının tespiti için Visual Basic 6.0 kullanılmıştır.

3.2.2.2.1. Modelin Uygulanması İçin Excel Arayüzü

Günümüzde bilgisayar ve bilgisayar destekli bilgi sistemleri büyük önem kazanmıştır. Bilgisayar destekli bilgi sistemleri, yönetim kararlarında karşılaşılan

problemlerin çözümünü kolaylaştırmakta, zamanı kısaltmaktadır (Çetinyokuş ve Gökçen, 2002).

Literatürdeki yapılan çalışmalarda KOBİ'lerin çizelgeleme problemlerinin çözümü için Matematiksel Modeller kurulmakta ve bu modellerde bilgisayar paket programları yardımıyla kodlanarak çözdürülmektedir. Kullanıcılara kolaylık sağlamak amacıyla Şekil 3.9'da görülen, uygulama yapılan KOBİ için geliştirilmiş, ancak benzer nitelikteki problemler için genel kullanıma açık ve farklı nitelikteki problemler için geliştirilebilir nitelikte Microsoft Office Excel'de Karar Destek Sistemi (KDS) yaklaşımıyla çalışabilen arayüz tasarlanmıştır.

İŞLER	MAKİNELER		SIRA	ERKEN TESLİM CEZASI	GEÇ TESLİM CEZASI	AMAÇ FONKSİYON DEĞERİ =
	1	2				
PLUS A2	2642	1220		0,000011	0,0030	$h (<1) = 0,4$
PLUS A3	2715	1208		0,000013	0,0035	ORTAK TESLİM TARİHİ= 13704
PLUS A4	2949	1248		0,000015	0,0040	
PLUS A5	3171	1273		0,000017	0,0045	
PLUS A6	3268	1302		0,000019	0,0050	ÖĞRENME ORANI-MONTAJ= 0,8
PLUS A7	3304	1338		0,000022	0,0055	ÖĞRENME ORANI-PAKETLEME= 0,95
PLUS A8	3011	1346		0,000025	0,0060	
PLUS A9	2870	1395		0,000029	0,0070	
TOPLAM	23930	10330				
GEN.TOP.	34260					

LINGO Solver Status	
Solver Status:	Model Class: INLP
	State: Global Optimum
Objective:	0
Infeasibility:	0
Iterations:	13
Extended Solver Status:	Solver Type: Global
	Best Obj: 19,408
	Obj Bound: 19,408
	Steps: 13
	Active: 4
Variables:	Total: 197
	Nonlinear: 94
	Integers: 64
Constraints:	Total: 121
	Nonlinear: 16
Nonzeros:	Total: 604
	Nonlinear: 150
	Generator Memory Used (K): 50
	Elapsed Runtime (hh:mm:ss): 00:01:06

Şekil 3.9. KOBİ için tasarlanan ve genel kullanıma açık MS Excel arayüzü

Microsoft Excel’de hazırlanan arayüz kullanıcıya verileri girmesi ve sonuçları görmesi için KDS yaklaşımıyla oluşturulmuş bir ortamdır. Bu arayüz, “Data, Model ve Açıklamalar” çalışma sayfalarından oluşmaktadır. “Data” sayfası arayüz olarak kullanılan asıl sayfadır. “Model” sayfasında matematiksel modelin LINGO paket programına aktarılabilmesi için gerekli kodlar bulunmaktadır (Lingo User’s Guide, 1999; Sakallı ve Birgören, 2004).

Bu arayüz kullanım kolaylığı açısından farklı veriler için farklı renklerde tasarlanmış ve bu arayüzde hangi renklerin hangi tip veriler için nasıl doldurulacağı ve arayüzün çalışır duruma nasıl getirileceği “Açıklamalar” sayfasında belirtilmiştir.

Bu arayüzde gerekli veriler girilip “SIRALA” butonuna basıldığında buna bağlı makro ile LINGO paket programı otomatik olarak çalışır, “Model” sayfasındaki kodları ve “Data” sayfasındaki verileri kullanarak problemin çözümü bulunur, hangi işin kaçınıcı sırada yapılacağı “SIRA” sütununda ve bu sıralamanın global maliyeti “AMAÇ FONKSİYON DEĞERİ” karşısında görülür (Lingo User’s Guide, 1999; Sakallı ve Birgören, 2004).

3.2.2.3.KOBİ’deki Uygulama Sonuçlarının Değerlendirmesi

Bu problemde Johnson (1954) Kuralına göre sıralama ile LPT₂ Kuralına göre sıralama 2. makine sürelerinin 1. makine sürelerinden düşük olmasına bağlı olarak aynı olmuştur. Çizelge 3.9 incelendiğinde; en düşük ceza sonucunu bütün h değerleri için eniyi sonucu vermesi beklenen Tamsayılı Programlama modeli verdiği ve Johnson Kuralı ile LPT₂ sıralamasının tamsayılı programlamaya yakın sonuçlar verdiği görülür.

h=0.1, h=0.2 ve h=0.3 için tamsayılı programlamanın bulduğu sıralamada “geç teslim cezası en büyük olandan enküçük olana doğru sırala” gibi bir mantık ortaya çıksa da bu mantığın genelde kullanılabilirliği ile ilgili yapılan örneklemelerde; bu mantığın sadece toplam işlem zamanları birbirine yakın ve ortak teslim tarihlerinin daha kısıtlanmış olduğu durumlarda geçerli olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, geliştirilen Tamsayılı Programlama Modeli kullanılarak elde edilecek sıralamaya göre işler montaj hattına alınırsa kaynaklar eniyi şekilde kullanılmış olacaktır. Ayrıca Microsoft Office Excel’de tasarlanan arayüzün farklı veriler için

farklı renklerde olması, hangi renklerin hangi tip veriler için nasıl doldurulacağı açıklanması ve “SIRALA” butonuna basılarak sonucun kolayca görülebilmesi nedeniyle KOBİ’deki kullanıcılara kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

Çizelge 3.9. KOBİ’den elde edilen verilere uygulanan yöntemlere ait sonuçlar

Yöntem	h	Sıralama	Ceza
Tamsayı Programlama	0.4	2-8-7-5-6-4-3-1	19.40803
SPT _T		1-2-3-8-7-4-5-6	25.26027
LPT _T		6-5-4-7-8-3-2-1	22.34712
SPT ₁		1-2-8-3-7-4-5-6	25.23495
LPT ₁		6-5-4-7-3-8-2-1	25.74980
SPT ₂		2-1-3-4-5-6-7-8	35.41079
Johnson Kuralı-LPT ₂		8-7-6-5-4-3-1-2	20.91795
Rassal		1-2-3-4-5-6-7-8	35.13091
Tamsayı Programlama		0.3	8-7-6-5-4-3-2-1
SPT _T	1-2-3-8-7-4-5-6		83.63597
LPT _T	6-5-4-7-8-3-2-1		83.28915
SPT ₁	1-2-8-3-7-4-5-6		83.55794
LPT ₁	6-5-4-7-3-8-2-1		88.41615
SPT ₂	2-1-3-4-5-6-7-8		107.33142
Johnson Kuralı-LPT ₂	8-7-6-5-4-3-1-2		70.43422
Rassal	3-1-7-4-2-6-8-5		95.46433
Tamsayı Programlama	0.2		8-7-6-5-4-3-2-1
SPT _T		1-2-3-8-7-4-5-6	182.08546
LPT _T		6-5-4-7-8-3-2-1	176.26112
SPT ₁		1-2-8-3-7-4-5-6	176.15746
LPT ₁		6-5-4-7-3-8-2-1	181.38812
SPT ₂		2-1-3-4-5-6-7-8	207.02958
Johnson Kuralı-LPT ₂		8-7-6-5-4-3-1-2	149.62740
Rassal		4-7-8-5-2-1-6-3	164.52494
Tamsayı Programlama		0.1	8-7-6-5-4-3-2-1
SPT _T	1-2-3-8-7-4-5-6		301.85700
LPT _T	6-5-4-7-8-3-2-1		295.95850
SPT ₁	1-2-8-3-7-4-5-6		295.92900
LPT ₁	6-5-4-7-3-8-2-1		301.08550
SPT ₂	2-1-3-4-5-6-7-8		326.02100
Johnson Kuralı-LPT ₂	8-7-6-5-4-3-1-2		261.56700
Rassal	7-5-2-3-4-6-8-1		298.42500

4.SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çizelgeleme problemleri farklı işler veya siparişlerin tek veya çok makinede belli işlemlere tabi tutulmak zorunda olmasıyla ortaya çıkar. Üretim ortamının doğal bir özelliği, insan aktivitelerinin yüksekliğidir. Geleneksel çizelgelemede genel varsayım, verilen bir ürünün üretim zamanının üretim sırasındaki pozisyonundan bağımsız olmasıdır. Fakat bazı gerçek düzenlemelerde, üretim süreci sürekli olarak gelişir. Dolayısıyla bir ürünün üretim zamanı, eğer daha sonra çizelgelenirse kısalmır. Bu olgu literatürde “öğrenme etkisi olarak” bilinir. Bu etki çizelgeleme literatüründe Biskup (1999)’dan sonra daha çok dikkate alınmaya başlamıştır.

Bir E/G tamamlanma çizelgeleme yapısında, erken biten işler teslim tarihlerine kadar üreticinin elinde kalır. Bu da ürünün bozulmasından kaynaklanan maliyetler ile depolama veya sigorta gibi maliyetler getirir. Buna ilaveten, biten mal stoku dolaylı olarak fırsat maliyeti taşıyan verimsiz bir yatırımdır. Diğer yandan, teslim tarihlerinden sonra tamamlanan işler müşteri tatminsizliği, sözleşme cezaları, satış kayıpları veya itibar kaybına yol açar. Bu nedenle, ideal bir çizelge için tüm işler teslim tarihlerinde tamamlanmalıdır.

Bu çalışmada çizelgeleme problemlerinde; erken/geç tamamlanma performans kriteri ve öğrenme etkisinin dikkate alındığı yayınlara yönelik literatür taraması sonucunda literatüre yönelik şu tespitler yapılmıştır:

- ◆ E/G tamamlanma problemlerinin çizelgelemedeki uygulamaları öğrenme etkisi uygulamalarından daha eskidir.
- ◆ E/G tamamlanma problemleri NP-zor sınıfında problemlerdir ve öğrenme etkisinin probleme dâhil edilmesi çözümü daha da karmaşıklştırmaktadır.
- ◆ E/G tamamlanma çizelgeleme de performans ölçütünü ifade ederken, öğrenme etkisi işleme özelliğini ifade etmektedir.
- ◆ Öğrenme etkisi ve E/G problemlerinin ayrı ayrı literatürde tek makine uygulamaları çok olsa da akış tipi uygulamaları azdır.
- ◆ Çizelgeleme problemlerinde öğrenme etkisi ve E/G tamamlanma kavramlarının bir arada çok az ele alınmış olması ve bu kavramları tek başına içeren birçok yayın olması nedeniyle “Öğrenme Etkili Erken/Geç Tamamlanma” çizelgeleme

problemleri literatüre katkı yapılacak bakir bir çalışma alanı olarak değerlendirilebilir.

Bu tez çalışmasında literatür araştırmasının devamında henüz literatürde ele alınmamış “öğrenme etkili iki makine akış tipi çizelgelemede ortak teslim tarihinden sapmaların enküçüklenmesi” problemine çeşitli çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. İncelenen problemin öğrenme etkisiz durumu bile NP-zor problem olup, eniyi çözümünü bulmak için öncelikli olarak tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Model için Extended LINGO Release 8.0 kullanılarak farklı iş sayılarındaki örnek problemler kullanılarak denemeleri yapılmıştır. Geliştirilen tamsayılı programlama modelinin problemlerin çözümünde etkin olduğu görülmüştür. Bu modelden daha büyük boyutlu problemlerin çözümünde kullanılacak sezgisel yaklaşımların performanslarının test edilmesinde de yararlanılmıştır.

Ele alınan probleme yönelik büyük boyutlu problemlerin daha hızlı ve etkin bir şekilde çözümlenebilmesi için sezgisel yaklaşımlar geliştirilmiştir. GA ve TA sezgisel yaklaşımları kullanılarak iyi çözümlerin (daha kısa çözüm süresinde eniyiye yakın sonuçlar) elde edilmesi hedeflenmiştir. Literatürde kullanılan test problemleri ile (küçük ve büyük boyutlu) geliştirilen bu yaklaşımların performansları test edilmiştir. Ayrıca sezgisel yaklaşımlar Visual C++ 6.0 ile kodlanmış ve bütün deneysel testler, Pentium IV/3Ghz işlemcili 512 MB RAM kapasiteli kişisel bilgisayarda yapılmıştır.

Literatür test problemleri ile iş sayısına (n) bağlı n=5, n=20, n=50, n=100, n=200 ve n=500 için GA, TA ve RA yaklaşımları ile çözümler elde edilmiştir. Yapılan uygulamaya ait deneysel bilgiler Çizelge 3.4'den görülebilir. Bu çalışmada matematiksel modelin çözüm zamanındaki artış (ana işlemci zamanı) göz önünde bulundurularak, deneysel sonuçlar çizelgelenecek iş sayısına (n) bağlı olarak iki bölümde incelenmiştir:

1- Küçük boyutlu problemler (n=5, 20 ve 50) hem matematiksel modelle (tamsayılı programlama modeli) hem de sezgisel yaklaşımlarla (GA, TA9 ve RA) çözümlenerek değerlendirilmeler yapılmıştır.

2- Büyük boyutlu problemler (n=100, 200 ve 500) GA, TA#, RA ve RA* sezgisel yaklaşımlarının hepsi ile çözümlenerek değerlendirilmeler yapılmıştır.

Çözüm zamanlarının (CPU time) ortalaması iş sayıları için ayrı ayrı olmak üzere kısıtlayıcı faktöre (h) bağlı olarak Şekil 3.7’de verilmiştir. Şekil 3.7’den kısıtlayıcı faktör azaldıkça ve/veya iş sayısı (n) arttıkça, ortalama çözüm sürelerinin üstel olarak arttığı görülebilir. Küçük boyutlu problemler için, TA9 ve GA çözümlerinin daha kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Ayrıca ÇBZBA’nın ortak teslim tarihinden toplam E/G tamamlanma cezalarını önemli derecede azaltıcı etki yaptığı belirlenmiştir.

Büyük boyutlu problemler için, TA9 (GA çözüm sonucunu kullanan Tabu Arama) bütün büyük boyutlu problemlerde eniyi ve RA* (Rassal Arama ÇBZBA’sız) en kötü sonucu vermiştir. Murata vd. (1996) araştırmalarında akış tipi çizelgeleme problemleri için geleneksel sezgiseller içinde genetik algoritmanın eniyiye daha yakın performans gösterdiğini vurgulamışlardır. Ayrıca uygulaması yapılan GA başlangıç popülasyonu olarak TA# başlangıç çözümlerini TA9 hariç içermektedir. Bu bilgiler dikkate alınarak Çizelge 3.6 incelendiğinde beklendiği gibi GA’nın TA9 dışında TA ve RA yaklaşımlarından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca Çizelge 3.6’dan GA sıralamasına TA uygulanarak (TA9) çözümün yaklaşık %1 iyileştirilebildiği ve ÇBZBA’nın büyük boyutlu problemler için de çizelge cezalarını önemli derecede azaltıcı fonksiyonu olduğu anlaşılmıştır.

Ele alınan problem için KOBİ’de bir uygulama yapılmıştır. Uygulama için KOBİ’de gerekli inceleme ve tespitler yapıldıktan sonra bu problemin çözümüne yönelik olarak “Tamsayılı Programlama Modeli” geliştirilmiş ve Microsoft Office Excel’de arayüz tasarlanmıştır. Tasarlanan arayüzün farklı veriler için farklı renklerde olması, hangi renklerin hangi tip veriler için nasıl doldurulacağı açıklanması ve “SIRALA” butonuna basılarak sonucun kolayca görülebilmesi nedeniyle, bu arayüz KOBİ’deki kullanıcılara kullanım kolaylığı sağlamaktadır. KOBİ için ele alınan problemde geliştirilen model kullanılarak elde edilecek sıralamaya göre işlerin montaj hattına alınması ile kaynakların eniyi şekilde kullanılmış olacağı alternatif sıralamalarla karşılaştırılarak gösterilmiştir. Ayrıca bu tarz KOBİ’lerin ve KOBİ’lerdeki çalışanların çalışma hayatı ile ilgili problemlerine çözümler geliştirmek ve işlerini

kolaylaştırmak için yapılacak çalışmalar, teorik literatürle sanayi uygulamalarını birleştirecek ve sanayi işletmelerinin özellikle KOBİ'lerin gelişimine önemli katkılar sunacaktır.

izelgeleme problemlerinde öğrenme etkili işlem süreleri ve E/G tamamlanma performans ölçütünün dikkate alındığı çalışma sayısı sınırlı olduğundan bu alanda farklı çalışmalar yapılabilir. Ayrıca ikiden fazla makinenin bulunduğu akış tipi ortamlar için bu çalışmanın bir başlangıç noktası sağlayacağı düşünölmektedir. Bunların yanı sıra eniyi sonuçlardan bir alt sınır (lower bound) geliştirilerek ileride yapılacak çalışmalara referans oluşturulabileceği gibi ele alınan problem için yeni çözüm yaklaşımları ile uygulamalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdul-Razaq T. and Potts C., Dynamic programming state-space relaxation for single-machine scheduling, *Journal of Operational Research Society*, 39: 141-152, 1988.
- Acar N., *Tam Zamanında Üretim*, MPM Yayınları No:542, Ankara, 2002.
- Adamopoulos G.I. and Pappis C.S., Scheduling under a common due date on parallel unrelated machines, *European Journal of Operational Research*, 105: 495-501, 1998.
- Ahmadi R. and Bagchi U., Single machine scheduling to minimize earliness subject to deadlines, Working Paper, Department of Management, University of Texas, Austin, 86/86: 4-17, 1986.
- Alidaee B., Kochenberger G.A. and Ahmadian A., Minimization total absolute flow time deviation in single and multiple machine scheduling, *The Journal of the Operational Research Society*, 45 (9): 1077-1087, 1994.
- Allahverdi A., Gupta J.N.D. and Aldowaisan T., A review of scheduling research involving setup consideration, *OMEGA*, 27: 219-239, 1999.
- Aneja Y.P. and Nair K.P.K., Bicriterion transportation problem, *Management Science*, 25: 73-78, 1979.
- Aydilek H. and Allahverdi A., Two-machine flowshop scheduling problem with bounded processing times to minimize total completion time, *Computer and Mathematics with Application*, 59 (2): 684-693, 2010.
- Bachman A. and Janiak A., Scheduling Jobs with Position-Dependent Processing Times, *Journal of The Operational Research Society*, 55: 257-264, 2004.
- Bagchi U., Due date or deadline assignment to multi-job orders to minimize total penalty in the one machine scheduling problem, Presented at the ORSA/TIMS Joint National Conference, St. Louis, 210-218, 1987.
- Bagchi U., Sullivan R. S. and Chang Y.L., Minimizing mean squared deviation of completion times about a common due date, *Management Science*, 33: 894-906, 1987a.

- Bagchi U., Chang Y.L. and Sullivan R.S., Minimizing absolute and squared deviations of completion times with different earliness and tardiness penalties and a common due date, *Naval Research Logistics*, 34: 739-751, 1987b.
- Baker, K. R., *Introduction to Sequencing and Scheduling*, John Wiley and Sons, New York, 1974.
- Baker K.R. and Scudder G.D., Sequencing with earliness and tardiness penalties: A review, *Operations Research*, 38 (1): 22-36, 1990.
- Baker K.R., *Elements of sequencing and scheduling*, Dartmouth College, Hanover, 1997.
- Bank J. and Werner F., Heuristics algorithms for unrelated parallel machine scheduling with a common due date, release dates and linear earliness tardiness penalties, *Mathematical and Computer Modelling*, 33: 363-383, 2001.
- Bauman J. and Jozefowska J., Minimizing the earliness-tardiness costs on a single machine, *Computers&Operations Research*, 33: 3219-3230, 2006.
- Ben-Daya M. and Al-Fawzan M., A tabu search approach for the flow shop scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 109: 88-95, 1998.
- Biroğul S., *Genetik Algoritma Yaklaşımı İle Atölye Çizelgeleme*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2005.
- Biskup D., Single-machine scheduling with learning considerations, *European Journal of Operational Research*, 115: 173-178, 1999.
- Biskup D., A state-of-the-art review on scheduling with learning effects, *European Journal of Operational Research*, 188: 315-329, 2008.
- Biskup D. and Cheng T.C.E., Multiple-machine scheduling with earliness tardiness and completion time penalties, *Computers&Operations Research*, 26: 45-57, 1999.
- Biskup D. and Feldmann M., Benchmarks for scheduling on single/machine against restrictive and unrestrictive common due date, *Computers&Operation Research*, 28: 787-801, 2001.
- Biskup D. and Simons D., Common due date scheduling with autonomous and induced learning, *European Journal of Operational Research*, 159: 606-616, 2004.

- Celso M.H., Debora P.R. and Andre B.M., Minimizing earliness and tardiness penalties in a single-machine problem with a common due date, *European Journal of Operational Research*, 160: 190-201, 2005.
- Chang P.C., A branch and bound approach for single machine scheduling with earliness and tardiness penalties, *Computers&Mathematics with Applications*, 37: 133-144, 1999.
- Chang S.S. and Joo U.G., A single machine scheduling problem with earliness/tardiness and starting time penalties under a common due date, *Computers&Operations Research*, 19 (8): 753-766, 1992.
- Chen Z.L., Scheduling with batch setup times and earliness-tardiness penalties, *European Journal of Operational Research*, 96: 518-537, 1997.
- Chen P., Wu C.C. and Lee W.C., A bi-criteria two-machine flowshop scheduling problem with a learning effect, *Journal of The Operational Research Society*, 57: 1113-1125, 2006.
- Cheng T., Eniyi common due date with limited completion time deviation, *Computers&Operations Research*, 15 (2): 91-96, 1988.
- Cheng T.C.E., A heuristic for common due date assignment and job scheduling on Parallel Machines, *Journal of Operational Research Society*, 40: 1129-1135, 1989.
- Cheng T.C.E. and Chen Z.L., Parallel machine scheduling problems with earliness and tardiness penalties, *The Journal of the Operational Research Society*, 45 (6): 685-695, 1994.
- Cheng T.C.E. and Wang G., Single machine scheduling with learning effect considerations, *Annals of Operations Research*, 98: 273-290, 2000.
- Cheng B.W. and Chang C.L., A study on flowshop scheduling problem combining Taguchi experimental design and genetic algorithm, *Expert System with Application*, 32: 415-421, 2007.
- Cheng M.B., Sun S.J. and Yu Y., A note on flow shop scheduling problems with a learning effect on no-idle dominant machines, *Applied Mathematics and Computation*, 184: 945-949, 2007.
- Chou F.D. and Lee C.E., Two-machine flowshop scheduling with bicriteria problem, *Computers&Industrial Engineering*, 36 (3): 549- 564, 1999.

Cochran E.B., New concepts of the learning curve, The Journal of Industrial Engineering, 11: 317-327, 1960.

Coleman B.J., A simple model for optimizing the single machine early/tardy problem with sequence-dependent setups, Production and Operation Management, 1: 225-228, 1992.

Conway R.W. and Schultz A., The manufacturing progress function, The Journal of Industrial Engineering, 10: 39-54, 1959.

Çetinyokuş T. ve Gökçen H., Borsada göstergelerle teknik analiz için bir karar destek sistemi, Gazi Üniv. Müh. Fak. Der., 17 (1): 43-58, 2002.

Day G.S. and Montgomery D.B., Diagnosing the experience curve, Journal of Marketing, 47: 44-58, 1983.

De P., Ghosh J.B. and Wells C.E., A note on the minimization of mean squared deviation of completion times about a common due date, Management Science, 35: 1143-1147, 1989.

Du J. and Leung Y.T., Minimizing total tardiness on one machine is NP-hard, Mathematics of Operations Reserch, 15: 483-495, 1990.

Eilon S. and Chowdhury I., Minimizing waiting time variance in the single machine problem, Management Science, 23: 567-575, 1977.

Emmons H., Scheduling to a common due date on parallel uniform processors, Naval Research Logistics Quarterly, 34: 803-810, 1987.

Erdem A., Bakım Kısıtı Altında Genetik Algoritmalarla Üretim Çizelgeleme, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2008.

Eren T., Çok Ölçütlü Akış Tipi Çizelgeleme Problemleri İçin Çözüm Yaklaşımları, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2004.

Eren T. ve Güner E., Tek ve paralel makineli problemlerde çok ölçütlü çizelgeleme problemleri için bir literatür taraması, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 17 (4): 37-69, 2002.

Eren T. ve Güner E., Akış tipi çizelgeleme problemlerinde işe bağımlı öğrenme etkisi, K.H.O. Savunma Bilimleri Dergisi, 2 (2): 1-11, 2003.

Eren T. ve Güner E., Öğrenme etkili akış tipi çizelgelemede ortalama akış zamanının en küçüklenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 19 (2): 119-124, 2004.

- Eren T. and Güner E., Minimizing total tardiness in a scheduling problem with a learning effect, *Applied Mathematical Modelling*, 31: 1351-1361, 2007.
- Eren T. and Güner E., A bicriteria flowshop scheduling problem with a learning effect, *Applied Mathematical Modelling*, 32: 1719-1733, 2008.
- Feldman M. and Biskup D., Single-machine scheduling for minimizing earliness and tardiness penalties by meta-heuristic approaches, *Computers&Industrial Engineering*, 44: 307-323, 2003.
- Fisher M.L., A dual algorithm for the one-machine scheduling problem, *Mathematical Programming*, 11: 229-251, 1976.
- French S., *Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of The Job-Shop*, Ellis Horwood Limited, England, 1982.
- Fry T.D., Armstrong R.D. and Blackstone J.H., Minimizing weighted absolute deviation in single machine scheduling, *IIE Transactions*, 19: 445-450, 1987.
- Garey M.R., Tarjan R.E. and Wilfong G.T., One processor scheduling with symmetric earliness and tardiness penalties, *Mathematics of Operations Research*, 13: 330-348, 1988.
- Ghemawat P., Building strategy on the experience curve - a venerable management tool remains valuable - in the right circumstances, *Harvard Business Review*, 63 II: 143-149, 1985.
- Glover F., Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers and Operations Research*, 5: 533-549, 1986.
- Glover F., Tabu search-Part I, *ORSA Journal on Computing*, 1 (3): 190-206, 1989.
- Glover F., Tabu search-Part II, *ORSA Journal on Computing*, 2 (1): 4-32 1990.
- Glover F. ve Laguna, M., *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
- Goldberg D.E., *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Pub. Co., Massachusetts-USA, 1989.
- Gordon V., Proth J.M. and Chu C., A survey of the state-of-the-art of common due date assignment and scheduling research, *European Journal of Operational Research*, 139: 1-25, 2001.
- Gupta S. and Sen T., Minimizing a quadratic function of job lateness on a single machine, *Engineering Costs Production Economics*, 7: 181-194, 1983.

Gülcü A., Yapay Zeka Tekniklerinden Genetik Algoritma ve Tabu Arama Yöntemlerinin Eğitim Kurumlarının Haftalık Ders Programlarının Hazırlanmasında Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2006.

Hall N.G., Single and multi-processor models for minimizing completion time variance, *Naval Research Logistics Quarterly*, 33: 49-54, 1986.

Hall N. G. and Posner M.E., Earliness-tardiness scheduling problems I: Weighted deviation of completion times about a common due date, *Operation Research*, 39: 836-846, 1991.

Hall N.G., Kubiak W. and Sethi S.P., Earliness–tardiness scheduling problems II: Deviation of completion times about a restrictive common due date, *Operations Research*, 39 (5): 847-856, 1991.

Heizer J. and Render B., *Operations Management* (6. Edition), Prentice Hall, New Jersey, 2001.

Hendel Y. and Sourd F., An improved earliness-tardiness timing algorithm, *Computers&Operations Research*, 34 (10): 2931-2938, 2007.

Hino C.S., Ronconi D.P. and Mendes A.B., Minimizing earliness and tardiness penalties in a single-machine problem with a common due date, *European Journal of Operational Research*, 160: 190-201, 2005.

Holland J.H., *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, Michigan, 1975 (re-issued in 1992 by MIT Press).

İşler M.C., Çelik V. ve Toklu B., İki makine akış tipi çizelgelemede ortak teslim tarihinden mutlak sapmaların en küçüklenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 24 (2): 351-357, 2009a.

İşler M.C., Toklu B., Çelik V. ve Ersöz S., Öğrenme etkili tam zamanında çizelgeleme problemi ve KOBİ’de uygulama, *Int. J. Eng. Research&Development*, 1 (2): 29-33, 2009b.

İşler M.C., Toklu B. ve Çelik V., Öğrenme etkili erken/geç tamamlanma çizelgeleme problemleri için bir literatür araştırması, *Pamukkale Üniv. Müh. Fak. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15 (2): 227-252, 2009c.

Johnson SM., Eniyi two and three stage production schedules with set-up times included, *Naval Research Logistics Quarterly*, 1 (1): 61-68, 1954.

- Kanet J.J., Minimizing variation of flow time in single machine systems, *Management Science*, 27: 1453-1459, 1981a.
- Kanet J.J., Minimizing the average deviation of job completion times about a common date, *Naval Research Logistics Quarterly*, 28: 643-651, 1981b.
- Kellegöz T., Toplam Geç Bitirme Zamanının En Küçüklenmesi Performans Ölçütlü Permütasyon Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Çözümünde Genetik Algoritma Yaklaşımı, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2006.
- Keyser T. K. and Sarper H., A heuristic solution of the E/G problem with waiting costs and non-zero release times, *Computers&Industrial Engineering*, 21: 297-301, 1991.
- Koulamas C., Single machine scheduling with time windows and earliness/tardiness penalties, *European Journal of Operational Research*, 91: 190-202, 1996.
- Koulamas C. and Kyparisis G.J., Single-machine and two-machine flowshop scheduling with general learning function, *European Journal of Operational Research*, 178: 402-407, 2007.
- Kuo W.H. and Yang D.L., Minimizing the total completion time in a single-machine scheduling problem with a time-dependent learning effect, *European Journal of Operational Research*, 174: 1184-1190, 2006a.
- Kuo W.H. and Yang D.L., Single-machine group scheduling with a time-dependent learning effect, *Computers&Operations Research*, 33: 2099-2112, 2006b.
- Kuo W.H. and Yang D.L., Minimizing the makespan in a single machine scheduling problem with a time-based learning effect, *Information Processing Letters*, 97: 64-67, 2006c.
- Kuo W.H. and Yang D.L., Single machine scheduling with past-sequence-dependent setup times and learning effects, *Information Processing Letters*, 102: 22-26, 2007.
- Lapre' M.A., Mukkherjee A.S. and Van Wassenhove L.N., Behind the learning curve: linking learning activities to waste reduction, *Management Science*, 46: 597-611, 2000.
- Lauff V. and Werner F., Scheduling with common due date, earliness and tardiness penalties for multimachine problems: A survey, *Mathematical and Computer Modelling*, 40: 637-655, 2004.

- Lee C.Y., Danusaputro S. L. and Lin C.S., Minimizing weighted number of tardy jobs and weighted earliness-tardiness penalties about a common due date, *Computers&Operations Research*, 18: 379-389, 1991.
- Lee W.C., Wu C.C. and Sung H.J., A bi-criterion single-machine scheduling problem with Learning Considerations, *Acta Informatica*, 40: 303-315, 2004.
- Lee W.C. and Wu C.C., Minimizing total completion time in a two-machine flowshop with a learning effect, *International Journal of Production*, 88: 85-93, 2004.
- Lee W.C., Wu C.C. and Liu M.F., A single-machine bi-criterion learning scheduling problem with release times, *Expert Systems with Applications*, 36: 10295-10303, 2009.
- Leung J.Y.T., A dual criteria sequencing problem with earliness and tardiness penalties, *Naval Research Logistics*, 49: 422-431, 2002.
- Liao C.J. and Cheng C.C., A variable neighborhood search for minimizing single machine weighted earliness and tardiness with common due date, *Computer&Industrial Engineering*, 52: 404-413, 2007.
- Liman S.D. and Ramaswamy S., Earliness-tardiness scheduling problems with a common delivery window, *Operations Research Letters*, 15: 195-203, 1994.
- Liman S.D., Panwalkar S.S. and Thongmee S., Determination of common due window location in a single machine scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 93: 68-74, 1996.
- Lin B.M.T., Complexity results for single-machine scheduling with positional learning effects, *Journal of The Operational Research Society*, 58: 1099-1102, 2007.
- Lin S.W., Chou S.Y. and Ying K.C., A sequential exchange approach for minimizing earliness-tardiness penalties of single-machine scheduling with a common due date, *European Journal of Operational Research*, 177: 1294-1301, 2007.
- Lingo User's Guide, Lindo Systems Inc., Chicago, IL, 1999.
- Mani V., Chang P.C. and Chen S.H., Bi-criteria single machine scheduling problem with a learning effect: Aneja-Nair method to obtain the set of eniyi sequences, *Computers and Mathematics with Applications*, 58: 39-47, 2009.
- Mitchell M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, The MIT Press, London, 2002.

- Mondal S.A. and Sen A.K., Single machine weighted earliness-tardiness penalty problem with a common due date, *Computers&Operations Research*, 28: 649-669, 2001.
- Moore J.M., An n job one machine sequencing algorithm for minimizing the number of late jobs, *Management Science*, 15: 102-109, 1968.
- Mosheiov G., Scheduling problem with learning effect, *European Journal of Operational Research*, 132: 687-693, 2001a.
- Mosheiov, G., Parallel machine scheduling with learning effect, *Journal of The Operational Research Society*, 52: 1165-1169, 2001b.
- Mosheiov G. and Shadmon M., Minmax earliness-tardiness costs with unit processing time jobs, *European Journal of Operational Research*, 130: 638-652, 2001.
- Mosheiov G. and Sidney J.B., Scheduling with general job-dependent learning curves, *European Journal of Operational Research*, 147: 665-670, 2003.
- Mosheiov G. and Sidney J.B., Note on scheduling with general learning curves to minimize number of tardy jobs, *Journal of The Operational Research Society*, 56: 110-112, 2005.
- Murata T., Ishibuchi H. and Tanaka H., Genetic algorithms for flowshop scheduling problems, *Computers and Industrial Engineering*, 30 (4): 1061-1071, 1996.
- Nadler G. and Smith W.D., Manufacturing progress functions for types of processes, *International Journal of Production Research*, 2: 115-135, 1963.
- Öge M., Tam Zamanında (JIT) Sistemi ve Tekstil Sektöründe Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2001.
- Özmehmet Taşan S., Solving Simple and Mixed-Model Assembly Line Balancing Problems Using Hybrid Meta-Heuristic Approaches, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2007.
- Panwalkar S.S., Smith M.L. and Seidmann A., Common due date assignment to minimize total penalty for the one machine scheduling problem, *Operations Research*, 30: 391-399, 1982.
- Panwalkar S.S. and Rajagopalan R., Single-machine sequencing with controllable processing times, *European Journal of Operational Research*, 59: 298-302, 1992.

- Panwalkar S.S. and Liman S.D., Single operation earliness-tardiness scheduling with machine activation cost, *IIE Transactions*, 34: 509-513, 2002.
- Pinedo M., *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- Pinedo M. and Chao X., *Operation Scheduling with Applications in Manufacturing and Services*, Mc Graw Hill, New York, 1999.
- Rayward-Smith V.J., I. H. Osman, C.R. Reeves and G.D. Smith, *Modern Heuristic Search Methods*, John Wiley And Sons, New York, 1996.
- Reeves C.R., *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, McGraw-Hill Book Company, United Kingdom, 1995.
- Ribas I, Leisten R. and Framinan J.M., Review and classification of hybrid flowshop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective, *Computer&Operations Research*, 37 (8): 1439-1454, 2010.
- Rym M., Minimizing total earliness and tardiness on a single machine using a hybrid heuristic, *Computers&Operations Research*, 34: 3126-3142, 2007.
- Sakallı Ü.S. ve Birgören B., Döküm sanayiinde üretim planlama için bir doğrusal programlama arayüzü, *YAEM2004*, 154-156, 2004.
- Sakuraba C.S., Ronconi D.P. and Sourd F., Scheduling in a two-machine flowshop for the minimization of the mean absolute deviation from a common due date, *Computers&Operations Research*, 36 (1): 60-72, 2009.
- Sarper H., Minimizing the sum of absolute deviations about a common due date for the two-machine flow shop problem, *Applied Mathematical Modelling*, 19 (3): 153-161, 1995.
- Schaller J.E. and Gupta J.N.D., Single machine scheduling with family setups to minimize total earliness and tardiness, *European Journal of Operation Research*, 187: 1050-1068, 2008.
- Seidmann A., Panwalkar S.S. and Smith M.L., Eniyi assignment of due-dates for a single processor scheduling problem, *International Journal of Production Research*, 19 (4): 393-399, 1981.

- Shabtay D., Due date assignments and scheduling a single machine with a general earliness/tardiness cost function, *Computers&Operations Research*, 35: 1539-1545, 2008.
- Soroush S.M. and Fredendall L.D., The stochastic single machine scheduling problem with earliness-tardiness costs, *European Journal of Operational Research*, 77: 287-302, 1994.
- Sun H. and Wang, G., Parallel machine earliness and tardiness scheduling with proportional weights, *Computers&Operations Research*, 30: 801-808, 2003.
- Sundararaghavan P.S. and Ahmed M.U., Minimizing the sum of absolute lateness in single machine and multimachine scheduling, *Naval Research Logistics Quarterly*, 31: 325-333, 1984.
- Sundararaghavan P.S. and Kunnathur A.S., Single machine scheduling with start time dependent processing time: Some solvable cases, *European Journal of Operational Research*, 78 (3): 394-403, 1994.
- Szwarc W. and Mukhopadhyay S.K., Eniyi timing schedules in earliness-tardiness single-machine sequencing, *Naval Research Logistics*, 42: 1109-1114, 1995.
- Toksarı D., Öğrenme ve Bozulma Etkileri Altında Hazırlık Zamanlı Paralel Makineli Erken Tamamlanma/Gecikme Çizelgeleme Problemi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2008.
- Toksarı M.D. and Güner E., Parallel machine earliness/tardiness scheduling problem under the effects of position based learning and linear/nonlinear deterioration, *Computers&Operations Research*, 36 (8): 2394-2417, 2009.
- Toksarı M.D. and Güner E., The common due-date early/tardy scheduling problem on a parallel machine under the effects of time-dependent learning and linear and nonlinear deterioration, *Expert Systems with Applications*, 37: 92-112, 2010.
- Türker A.K., Üretim Planlama ve Kontrol Ders Notu, Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, 2003.
- Valente J.M.S. and Alves R.A.F.S., Filtered and recovering beam search algorithms for early/tardy scheduling problem with no idle time, *Computers&Industrial Engineering*, 48: 363-375, 2005.

- Valente J.M.S. and Gonçalves J.F., A genetic algorithm approach for the single machine scheduling problem with linear earliness and quadratic tardiness penalties, *Computers and Operations Research*, 36: 2707-2715, 2009.
- Vani V. and Raghavachari M., Deterministic and random single machine scheduling with variance minimization, *Operations Research*, 35: 111-120, 1987.
- Venezia I., On the statistical origins of the learning curve, *European Journal of Operational Research*, 19: 191-200, 1985.
- Ventura J.S., Kim D. and Garriga F., Single machine earliness-tardiness scheduling with resource-dependent release dates, *European Journal of Operational Research*, 142: 52-69, 2005.
- Wan G. and Yen B.P.C., Tabu search for single machine scheduling with distinct due windows and weighted earliness/tardiness penalties, *European Journal of Operational Research*, 142: 271-281, 2002.
- Wang J.B. and Xia Z.Q., Flow-shop scheduling with a learning effect, *Journal of The Operational Research Society*, 56: 1325-1330, 2005.
- Wang J.B., A Note on scheduling problems with learning effects and deteriorating jobs, *International Journal of Systems Science*, 37: 827-833, 2006.
- Wang J.B., Single-machine scheduling problems with the effects of learning and deterioration, *Omega*, 35: 397-402, 2007.
- Wang X. and Cheng T.C.E., Single-machine scheduling with deteriorating jobs and learning effects to minimize the makespan, *European Journal of Operational Research*, 178: 57-70, 2007.
- Wright T.P., Factors affecting the cost of airplanes, *Journal of The Aeronautical Sciences*, 3: 122-128, 1936.
- Wu C.C., Lee W.C. and Wang W.C., A two-machine flowshop maximum tardiness scheduling problem with a learning effect, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31: 743-750, 2007.
- Yağmahan B. ve Yenisey M.M., Akış tipi çizelgeleme problemi için KKE parametre eniyileme, *İTÜ Dergisi*, 5 (2): 133-141, 2006.

- Yano C. A. and Kim Y. D., Algorithms for a class of single-machine weighted tardiness and earliness problems, *European Journal of Operational Research*, 52: 167-178, 1991.
- Yelle L.E., The learning curve: Historical review and comprehensive survey, *Decision Science*, 10: 302-328, 1979.
- Zhao C.L., Zhang Q.L. and Tang H.Y., Machine scheduling problems with learning effects, *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, Series A: Mathematical Analysis*, 11: 741-750, 2004.
- Zeng W.X., Nagasawa H. and Nishiyama N., Single-machine scheduling for minimizing total cost with identical, asymmetrical earliness and tardiness penalties, *International Journal of Production Research*, 31 (7): 1611-1620, 1993.
- Zhu Z. and Heady R.B., Minimizing the sum of earliness/tardiness in multi-machine scheduling: a mixed integer programming approach, *Computers&Industrial Engineering*, 38: 297-305, 2000.

EKLER

EK-1. Tamsayılı Programlama Modelinin LINGO Kodu (n=5 İçin Örnek)

```
MODEL:
d=227.2;!Ortak teslim tarihi;
A=2;!Ortak erken tamamlanma birim cezası;
B=3;!Ortak geç tamamlanma birim cezası;
learning_rate=0.8;!Öğrenme oranı;
SETS:
  JOB / 1.. 5/; ! I = İşin numarası;
  POSITION / 1.. 5/; ! J = Pozisyon numarası;
  MACHINE / 1.. 2/; ! 2 makine var;

  LINK(JOB,POSITION):
    X; ! X( I, J, k) = 1 Eğer I işi k makinesinde j sırasında
    yapılır ise;

    LINK1(MACHINE,JOB):
      TIME; ! Her bir işin sırasıyla 1 ve 2 makinelerindeki işlem
      zamanı(alt alta);

    LINK2(POSITION):
      EARLINESS,!J pozisyonundaki iş için erken tamamlanma
      miktarı;
      TARDINESS;!J pozisyonundaki iş için geç tamamlanma miktarı;

    LINK3(POSITION,MACHINE):
      COMPLETE,! Her bir işin tamamlanma zamanı;
      IDLE,! Her bir işin işlemden sonra aylak bekleme zamanı;
      WAITING; ! Her bir işlemden önce bekleme zamanı;

ENDSETS

DATA: !İşlerin işlem zamanları;
      TIME = 47 44 91 35 80 !Sırayla 1. makine;
           53 82 42 50 44; !Sırayla 2. makine;

ENDDATA

n = @SIZE( JOB);
!Amaç Fonksiyonu;
MIN = @SUM( POSITION(J): (A*EARLINESS(J)+B*TARDINESS(J)) );

!Erken/Geç tamamlanma mikar kısıtı;
@FOR( POSITION( J):
  COMPLETE(J,2)=d-EARLINESS(J)+TARDINESS(J);
);

!Başlangıç zamanları kısıtları;
COMPLETE(1,1)=@SUM(JOB(I):(TIME(1,I)*X(I,1)))+IDLE(1,1);
COMPLETE(1,2)=COMPLETE(1,1)+@SUM(JOB(I):(TIME(2,I)*X(I,1)))+IDLE(1,2);

!Birinci makinede tamamlanma zamanı kısıtı;
@FOR(POSITION(J)|J#GT#1:
```

```

COMPLETE(j,1)=COMPLETE(j-1,1)+@SUM(JOB(I):
((TIME(1,I)*X(I,j))*(J^(@LOG(learning_rate)/@LOG(2)))))+IDLE(J,1);
);

!İkinci makinede tamamlanma zamanı kısıtı;
@FOR( POSITION( J)|J#GT#1:
COMPLETE(j,2)=@SMAX(COMPLETE(J,1),COMPLETE(j-1,2))+@SUM( JOB( I):
((TIME(2,I)*X(I,j))*(J^(@LOG(learning_rate)/@LOG(2)))));
);

!Kısıt 3.6 (Şekil 3.1 ile açıklanan);
@FOR( POSITION( J)|J#LT#n:
IDLE(J,1)+@SUM( JOB( I):
((TIME(1,I)*X(I,J+1))*(J^(@LOG(learning_rate)/@LOG(2)))))+WAITING(J+1,2)
=WAITING(j,2)+@SUM( JOB( I):
((TIME(2,I)*X(I,J))*(J^(@LOG(learning_rate)/@LOG(2)))))+IDLE(J,2);
);

!İşlerin uygun pozisyona atanma kısıtları;
@FOR( POSITION( J):
@SUM( JOB( I): X(I,J))=1;
);

@FOR( JOB( I):
@SUM( POSITION( J): X(I,J))=1;
);

!Pozitif değer alma kısıtı;
@FOR( POSITION( J):
EARLINESS(j)>=0;
TARDINESS(j)>=0;
COMPLETE(j,1)>=0; COMPLETE(j,2)>=0;
IDLE(j,1)>=0; IDLE(j,2)>=0;
WAITING(j,1)>=0; WAITING(j,2)>=0;
);

!0-1 değeri alma kısıtı;
@FOR( LINK: @BIN( X));

END

```

EK-2. KOBİ İçin Geliştirilen Tamsayılı Programlama Modelinin LINGO Kodu

MODEL:

```
SETS: ! Verilerin yerleri tanımlanıyor;
JOB /@OLE('C:\medikal2000.XLS')/:TIME1, TIME2, SIRA, A, B;
POSITION /@OLE('C:\medikal2000.XLS')/;
MACHINE /@OLE('C:\medikal2000.XLS')/;
OBJECTIVEVALUE /@OLE('C:\medikal2000.XLS')/:COST, d, LR1, LR2;
```

```
LINK(JOB, POSITION):
X;
```

```
LINK1(POSITION):
EARLINESS,
TARDINESS;
```

```
LINK2(POSITION, MACHINE):
COMPLETE,
IDLE,
WAITING;
```

ENDSETS

```
DATA: ! Veriler alınıyor;
TIME1 = @OLE('C:\medikal2000.XLS');
TIME2 = @OLE('C:\medikal2000.XLS');
d = @OLE('C:\medikal2000.XLS');
A = @OLE('C:\medikal2000.XLS');
B = @OLE('C:\medikal2000.XLS');
LR1 = @OLE('C:\medikal2000.XLS');
LR2 = @OLE('C:\medikal2000.XLS');
@OLE('C:\medikal2000.XLS')=SIRA;
@OLE('C:\medikal2000.XLS')=COST;
```

ENDDATA

```
n = @SIZE(JOB);
```

```
!Amaç Fonksiyonu;
```

```
MIN = COST(1);
```

```
COST(1)=@SUM(POSITION (J):
```

```
@SUM(JOB(I): (A(I)*X(I,J)*EARLINESS(J)+B(I)*X(I,J)*TARDINESS(J))));
```

```
!Sıralama kısıtı;
```

```
@FOR(JOB(I) | I#LE#n:
```

```
SIRA(I)=@SUM(POSITION(J): 0+@IF(X(I,J)#EQ#1, J, 0));
```

```
);
```

```
!Erken/Geç tamamlanma mikar kısıtı;
```

```
@FOR(POSITION(J):
```

```
COMPLETE(J,2)=d(1)-EARLINESS(J)+TARDINESS(J);
```

```
);
```

```
!Başlangıç zamanları kısıtı;
```

```
COMPLETE(1,1)=@SUM(JOB(I): (TIME1(I)*X(I,1)))+IDLE(1,1);
```

```
COMPLETE(1,2)=@SUM(JOB(I):
```

```
(TIME2(I)*X(I,1))+(TIME1(I)*X(I,1)))+IDLE(1,2);
```

```
!Birinci makinede tamamlanma zamanı kısıtı;
```

```
@FOR(POSITION(J) | J#GT#1:
```

```

COMPLETE (J, 1)=COMPLETE (J-1, 1)+@SUM (JOB (I) :
((TIME1 (I) *X (I, J)) * (J ^ (@LOG (LR1 (1)) /@LOG (2)))))+IDLE (J, 1);
);

!İkinci makinede tamamlanma zamanı kısıtı;
@FOR (POSITION (J) | J#GT#1:
COMPLETE (j, 2)=@SMAX (COMPLETE (J-1, 2), COMPLETE (J, 1))+@SUM (JOB (I) :
((TIME2 (I) *X (I, j)) * (J ^ (@LOG (LR2 (1)) /@LOG (2)))))+IDLE (J, 2);
);

!Kısıt 3.14 (Şekil 3.1 ile açıklanan);
@FOR (POSITION (J) | J#LT#n:
IDLE (J, 1)+@SUM (JOB (I) :
((TIME1 (I) *X (I, J+1)) * ((J+1) ^ (@LOG (LR1 (1)) /@LOG (2)))))+WAITING (J+1, 2)
=WAITING (J, 2)+@SUM (JOB (I) :
((TIME2 (I) *X (I, J)) * (J ^ (@LOG (LR2 (1)) /@LOG (2)))))+IDLE (J, 2);
);

!İşlerin uygun pozisyona atanma kısıtları;
@FOR (POSITION (J) :
@SUM (JOB (I) : X (I, J))=1;
);

@FOR (JOB (I) :
@SUM (POSITION (J) : X (I, J))=1;
);

!Pozitif değer alma kısıtı;
@FOR (POSITION (J) :
EARLINESS (j) >=0;
TARDINESS (j) >=0;
COMPLETE (j, 1) >=0; COMPLETE (j, 2) >=0;
IDLE (j, 1) >=0; IDLE (j, 2) >=0;
WAITING (j, 1) >=0; WAITING (j, 2) >=0;
);

!0-1 değeri alma kısıtı;
@FOR (LINK: @BIN (X));

END

!LINGO dönüş komutları;
TERSE
GO
QUIT

```

EK-3. LINGO ve MS Excel Bağlantı Makro Kodu

```

Sub LINGOSolve()
Dim iErr As Integer
iErr = LINGO.RunScriptRange("MODEL")
If (iErr > 0) Then
MsgBox ("Unable to solve model")
End If
End Sub

```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mesut Cemil İŞLER
Doğum Tarihi : 01.09.1979
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu : (Kurum ve Yıl)
Lisans : Uludağ Üniversitesi(Endüstri Mühendisliği)-2000
Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi(Endüstri Mühendisliği)-2004

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

-Kırıkkale Üniversitesi (Arş. Gör.) 2001-2006
-Devlet Malzeme Ofisi (Mühendis) 2006-2010
-Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı (İş Müfettiş Yardımcısı) 2010-...

Yayımları (SCI) :

-İşler M.C., Çelik V. ve Toklu B., İki Makine Akış Tipi Çizelgelemede Ortak Teslim Tarihinden Mutlak Sapmaların En Küçüklenmesi, Gazi Ün. Müh. Mim. Fak. Der., 24(2), 351-357, 2009.

Yayımları (Diğer) :

-İşler M.C. ve Türker A.K., Portföy Yönetiminin Karar Sürecinde Uzman Sistem Yaklaşımı, Sunumlu Bildiri, YAEM/2004, 529-531, 2004.
-İşler M.C., Türker A.K., Ersöz S., Yüzükırmızı M. ve Arslan M., Portföy Yönetimi ve Hisse Senedi Seçiminde Bir Karar Destek Sistemi, Int. J. Eng. Research&Development, 1(1), 28-34, 2009.
-İşler M.C., Toklu B. ve Çelik V., Öğrenme Etkili Erken/Geç Tamamlanma Çizelgeleme Problemleri İçin Bir Literatür Araştırması, Pamukkale Ün. Müh. Fak. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(2), 227-252, 2009.
-İşler M.C., Toklu B., Çelik V. ve Ersöz S., Öğrenme Etkili Tam Zamanında Çizelgeleme Problemi ve KOBİ’de Uygulama, Int. J. Eng. Research&Development, 1(2), 29-33, 2009.

Araştırma Alanları :

-Üretim Planlama
-Portföy Yönetimi
-Kalite Kontrol
-İktisat Politikası
-İş Güvenliği