Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.
Cilt 17, No 4, 37-69, 2002 Vol 17, No 4, 37-69, 2002

TEK VE PARALEL MAKİNALI PROBLEMLERDE ÇOK ÖLÇÜTLÜ ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ İÇİN BİR LİTERATÜR TARAMASI

Tamer EREN* ve Ertan GÜNER**
* Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi, 71450 Kırıkkale, teren@mmf.gazi.edu.tr
** Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe, 06570 Ankara, ertan@mmf.gazi.edu.tr

ÖZET

Çizelgeleme problemleri ile ilgili gerçek uygulamada karar vericiler genellikle birden fazla ölçütün en iyilenmesine çalışırlar. Ancak tek bir ölçütle ilişkili olarak en iyi değeri veren bir çözüm, birden fazla ölçüt söz konusu olduğunda aynı sonucu vermeyebilir. Bu nedenle karar verme sürecinde birden fazla ölçüt dikkate alındığında ölçütler arasında ödünleşimler söz konusu olur. Çizelgeleme literatüründe çok ölçütlü çalışmalar, tek ölçütlü çalışmalar ile kıyaslandığında çok daha azdır. Bu çalışmada, tek makinalı ve paralel makinalı problemler, çok ölçütlü, deterministik ve stokastik çizelgeleme problemleri ele alınarak bir literatür taraması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sıralama, çizelgeleme, çok ölçüt, eniyileme, literatür taraması.

A LITERATURE SURVEY FOR MULTICRITERIA SCHEDULING PROBLEMS ON SINGLE AND PARALLEL MACHINES

ABSTRACT

Decision makers try to optimize more than one criteria in real-life problems dealing with the operations scheduling. But, the best solution value related to one performance measure, may not be good when considering more than one performance measurement. In this case, in the decision making process when considered more than one performance measure, some trade-offs take place among the performance measures. In this study, considering the multicriteria, deterministic and stochastic scheduling problems on the one machine and parallel machines, a literature survey is presented.

Keywords: Sequencing, scheduling, multicriteria, optimization, literature survey.

1. GİRİŞ

Çizelgeleme, imalat ve servis endüstrilerinde çok önemli role sahip bir karar verme prosesidir. Bir firmada çizelgeleme fonksiyonu, matematiksel teknikler veya sezgisel yöntemler kullanarak sınırlı kaynakların görevlere tahsis edilmesi işlemini gerçekleştirir [1,2]. Kaynakların uygun olarak atanması ile firmanın amaç ve hedeflerini eniyi şekilde ulaşması sağlanır. Çizelgeleme literatürü; parametrelerin belirgin (deterministik) olduğu durumdan belirsiz (stokastik) olduğu duruma, tek makinalıdan çok makinayı geliş sürecinin durağandan (statikten) dinamiğe değiştiği çeşitli problem yapılarını kapsar. Birden fazla ölçütün bulunduğu çizelgeleme çalışmaları son dönemlerde gittikçe artmıştır [3,4]. Ancak bu tür problemlerin çözümü tek ölçütlü problemler kadar kolay değildir. Çünkü birbirleri ile çelişen amaçların aynı anda eniyilendiğinden tek bir çizelgeyi oluşturmak oldukça zordur. Bu problem, çok amaçlı karar verme problemidir.

Çizelgeleme problemleri kombinatoryal eniyileme problemleri sınıfından olduğu için eniyi çözümlerini bulmak oldukça zordur. Genellikle küçük boyutlu ve tek ölçütlü problemler için eniyi çözümler bulunabilir. Tek makinalı iki ölçütlü bir çizelgeleme problemi için Van Wassenhove ve Gelders [5], (pseudo-polinom algoritma) ve Cheun ve Bulfin [6] tarafından (polinom algoritma) iki algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmaların her ikisi de iki ölçütlü problem için etkin çözüm seti üretir. Van Wassenhove ve Gelders [5]'in yaklaşımı ile 50 işe kadar olan problemlerin çözümü gösterilmiştir.

Dileepan ve Sen [7], Sen ve Gupta [8] ve Sen ve diğerleri [9] yaptıkları çalışmalarda parametrik yaklaşım kullanarak tüm etkin çözümlerin üretilebileceğini göstermişlerdir.

Çok ölçütlü problemler daha karmaşık olduğu için bu konudaki literatür tek ölçütlülere göre oldukça azdır. Fakat bir çok uygulamada bir çizelgenin değişik ölçütlere göre iyi olup olmadığının ölçülmesinde yarar vardır. Eniyi çözümlerin bulunmadığı durumda, karar vericiye değişik alt eniyi çözümleri sunmak esneklik sağlar.

Çok ölçütlü problemler için geniş çaplı dört tarama makalesi yayınlanmıştır.

İki ölçütlü statik çizelgeleme ile ilgili Dileepan ve Sen [4], tarafından yapılan çalışmada on altı makale incelenmiştir. Çalışmada, çizelgeleme problemlerini iki sınıfa ayırmışlardır. Birinci sınıfta, ölçütlerden bir tanesi amaç fonksiyonu olarak alınırken diğeri kısıt olarak alınmakta, ikinci sınıfta ise, çizelge uygun olmak şartıyla her iki ölçütte amaç fonksiyonunu oluşturmaktadır.

Çok ölçütlü tek makinalı çizelgeleme üzerinde bir başka çalışma Fry ve diğerleri [10], tarafından yapılmıştır.

Nagar ve diğerleri [11] ise tek ve çok makinalı sistemlerde yapılan iki ve çok ölçütlü çizelgeleme çalışmalarına ait bir literatür taraması yapmışlardır. Çalışmalarında bir sınıflandırma şeması geliştirerek çalışmaları değerlendirmişlerdir.

T'kindt ve Billaut [12], çalışmalarında çok ölçütlü çizelgeleme problemlerin çözümünde çok amaçlı eniyileme teorisi bağlantısına işaret ederek, karar analizi kavramlarına göre üstesinden gelinmesi mümkün çok ölçütlü çizelgeleme problemlerinin çözümü için genel bir yapı verilmiştir.

Bu çalışmada tek ve paralel makinalı sistemlerde şimdiye kadar yapılmış iki ve çok ölçütlü problemlere ilgili deterministik ve stokastik çalışmalar incelenmiştir. İkinci bölümde çizelgeleme problemlerinin karmaşıklığı ve kullanılan çözüm yöntemleri, üçüncü bölümde iki ve çok ölçütle ilgili yapılmış olan çalışmalar tartışılmıştır. Son bölümde ise sonuç ve genel değerlendirme yapılmıştır.

2. ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI VE KARMAŞIKLIĞI

2.1. Çizelgeleme Problemlerinin Çözüm Yaklaşımları

Çizelgeleme problemlerinin çözüm yaklaşımları, problem yapısı ve atölye şekline bağlı olarak değişir.

Problem 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 [1].

Atölye şekli: Sisteme gelen işler tek bir işleme ihtiyaç duyuyor ise buradaki problem *tek makinalı çizelgeleme problemi*dir ve işlerin hangi sırada yapılacağının belirlenmesine çalışılır. Paralel makinalı problemlerde ise sisteme gelen işler mevcut makinaların herhangi birinde yapılabilir. Seri akışlı ve karmaşık akışlı problemlerde ise atölyeye gelen işler birden fazla işleme ihtiyaç duyar. Seri akışta tüm işlerin rotası aynı iken karmaşık akışlı problemlerde her bir işin rotası farklıdır[1]. Bu çalışmada tek ve paralel makinalı ortamlara ait çok ölçütlü çizelgeleme problemleri incelenecektir. Çünkü bu ortamlara ait çizelgeleme teorisi çok makinalı teorinin basamağını oluşturur.

Araştırmacılar dal-sınır [8], dinamik programlama [13] ve ödünleşim eğrileri [14] ve iş çiftlerinin yer değiştirmesi tekniklerini çizelgeleme problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanmışlardır. Bu teknikler, çizelgeleme problemlerinin de dahil olduğu çok geniş sayıdaki kombinatoryal problemlerin çözümünde dikkate değer başarıya sahip bulunmaktadır.

Dal-sınır ve dinamik programlama tekniklerinin her ikisi de birerleme teknikleridir. Bu teknikler belli kısıtlayıcı kuralları akılcı bir şekilde uygulayarak çok sayıda aday çözümü elimine ederler. Ancak bu iki teknikte büyük boyutlu problemler için etkin değildir. Dinamik programlamada durum değişkenlerinin sayısı artarken problemleri çözmek için gereken işlemlerde artar ve bu özellik büyük boyutlu problemlerin çözümünde dinamik programlama yaklaşımının kullanımını kısıtlar.

Dal-sınır yaklaşımında, çözüm zamanları farklı veri setlerine göre önemli derecede değişkenlik gösterir. Dallanan değişken ile sınırlama yaklaşımının seçimi algoritmanın performansını önemli derecede etkiler.

Eniyi çözümlerin elde edilmesindeki zorluk dolayısı ile çok sayıda problem için özel sezgisel teknikler geliştirilmiştir. Bu sezgiseller, çözüm kalitesi ve hesaplama karmaşıklığı arasındaki ödünleşimleri dikkate alacak şekilde tasarlanmıştır.

Bir çok araştırmacı, çizelgeleme problemlerinin değişik versiyonları için tamsayılı programlama modelleri geliştirmişlerdir. 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 etkin bir şekilde çözmede başarılı değildir.

Ancak bu tür formülasyonların bir avantajı birden fazla ölçütü tek bir amaç fonksiyonu altında birleştirebilir. Diğer bir yaklaşım ise tamsayılı programlamaya göre modellenmiş bir problemi tamsayı kısıtı kullanmadan çözmektir. Böylece mevcut doğrusal programlama algoritmalarının kullanımı mümkün olur. Bu algoritmalar aşırı hafızaya ihtiyaç duymaksızın büyük boyutlu problemleri çözebilir. Ancak bu tür bir yaklaşımın dezavantajı tamsayı olmayan çözümler en yakın tamsayıya yuvarlatılmak zorunda kalınır. Bir çok durumda eniyi çözümlerle karşılaştırıldığında bu yuvarlamanın kötü çözümlere yol açtığı gösterilmiştir[15-18].

Son yıllarda yeni sezgisel teknikler geliştirilmiştir. Bu sezgiseller; tavlama benzetimi [19], tabu arama [20-23] ve genetik algoritma [24] gibi yaklaşımlardır. İlk çıktığında tavlama benzetimi diğer iki metoda göre daha çok kullanılmışsa da Jones ve diğerleri [25], yaptıkları çalışmada, çok amaçlı karar verme problemleri için kullanılan sezgisel tekniklerden büyük bir bölümünün genetik algoritmalar ile yapıldığını göstermişlerdir.

Çizelgeleme problemlerinin karmaşıklığının analizi takip eden bölümde açıklanacaktır. Ayrıca bu çalışmada değerlendirilecek çok ölçütlü problemlere ait karmaşıklık elde edilen sonuçlara göre değerlendirilecektir.

2.2. Çizelgeleme Problemlerinin Karmaşıklığı

Çizelgeleme problemleri kombinatoryal 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 [26,27].

Cheun ve Bulfin [28], yaptıkları çalışmada tek makinalı çok ölçütlü çizelgeleme probleminin karmaşıklığını incelemiştir. Çalışmalarında ikincil ve iki ölçütlü problemlerin karmaşıklığına ait gösterdikleri sonuçlar Tablo 1 ve 2'de verilmiştir.

Tablo 1. İkincil ölçüt problemlerin karmaşıklığı

Birincil Ölçüt	İkincil Ölçüt						
	$T_{\max}$	$\sum F$	$\sum wF$	$\sum U$	$\sum wU$	$\sum T$	$\sum wT$
$T_{\max}$	-	*P*	*NP-zor*	*0*	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*
$\sum F$	*P*	-	-	*P*	*P*	*P*	*P*
$\sum wF$	*P*	-	-	*P*	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*
$\sum U$	*0*	*NP-zor*	*NP-zor*	-	-	*0*	*NP-zor*
$\sum wU$	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*	-	-	*NP-zor*	*NP-zor*
$\sum T$	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*	-	-
$\sum wT$	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*	-	-

Tablo 2. İki ölçütlü problemlerin karmaşıklığı

Birinci Ölçüt	İkinci Ölçüt						
	$T_{\max}$	$\sum F$	$\sum wF$	$\sum U$	$\sum wU$	$\sum T$	$\sum wT$
$T_{\max}$	-	*P*	*NP-zor*	*0*	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*
$\sum F$	-	-	-	*NP-zor*	*NP-zor*	*0*	*NP-zor*
$\sum wF$	-	-	-	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*	*NP-zor*
$\sum U$	-	-	-	-	-	*0*	*NP-zor*
$\sum wU$	-	-	-	-	-	*NP-zor*	*NP-zor*
$\sum T$	-	-	-	-	-	-	-
$\sum wT$	--	-	-	-	-	-	-

2.3. Performans Ölçütü

Eğer çizelgeleme amacı iş tamamlanma zamanlarının azalmayan bir fonksiyonu ise, performans ölçütü düzenlidir. Örneğin iş akış zamanı *(F)*, maksimum tamamlanma zamanı (C_{max}) ve gecikme tabanlı performans ölçütleri düzenleyici ölçütlerdir. Çok sayıda çizelgeleme problemleri, düzenleyici performans ölçütleri için yapılmıştır. En çok kullanılan ölçütler iş akış zamanı ve gecikme ile ilgili olanlarıdır. Gecikme tabanlı amaçlar için eniyi çözümleri bulmak en zor problem tipidir. Tam zamanında üretim felsefesinin ortaya çıkması ile düzenli olmayan ölçütlere olan ilgiyi arttırmıştır. Düzenli olmayan performans ölçütleri genellikle iş tamamlanma zamanlarının monoton olmayan fonksiyonlarıdır. Düzenli olmayan performans ölçütleri konusu araştırmacıları çizelgeleme problemleri için tamamen yeni metodolojiler geliştirmeye yöneltmiştir. Bir çok literatür taraması, tamamen düzenli olmayan performans ölçütleri konusunda yapılmıştır [15,16,18,29-43]. Örneğin, teslim tarihlerinde daha önce tamamlanana işlere ait cezalar olması durumunda erken tamamlanma ölçütü düzenli olmayan bir ölçüttür. Literatürde geniş bir şekilde yer alan tamamlanma zamanının erken ve geç bitmesi (earliness/tardiness) yani E/T problemleri bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur (bu problemler ayrı bir sınıftır).

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada tek ve paralel makinalı sistemlerde çok ölçütlü çizelgeleme problemleri dikkate alınmıştır. Paralel makinalı sistemlerde sisteme gelen işler tek makinalı sistemde olduğu gibi tek bir işleme ihtiyaç duyar. Ancak gelen işler *m* paralel işleyicinin herhangi birinde yapılabilir. Paralel makinada da işlem ihtiyacı tek olduğu için bu çalışmanın kapsamı içine alınmıştır.

İki ölçütlü problemler, ikincil ölçütlü ve iki ölçütlü problemler olmak üzere iki açıdan ele alınmaktadır. İkincil ölçütlü problemlerde ölçütler birincil ve ikincil olarak ayrılmakta önce birincil ölçüt ikincil ölçüt ihmal edilerek eniyilenmekte, sonra ikincil ölçüt birincil ölçütün performansını azaltmama kısıtı altında eniyilenmektedir[44]. C_1, birincil ölçütü C_2 ise ikincil ölçütü göstermek üzere $n\ /1/\ C_2 : C_1$ şeklinde ifade edilir. İki ölçütlü problemlerde ise iki farklı ölçüt aynı anda eniyilenir ve $n\ /1/\ C_2 , C_1$ şeklinde ifade edilir [45]. Bu eniyileme sonucunda etkin çözümlerin bir seti elde edilir. Etkin çözüm ise, hiçbir ölçütün etkinliğinin azalmaksızın arttırılamadığı bir çözümdür [46]. İki ölçütlü çizelgeleme Cheun ve Bulfin [6] ile De ve diğerleri [47] iki ölçütlü çizelgeleme problemlerini incelemişlerdir.

3.1. Tek Makinalı Problemler

Literatüre bakıldığında yapılan çalışmalar daha çok tek makinalı problemler üzerinde yoğunlaşmış olup paralel makinalı çalışmalar oldukça azdır. Çalışmalar, deterministik ve stokastik olmak üzere iki kısımda incelenecektir. Çalışmada kullanılan notasyonlar Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Çizelgelemedeki temel notasyonlar

veriler	n	iş sayısı	
	p_i	i. işin işlem zamanı	
	d_i	i. işin teslim tarihi	
	s_i	i işinin istenilen başlama zamanı	
	r_i	i işinin işlem için hazır olma zamanı	
	F_i	i işinin akış zamanı	
kısıtlar	*pmtn*	işler kesintiye uğrayabilir ve sonra kaldığı yerden tekrar başlar	
	nmit	makina boş tutulmasına izin veriliyor	
değişkenler	C_i	i. işin tamamlanma zamanı	
	E_i	i. işin erken bitmesi	$E_i = \max(0, d_i - C_i)$
	L_i	i. işin gecikmesi	$L_i = C_i - d_i$
	T_i	i. işin geç bitmesi	$T_i = \max(0, C_i - d_i)$
	U_i	i işinin gecikme durumu	$U_i = \{1 \quad C_i > d_i, 0 \quad dd$
	n_T	toplam geciken iş sayısı	$n_T = \sum_{i=1}^{n} U_i$
ölçütler	f_{max}	maliyet fonksiyonu	
	C_{max}	maksimum tamamlanma zamanı	$C_{\max} = \max_{i=1,\ldots,n}(C_i)$
	L_{max}	maksimum gecikme	$L_{\max} = \max_{i=1,\ldots,n}(L_i)$
	L_{min}	minimum gecikme	$L_{\min} = \min_{i=1,\ldots,n}(L_i)$
	T_{max}	maksimum geç bitirme	$T_{\max} = \max_{i=1,\ldots,n}(T_i)$
	E_{max}	maksimum erken bitirme	$E_{\max} = \max_{i=1,\ldots,n}(E_i)$
	$\overline{F}$ $(w\overline{F})$	ortalama akış zamanı (ortalama ağırlıklı akış zamanı)	$\overline{F} = \sum_{i=1}^{n} F_i / n$, $\left(w\overline{F} = \sum_{i=1}^{n} wF_i / n \right)$
	$\overline{T}$ $(w\overline{T})$	ortalama geç bitirme (ortalama ağırlıklı geç bitirme)	$\overline{T} = \sum_{i=1}^{n} T_i / n$, $\left(w\overline{T} = \sum_{i=1}^{n} wT_i / n \right)$
	$\overline{E}$ $(w\overline{E})$	ortalama erken bitirme (ortalama ağırlıklı erken bitirme)	$\overline{E} = \sum_{i=1}^{n} E_i / n$, $\left(w\overline{E} = \sum_{i=1}^{n} wE_i / n \right)$
	$\overline{U}$ $(w\overline{U})$	ortalama geciken iş (ortalama ağırlıklı geciken iş)	$\overline{U} = \sum_{i=1}^{n} U_i / n$, $\left(w\overline{U} = \sum_{i=1}^{n} wU_i / n \right)$

3.1.1. Deterministik Çalışmalar

Deterministik çok ölçütlü problemler akış zamanı ile ilgili olanlar, teslim tarihi ile ilgili olanlar ve diğer çalışmalar olmak üzere üç kısımda incelenecektir.

3.1.1.1. Akış zamanı ile ilgili çalışmalar

Ortalama akış zamanı ve maksimum geç bitirme

Bu ölçütlerle ilgili ilk önemli çalışma Smith [48] tarafından yapılmıştır. Smith, $n\ /1/\ \overline{F} : T_{\max} = 0$ problemini çözmüştür. Smith'in algoritması şöyledir:

Adım 1: İşler EDD (en küçük teslim tarihi sırası) kuralına [49] göre sıralanır. $d_{i(1)} \leq d_{i(2)} \leq \ldots \leq d_{i(n)}$. Bu çizelgeye göre bütün işlerin zamanında tamamlandığı varsayılır.

Adım 2: Aşağıdaki şartları sağlayan k işi son pozisyona atanır.

$$\sum_{j=1}^{n} p_i - d_k \leq 0$$

$p_k \geq p_i$, bütün i işleri $\sum_{j=1}^{n} p_j - d_i \leq 0$ kısıtını sağlamak üzere yerleştirilmeli.

Adım 3: Son pozisyona atanan iş çizelgeden çıkartılır ve bütün bu işler sıralanana kadar Adım 2'ye dönülür.

Heck ve Roberts [50] ise $n\ /1/\ \overline{F} : T_{\max}$ problemini çözerken Smith [48] algoritmasından faydalanmışlardır. $T_{\max} = 0$ olma durumu yerine maksimum geç kalma sınırını koymuşlardır. Smith [48] algoritmasındaki Adım 1; $\sum_{j=1}^{n} p_i - d_k \leq T_{\max}$ olarak değiştirilmiştir.

Çizelgelemede etkin çözüm kavramı ilk kez Van Wassenhove ve Gelders [5] tarafından ortaya konmuştur. $n\ /1/\ \overline{F}, T_{\max}$ problemini çözmek için önce herbir işin teslim tarihini d_i, yeni teslim tarihleri $d_i = d_i + \Delta$ ile yer değiştirilerek $n\ /1/\ \overline{F}, T_{\max} = 0$ problemini çözmüşlerdir. Buradaki Δ değeri SPT (en küçük işlem sırası) kuralına göre belirlenen çizelgedeki $T_{\max}$ değerinden (bütün etkin çözümler arasındaki en büyük $T_{\max}$), EDD kuralına göre belirlenen çizelgedeki $T_{\max}$ değerine (bütün etkin çözümler arasındaki en küçük $T_{\max}$) kadar düşürülerek belirlenmektedir. Daha sonra Smith [48] algoritmasının bir düzenlemesi kullanılarak her bir Δ için $n/1/\overline{F}, T_{\max}=0$ problemi çözülmekte, her bir Δ değerine göre belirlenen $n/1/\overline{F}, T_{\max}=0$ probleminin eniyi çözümü, $n/1/\overline{F}, T_{\max}$ probleminin etkin bir çözümünü oluşturmaktadır.

Van Wassenhove ve Baker [51], aynı problemi ödünleşim eğrisi ile çözmüştür.

Amaç fonksiyonu olarak $T_{\max}$ ve $\overline{F}$'nın doğrusal bir birleşiminin yer aldığı problemi Sen ve Gupta [8] incelemiştir. Bu problemde SPT ve EDD sıralaması aynı sıralamayı veriyor ise bu sıra eniyi sıralamadır. Ancak SPT ve EDD sırası birbirinden farklı olduğunda problemin çözümü için Sen ve Gupta [8] tarafından geliştirilen algoritma Townsend [52]'in tek ölçütlü bir çizelgeleme için geliştirdiği algoritmaya benzer bir algoritmadır. Ayrıca Sen ve Gupta [8]'nın belirledikleri bu doğrusal birleşim yaklaşımı, Van Wassenhove ve Gelders [5]'ın algoritması ile bulunan her etkin noktayı belirleyecek bir özelliğe sahip olması ilginçtir.

Nelson ve diğerleri [53], $n/1/T_{\max}, \overline{F}$ problemi için Van Wassenhove ve Gelders [5] algoritmasına benzer bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritmanın diğerlerinden farkı, Δ değerinin azalması ile ilgilidir. Van Wassenhove ve Gelders [5] algoritmalarında Δ değerini birer birim azaltırken bu algoritmada Δ değeri bir bir ε değeri kadar azaltılmaktadır. Bütün p_i ve d_i değerleri tamsayı değer ise $\varepsilon \leq 1$ değer almakta, aksi takdirde $\varepsilon \leq 0.1$ olmaktadır.

John [14], akış zamanı ve maksimum gecikmeyi ($n/1/\overline{F}, T_{\max}$) enküçükleme problemini ödünleşim eğrisiyle çözmüştür. Çalışmasında 150 işe kadar problemin sonuçlarını göstermiştir.

Liao ve diğerleri [54], $n/1/\overline{F}, T_{\max}$ problemini incelemişler. Problemde Van Wassenhove ve Baker [51] algoritmasını geliştirerek, 100 işe kadar olan problemi çözmüşlerdir.

Hoogeveen ve Van de Velde [55], aynı problemin polinom zamanda çözülebileceğini göstermiştir.

Köksalan [56], toplam akış zamanı ve maksimum gecikme problemini çözmek için sezgisel bir yaklaşım geliştirmiş ve 100 işli 450 problemi çözerek sonuçları göstermişlerdir.

Ağırlıklı ortalama akış zamanı ve maksimum geç bitirme

Burns [57], maksimum gecikme zamanı kısıtı altında ağırlıklı tamamlanma zamanı problemini incelemiştir. Problemlerinde Smith [48] ve Heck ve Roberts [50] yaklaşımlarından yararlanmışlardır. Problemi aşağıdaki şekilde ifade etmişlerdir:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^{n} w_i C_i$$

$$\text{Kısıt} \quad \sum_{j=1}^{i} p_j - d_i \leq T \qquad i = 1, 2, ..., n$$

Bansal [58], $n\ /1/\ w\overline{F} : T_{\max}$ probleminin çözümünü kolaylaştırmak için bazı eliminasyon kuralları kullanarak mutlak eniyi sonucu bulan bir dal sınır algoritması vermiştir.

Miyazaki [59], $n\ /1/\ w\overline{F} : T_{\max}$ problemin incelemiştir. Problemi;

$$\text{Min} \quad \overline{F}_w = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i F_i$$

$$\text{Kısıt} \quad \sum_{j=1}^{i} p_j - d_i \leq T^* \qquad i = 1, 2, ..., n$$

$$T^* \geq \min_S T_{\max}(S)$$

şeklinde modellemişlerdir. Burada T^*, $T_{\max}$'ın belirlenen bir değeri aşmama kısıtı altında problemi inceleyerek yerel eniyi sonuç sağlayan gerek bir şart gösterip, bu temel üzerinde mutlak eniyi sonuç veren etkin bir algoritmayı Smith [48] algoritmasını geliştirerek 15 işe kadar çözüp sonuçları sunmuştur.

Shanthikumar ve Buzacott [60], büyük boyutlu bir çizelgeleme problemini, iki veya daha fazla küçük boyutlu problemlere ayrıştıracak bir koşul gösterip, bu ayrıştırma yaklaşımının çizelgeleme problemlerine uygulanabilirliğini $n\ /1/\ w\overline{F} : T_{\max} = 0$ problemi için göstermişlerdir. Eniyi çizelgeyi elde etmek için bu ayrıştırma prensibini birleştiren bir dal sınır algoritması geliştirmiştir. Geliştirilen bu algoritmada orjinal problemlerdeki her bir işin teslim tarihi d_i, yeni teslim tarihi d_i' ile yer değiştirerek $(d_i' = d_i + T_{\max})$, $n\ /1/\ w\overline{F} : T_{\max}$ probleminin çözümünü gerçekleştirilmiştir.

Potts ve Van Wassenhove [61] yine aynı problemi incelemiş ve Bansal [58]'ın dal sınır algoritmasında kullandığı alt sınırdan hesaplama açısından daha iyi olan bir alt sınır ile ilave baskınlık kriterleri bularak, Bansal [58]'ın bulduğu eniyileme yöntemi geliştirmişlerdir.

Posner [62] ise, aynı problemle ilgili olarak işler arasında öncelik ilişkilerini ilave etmiş, bu özellikleri ve daha dar bir alt sınırı, bir dal sınır çözüm yönteminde birleştirmiştir.

Chand ve Schneeberger [63], $n\ /1/\ w\overline{F} : T_{\max} \leq T$ problemini aşağıdaki şekilde modellemişlerdir.

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^{n} w_i C_i$$

$$\text{Kısıt} \quad C_i - d_i \leq T \qquad i = 1, 2, ..., n$$

Problemle ilgili olarak Smith [48] algoritmasını analiz ederek bu algoritmanın eniyi çözümü garantilediği problemin üç özel durumunu incelemiştir. Ayrıca Smith [48] algoritmasının en kötü durum analizini yaparak amaç fonksiyonu değerindeki nispi artışın en kötü durumda sınırlanmadığını göstermişlerdir.

Bagchi ve Ahmedi [64], Posner [61]'in işlerin bölünmesi ile ilgili belirlediği kuralı düzenleyerek Posner [61]'in sınırını geliştirmişlerdir.

Ortalama akış zamanı ve geciken iş sayısı

Emmons [65], geciken iş sayısının en az olması kısıtı altında toplam akış zamanını enküçükleme problemini ele almıştır. Emmons [65] önce erken tamamlanacak işlerin bir seti verildiğinde, toplam akış zamanını enküçükleyecek bir yöntem göstermiş, sonra bu yöntemi Moore [66] Algoritması ile birleştirerek geciken işlerin sayısının en az olma kısıtı altında toplam akış zamanını enküçük yapacak bir sezgisel önermiştir. Problemi eniyi olarak çözmek için bir dal sınır algoritması geliştirmiştir. Bu algoritma da dallanmayı önemli ölçüde azaltacak eliminasyon kuralları kullanmıştır.

Nelson ve diğerleri [53], $n\ /1/\ \overline{F}, n_T$ problemi için de bir dallanma yöntemi geliştirmişlerdir. Yöntemlerinde Moore [66] ve Hodsson [67] algoritması ile belirlenen çizelgedeki geciken iş sayısını en az n_T olarak, SPT kuralı ile elde edilen çizelgedeki geciken iş sayısını da en fazla n_T olarak kabul edilen geciken işlerle ilgili alt ve üst sınırları oluşturmuşlardır. SPT çizelgesinde erken tamamlanan bir i işi varsa, $\max n_T$ ve $\min n_T$ arasında tamsayı değer alan k değerleri için $n\ /1/\ \overline{F} : n_T \leq k$ probleminin çözümünde i işinin erken tamamlandığı bir çizelgenin var olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Böylece dallanmalar SPT çizelgesindeki geciken işler üzerinden yapılmakta ve $n\ /1/\ \overline{F} : n_T$ probleminde bazı dallar Emmons [65]'ın baskınlık kuralına benzer bir kuralla elimine edilmektedir.

Kiran ve Ünal [68], $n\ /1/\ \overline{F}, n_T$ probleminin etkin çözümlerin bulunması için Nelson [53]'ın algoritmasını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, SPT çizelgesindeki geciken iş sayısı ile Moore [66] çizelgesindeki geciken iş sayısı arasında k tane geciken işe sahip en az bir etkin çizelgenin bulunacağını ispatlayarak, problemin etkin çizelgelerinin sayısının en az $n_T(SPT) - n_T(Moore) + 1$ kadar olacağını göstermişlerdir.

Liao ve diğerleri [54], $n\ /1/\ \overline{F}, n_T$ problemini incelemişler. Problemlerinde Nelson ve diğerleri [53] ağaç yöntemini kullanarak 30 işe kadar problemi çözmüşlerdir.

Kondakçı ve Bekiroğlu [69], toplam akış zamanı ve geciken iş sayısını enküçükleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Baskın olmayan çözümlerin bazı özellikleri tartışılmıştır. 30 işe kadar olan problemlerde bu özelliklerin kullanılabileceğini göstermiştir.

Karasakal ve Köksalan [70], NP-zor problem olan toplam akış zamanı ve geciken iş sayısı problemini tavlama benzetimi metoduyla çözmüşlerdir. Problemi;

$$\begin{aligned} &\text{Min} \qquad F = \sum C_i \\ &\text{kısıt} \qquad n_T \le k \end{aligned}$$

şeklinde tanımlamışlar. Burada *k*; $n_T(MOORE) \le k \le n_T(SPT)$ 'dir.

Ortalama akış zamanı ile düzenleyici ölçütün maksimum değeri

Emmons [65]'da, Heck ve Roberts [50]'in algoritmasını $n\ /1/\ \overline{F} : \gamma_{\max}$ $\gamma_{\max}$ probleminin çözümüne uyarlamıştır. Burada $\gamma_{\max}$ ölçütü, tamamlama zamanının azalmayan keyfi bir ceza fonksiyonu olarak incelenmiştir. Emmons [65]'ın algoritması şöyledir:

Adım 1: $n\ /1/\ \gamma_{\max}$ problemi Lawler [71]'ın algoritması ile çözülür.

Adım 2: $1\ //\ \overline{F}\ :\ \gamma_{\max}$ problemi Heck ve Robert'in [50] algoritması ile, $T_{\max}$ değeri Adım 1'de belirlenen $\gamma_{\max}$ ile yer değiştirilmek üzere çözülür.

John ve Sadowski [72], $n\ /1/\ \overline{F}, \gamma_{\max}$ problemini çözmek için Smith [48] ve Emmons [65]'ın algoritmalarını birleştiren bir algoritma geliştirerek $n\ /1/\ \overline{F} : \gamma_{\max}$ problemini çözmüşlerdir. Geliştirilen bu algoritma Van Wassenhove ve Gelders [5] $n\ /1/\ \overline{F}, T_{\max}$ problemi için geliştirdikleri algoritmaya benzerdir. Ancak herbir etkin çözümü bulmak için Emmons [65]'ın, $n\ /1/\ \overline{F} : \gamma_{\max}$ problemi için geliştirdiği algoritmayı kullanmaktadır. Bu algoritma bütün etkin çözümleri üretmekte, her bir etkin çözüm $O(n^2)$ adımda elde edilmektedir.

Cheng [73], $n\ /1/\ \sum C_i : \max_i \gamma_i(C_i)$ problemini ele almış, Emmons [65]'ın bu problemle ilgili dal ve sınır yaklaşımını geliştirerek hesaplama zamanını önemli ölçüde azaltan eniyi bir çözüm yöntemi sunmuştur.

Hoogeveen ve Van De Velde [55], yaptıkları çalışmada toplam tamamlanma zamanı ve maliyeti enküçükleme problemi ile ilgilenmişlerdir.

Hoogeven ve Van de Velde [74], $n/1/F\left(\sum C_i, \gamma_{\max}\right)$ problemini incelemişler, problemin $\min\left\{O\left(n^4\right), O\left[n^3\left(\log n + \log p_{\max}\right)\right]\right\}$ zamanında çözülebileceğini göstermişlerdir. Burada $P_{\max} = \max\{P_i\}$ ve F hem $\sum C_i$ hem de $\gamma_{\max}$'a göre azalmayan herhangi bir fonksiyonu belirtmektedir. Ayrıca çalışmasında $n/1/F\left(\sum C_i, \gamma_{\max}\right)$ probleminin özel bir hali olan $n/1/F\left(\sum C_i, L_{\max}\right)$ probleminin $O\left(n^3\right)$ zamanda çözülebileceğini göstermişlerdir.

Ortalama akış zamanı ve maksimum erken bitirme

Köksalan ve diğerleri [75], NP-zor problem olan akış zamanı ve maksimum erken bitirmeyi enküçükleme problemini makinanın boş bekleme olma ve olmama durumuna göre incelemişler ve etkili sıralamaları üretmek için sezgisel bir yöntem sunmuşlardır. Her iki durum için verilen bir amaç fonksiyonunda en iyi yaklaşık etkin sırayı bulmak için bir algoritma geliştirmişler.

Köksalan [56], tek makinada işleri sıralamayı toplam akış zamanı ve maksimum erken bitirme problemini azalmayan bir fonksiyonu enküçüklemeye çalışmıştır. Problem için sezgisel bir yaklaşım sunmuştur.

Karasakal ve Köksalan [70], NP-zor problem olan toplam akış zamanı ve maksimum erken bitirme problemini tavlama benzetimi ile çözmüşlerdir. Tavlama benzetiminde performansı arttırmak için değişik komşuluk yapıları ve diğer parametreleri denemişlerdir. Geliştirdikleri yaklaşım, çok sayıda alt sınırlara çok yakın sonuçlar üretmektedir. Bu nedenle karşılık geldikleri problemler eniyi çözüme çok yakın sonuçlar vermiştir. Problemi;

$$\begin{aligned} &\text{Min} \quad && F = \sum C_i \\ &\text{kısıt} \quad && E \le k \end{aligned}$$

şeklinde tanımlamışlar. Burada k; $0 \le k \le E_{\max}(SPT)$'dir.

Ağırlıklı ortalama akış zamanı ve ağırlıklı geç bitirme

Gelders ve Kleindorfer [76], verilen bir kapasite planına göre, ağırlıklandırılmış gecikme ile ağırlıklandırılmış ortalama akış zamanı toplamının enküçüklenmesi problemini incelemişler ve problemin çözümü için bir dal sınır algoritması tasarlamışlardır.

Yine Gelders ve Kleindorfer [77], önceki algoritmalarını iyileştirmişler ve algoritmalarını iş gelişlerinin aynı zamanda olmadığı duruma uyarlamışlardır.

Ağırlıklı ortalama akış zamanı ve ağırlıklı erken bitirme ve ağırlıklı geç bitirme

Fry ve diğerleri [78], ortalama akış zamanı, toplam gecikme ve toplam erken tamamlama zamanından oluşan ölçütlerin ağırlıklı toplamının enküçüklenmesini sağlayan iş sıralamasının bulunması ile ilgili iki yöntem geliştirmişlerdir. Etkin çözümü belirlemek için geliştirilen ilk yöntem baskınlık kriteri ve sınırlama işlevini yapan bir birerleme planını içerirken, ikincisi karma tamsayılı doğrusal programlamadır. Bu yöntemlerle ilgili yaptıkları ilk değerlendirme sonucunda, birinci yöntemin diğerine göre daha etkin olduğu ancak problem boyutu arttıkça her iki yönteminde hesaplama zamanı açısından yetersiz olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle büyük boyutlu problemlerin çözümünde sezgisel metotlara başvurulmasını önermektedirler. Yaptıkları çalışmada üç ölçütü kullanarak önerdikleri karışık tamsayılı modeli;

Min $$Z = W_e \sum_{j=1}^{N} E_{(j)} + W_t \sum_{j=1}^{N} T_{(j)} + W_F \left[\sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{i} Y_{(k)} + \sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{i} \sum_{j=1}^{N} X_{j(k)} p_j \right]$$

Kısıtlar: $$\sum_{j=1}^{N} X_{j(i)} = 1 \qquad i = 1, 2, ..., N$$

$$\sum_{i=1}^{N} X_{j(i)} = 1 \qquad i = 1, 2, ..., N$$

$$\sum_{k=1}^{i} Y_{(k)} + \sum_{k=1}^{i} \sum_{j=1}^{N} X_{j(k)} p_j + E_{(i)} - T_{(i)} = \sum_{j=1}^{N} X_{j(i)} d_j \qquad i = 1, 2, ..., N$$

şeklindedir.

Taboun ve diğerleri [79], ortalama akış zamanı, maksimum gecikme ve maksimum erken bitirmeyi enküçüklemek için uzlaşık (compromise) bir çözüm sağlayan bir algoritma kullanmışlardır.

Ağırlıklı ortalama akış zamanı ve işlem maliyeti

Vickson [80], işlerin işlem zamanlarının doğrusal fonksiyonu olan işlem maliyetine sahip olduğunda ağırlıklandırılmış toplam akış maliyeti ile işlem maliyeti toplamının enküçüklenmesi problemini inceleyerek bir sezgisel yöntem geliştirmiştir. Bu çalışmaya takiben Vickson [80], işlem zamanlarının doğrusal olarak değişen maliyetlerle ilişkilendiğinde toplam işlem maliyeti ile ortalama akış maliyeti toplamının enküçüklenmesi problemini incelemiş ve bu problemin klasik atama problemine eşdeğer olduğunu göstermiştir.

Cheng ve diğerleri [81], tek makinalı problemlerde grup çizelgeleme problemi için, ağırlıklı tamamlanama zamanı kısıtı altında maliyeti enküçükleme problemi ($1\ /\ G\ /\ \sum w_i C_i, f_{\max}$), Lawler [71] algoritması kullanarak çözmüşlerdir.

Ağırlıklı ortalama akış zamanı ve ağırlıklı ortalama erken bitirme

Fry ve Leong [82], yaptıkları çalışmada ağırlıklı akış zamanı ve erken bitirmeyi enküçükleme problemini incelemişler. Problem için karma tamsayılı doğrusal bir programlama formülasyonu vermişlerdir. Bu problemin çözümünde diğerlerinden farklı olarak makinanın boş beklemesine izin verilmektedir. Dolayısıyla incelenecek çizelge sayısı artmaktadır. Bu nedenle çözüm tekniği olarak karma tamsayılı doğrusal programlama formülasyonu kullandıklarını belirtmektedirler. Problemin amaç fonksiyonunu,

$$\text{Min } Z = \alpha \sum_{i=1}^{N} E_i + \lambda \sum_{i=1}^{N} F_i$$

şeklinde ifade etmişlerdir. Burada α ve λ ceza maliyetlerini göstermektedir.

Ağırlıklı ortalama geç bitirme ve işlem maliyeti

Elmaghraby ve Pulat [83], zaman / maliyet kavramını da dahil etmek için öncelik kısıtlarının yer aldığı toplam gecikme maliyetinin enküçüklemesine yönelik bir modeli analiz etmişlerdir.

Vickson [80], işlem maliyeti toplamı ile maksimum gecikme maliyeti toplamının enküçükleme problemi için polinom zamanlı bir algoritma geliştirmişlerdir.

Ağırlıklı akış zamanı ve ağırlıklı ortalama geç bitirme

John [72], akış zamanı ve ağırlıklı maksimum gecikmeyi enküçükleme problemini ödünleşim eğrileri ile 60 işe kadar çözmüştür.

Ortalama akış zamanı ve ortalama geç bitirme

Lin [84], ortalama gecikme ve ortalama akış zamanı problemini incelemiştir. Çalışmada ilk olarak baskın öncelik ilişkilerinden yararlanarak bütün etkin çizelgeleri bulmuş, sonra hesaplama etkinliğini arttırmak için bu öncelik ilişkilerini birleştiren dinamik programlama tekniği kullanmıştır. 12 işe kadar problemi çözüp sonuçları göstermiştir.

Toplam akış zamanı ve gecikme aralığı

Sen ve diğerleri [9], toplam akış zamanı ve gecikme aralığı için dal ve sınır algoritması önermişlerdir. Modeli aşağıdaki şekilde tanımlamışlardır:

$$Z(S) = pF(S) + qG(S) \qquad p,q \geq 0 \qquad p+q=1$$

burada, $F(S) = \sum_{i=1}^{n} C_i(S)$ ve $G(S) = \max(L_i(S)) - \min(L_i(S))$ dir.

Toplam akış zamanı ve gecikme kareleri toplamı

Dileepan ve Sen [7], toplam akış zamanı ile gecikme karelerinin toplamının doğrusal bir birleşimini incelemiş, önce problemi eniyileme ile çözmek için yeter şartları ve bu şartlara bağlı olarak da bir alt sınır türetmiştir. Sonra bu alt sınırlarla birleştirilmiş bir dal sınır yöntemi önermiştir. Ayrıca işler arasında öncelik ilişkilerini kullanarak düğümlerin nasıl eleneceğini göstermişlerdir. Problemin amaç fonksiyonu;

$$Z(S) = pF(S) + (1-p)G(S) \qquad 0 \leq p \leq 1$$

şeklindedir. Burada, $F(S) = \sum_{i=1}^{n} C_i(S)$ ve $G(S) = \sum (L_i(S))^2$ şeklinde tanımlamışlardır.

Ağırlıklı ortalama akış zamanı ve ağırlıklı ortalama erken bitirme

Hoogeven ve Van de Velde [74], aynı zamanda $1/pmtn/F\left(\sum C_i, E_{\max}\right)$ problemini incelemişlerdir. $1/nmit, pmtn/\alpha_1 \sum C_i + \alpha_2 E_{\max}$ ve $1/nmit/\alpha_1 \sum C_i + \alpha_2 E_{\max}$ problemi ile ilgili elde ettikleri ana sonuçlar; ilk problemin $O\left(n^4\right)$ zamanda, ikinci problemin ise $\alpha_1 \geq \alpha_2$ koşulu ile yine aynı zamanda çözülebileceğidir.

Toplam tamamlanma zamanı ve maksimum çabukluk

Hoogeveen ve Van de Velde [85], toplam tamamlanma zamanı ve maksimum çabukluk problemini $1//\alpha_1 \sum_{j=1}^{n} C_j + \alpha_2 P_{\max}$ şeklinde tanımlayıp, ödünleşim eğrisiyle göstermişlerdir.

Taşıma maliyeti ve maksimum tamamlanma

Gupta ve diğerleri [86], taşıma maliyeti ve maksimum tamamlanma zamanını enküçüklemek için çalışmışlardır. İlk önce maksimum tamamlanma zamanı kısıtı altında taşıma maliyetini enküçükleme, diğeri de taşıma maliyetini enküçük yapma kısıtı altında maksimum tamamlanma zamanını enküçüklemedir.

Maksimum tamamlanma ve maksimum gecikme

Ishii ve diğerleri [87], enküçükleme probleminde maksimum tamamlanma zamanı ve maksimum gecikme üzerinde çalışmışlardır.

Ortalama akış zamanı, geciken iş sayısı ve maksimum geç bitirme

Nelson ve diğerleri [53], $n / 1 / n_T, T_{\max}, \overline{F}$ probleminin etkin çözümlerini belirleyen bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde ölçütlerin ikili birleşimlerine ait çözümlerden yararlanarak iki ölçütlü bazı etkin çözümlerin üç ölçütlü durumda etkin çözüm olmayacağı ve iki ölçütlü yöntemlerle elde edilmeyen bazı yeni etkin çözümlerin bu yöntemle elde edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Ağırlıklı ortalama akış zamanı, ağırlıklı geciken iş sayısı ve ağırlıklı maksimum geç bitirme

Daniels [88], ağırlıklı akış zamanı, ağırlıklı maksimum gecikme ve ağırlıklı geciken iş sayısı problemini incelemiştir. Problem için bir ağaç yöntemi sunmuştur. Problemin maliyet fonksiyonunu aşağıdaki şekilde ifade etmiştir.

$$TM(s) = \alpha_F F(S) + \alpha_{T_{\max}} T_{\max}(S) + \alpha_{n_T} n_T(S)$$

problemi 20 işe kadar çözüp, sonuçları göstermiştir.

Tek makinada akış zamanı ile ilgili yapılmış çok ölçütlü çalışmalar, eniyileme ve sezgisel tekniklere göre Tablo 4a,b'de topluca verilmiştir.

3.1.1.2. Teslim tarihi ile ilgili çalışmalar

Maksimum geç bitirme ve geciken iş sayısı

Shantikumar [89], $n / 1 / n_T : T_{\max}$ problemini incelemiş, probleme ilişkin bir dal sınır algoritması sunmuştur. Bu algoritmada alt sınırı belirlemek için erken

Tablo 4a. Akış zamanı ile ilgili tek makinada yapılan çok ölçütlü çalışmalar (1)

Kullanılan ölçütler	Çalışmayı Yapanlar	Eniyileme T.	Sezgisel T
$\overline{F}$, $L_{\max} - L_{\min}$	Sen ve diğerleri (1988)	•	
		•	
$\overline{F}$, L_i^2	Dileepan ve Sen (1991)	•	
$\overline{F}$, $P_{\max}$	Hoogeveen ve Van de Velde (2001)	•	
I, $C_{\max}$	Gupta ve diğerleri (1997)	•	
$C_{\max}$, $L_{\max}$	Ishii ve diğerleri (1990)	•	
n_T, $T_{\max}$, $\overline{F}$	Nelson ve diğerleri (1986)	•	

Tablo 4b. Akış zamanı ile ilgili tek makinada yapılan çok ölçütlü çalışmalar (2)

Kullanılan ölçütler	Çalışmayı Yapanlar	Eniyileme T.	Sezgisel T
$\overline{F}$, T_{max}	Smith (1956)	•	
	Heck ve Roberts (1972)	•	
	Van Wassenhove ve Gelders (1980)	•	
	Sen ve Gupta (1983)	•	
	Nelson ve diğerleri (1986)	•	
	John (1989)	•	
	Liao, Huang ve Tseng (1992)	•	
	Köksalan (1999)		•
$w\overline{F}$, T_{max}	Burns (1972)	•	
	Bansal (1980)	•	
	Miyazaki (1981)	•	
	Shanthikumar ve Buzacott (1983)	•	
	Potts ve Van Wassenhove (1983)	•	
	Posner (1985)	•	
	Chand ve Schneeberger (1986)	•	
	Bagchi ve Ahmedi (1987)	•	
$\overline{F}$, n_T	Emmons (1975)	•	
	Nelson ve diğerleri (1986)	•	
	Kiran ve Ünal (1991)	•	
	Liao ve diğerleri (1992)	•	
	Kondakçı ve Bekiroğlu (1997)	•	
	Karasakal ve Köksalan (2000)		•
wn_T , wT_{max} , $w\overline{F}$	Daniels (1994)	•	
$\overline{F}$, γ_{max}	Emmons'da (1975)	•	
	John ve Sadowski (1984)	•	
	Cheng (1991)	•	
	Hoogeveen ve Van De Velde (1995)	•	
$\overline{F}$, $\overline{E}$	Köksalan ve diğerleri (1998)	•	•
	Köksalan (1999)		•
	Karasakal ve Köksalan (2000)		•
$w\overline{F}$, wT_{max}	Gelders ve Kleindorfer (1974)	•	
	Gelders ve Kleindorfer (1975)	•	
$w\overline{F}$, $w\overline{E}$, $w\overline{T}$	Fry ve diğerleri (1987)	•	
	Taboun Abib ve Atmani (1995)	•	
$w\overline{F}$, f_{max}	Vickson (1980)		•
	Cheng ve diğerleri (1996)	•	
$w\overline{F}$, $w\overline{E}$	Fry ve Leong (1987)	•	
$\overline{F}$, wT_{max}	John (1989)	•	
$\overline{F}$, $\overline{T}$	Lin (1983)	•	

tamamlanan işlerin bir seti E, ile T_{max}'ı enküçükleyen bir yöntem geliştirmiş, dallanmayı azaltmak için Emmon [65]'ın geliştirdiği baskınlık kurallarının bir düzenlemesini gerçekleştirmiştir.

Nelson ve diğerleri [53], $n\ /1/T_{\max}, n_T$ problemini de incelemişlerdir. Probleme ilişkin verdikleri ağaç yönteminde fazla dallanmayı azaltmak için son pozisyonda yer alacak işlerle ilgili bir baskınlık kuralı vermişler, algoritmanın diğer adımlarında ise önce Hodgson [67] kuralına göre $n\ /1/\ n_T$ problemini çözerek belirlenen çizelgedeki T_{max} değerini hesaplamışlar daha sonra işlerin teslim tarihlerini $(d_i' = d_i + T_{\max})$ ile değiştirerek Heck ve Roberts [50] algoritmasına benzer bir düzenleme ile $n\ /1/T_{\max}, n_T$ problemini çözmüşlerdir. Çözüm sırasında son pozisyonda yerleşebilecek birden fazla iş varsa belirledikleri baskınlık kuralı ile bu işlerden bazıları elimine edilmekte, elenmeyen işlerin herbirinden dallanma gerçekleştirilmektedir. Şayet baskınlık kuralı eliminasyonu karşılayamıyorsa algoritma ile bütün etkin ve etkin olmayan çizelgeler üretilmektedir.

Lung [44], $n\ /1/n_T : T_{\max}$ problemi için bir dal sınır algoritması geliştirmiştir. Lung [44] geliştirdiği bu algoritmada üst ve alt sınırlar, baskınlık için kurallar, dallanma ve budanma işlevleri oluşturmuştur. Üst sınır değerini oluşturmak için bir sezgisel alt sınır değeri için bir yöntem vermiştir. Bu sınır değerleriyle problemin en gun çözüm alanı daraltılmış olmaktadır. Bu arada kullandığı baskınlık, dallanma ve budama kuralları ile bir çok düğüm elimine edildiğinden çözümün daha kısa zamanda elde edildiğini ifade etmiştir.

Ayrıca Lung [44] $n\ /1/n_T : T_{\max}$ problemi için geliştirdiği algoritmadan yararlanarak $n\ /1/n_T, T_{\max}$ problemi içinde de bir algoritma geliştirmiştir.

Liao ve diğerleri [54], $n\ /1/T_{\max}, n_T$ problemini incelemişler. Problemi çözmek için John [72]'un ödünleşim eğrisinden faydalanmışlardır. 14 işe kadar problemi dört veri seti ile çözüp, sonuçları göstermişlerdir.

Gupta ve Ramnarayanan [90], geciken iş sayısı kısıtı altında maksimum gecikmeyi enküçükleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Problem için sezgisel bir yaklaşım sunup, dal ve sınır algoritması 30 işe kadar problemi çözüp sonuçları karşılaştırmışlardır.

Gupta ve diğerleri [91], geciken iş sayısı kısıtı altında maksimum gecikmeyi enküçük yapmak için yeni bir dal ve sınır algoritması önermişlerdir. Önerdikleri algoritmada gevşemeye dayanan yeni bir alt sınırlama şeması kullanılıyor. Aynı zamanda arama ağacının büyüklüğünü sınırlamak için de çeşitli baskınlık kuralları kullanmışlardır. Bu algoritmayı kullanarak problemi 1000 işe kadar çözüp sonuçları göstermişlerdir.

Gecikme aralığı (maksimum gecikme – minimum gecikme)

Gupta ve Sen [92], gecikme aralığının, yani maksimum gecikme ile minimum gecikme arasındaki farkın minimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Bu problemle ilgili geliştirdikleri eniyileme algoritmasındaki alt sınır değerini yine Townsend [52] yaklaşımından yararlanarak belirlemektedirler. Burada işler önce MST kuralına göre sıralanmakta (birincil sıra), sonra EDD'ye göre sıralanmaktadır (ikincil sıra). Şayet bu sıralar aynı ise çözüm eniyidir. Farklı olduğunda ise bitişik işler arasında yer değişikliği yapılarak her iterasyonda gerçekleşen maksimum potansiyel iyileşme hesaplanarak işler birincil sıradan ikincil sıraya hareket etmektedir. Böylece bütün bitişik işler arasında yer değişikliği yapılarak birincil sıradan ikincil sıra elde edilmekte ve oluşan maksimum potansiyel iyileştirmelerin toplamı problem için bir alt sınır değerini vermektedir. Çalışmada bu alt sınır değerinin hesaplanması ile birlikte bir dal sınır algoritması sunulmuştur.

Tegze ve Vlach [93], iş ceza fonksiyonlarının düzenli bileşimlerinden oluşan amaç fonksiyonlarının eniyi değerleri üzerindeki sınırları oluşturmak için genel bir yöntem vermişler ve bu yöntemi Gupta ve Sen'in [92], gecikme aralığı ile ilgili yöntemini geliştirmek için kullanmışlardır.

Liao ve Huang [94], gecikme aralığının enküçüklemek için bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu problemle ilgili daha önce ifade edilen algoritmalar üstel zaman karmaşıklığına sahip dal sınır yaklaşımlarıyken, bu problemin çözümünde sözde polinomsal zamanlı bir algoritma vererek probleme teorik bir katkı sağlamışlardır.

Maksimum erken bitirme ve geciken iş sayısı

Güner [95] ile Güner ve diğerleri [96], $n\ /1/\ E_{\max} : n_T$ problemi konusunda ilk çalışmayı yapmıştır. Problemi için bir dal-sınır algoritması verilerek 25 işe kadar çözüm sonuçları gösterilmiştir.

Maksimum çabukluk (promptness) ve maksimum gecikme

Hoogeveen [97], yaptığı çalışmada maksimum çabukluk ve maksimum gecikmeyi enküçükleme problemini incelemişlerdir.

Maksimum geç bitirme ve ağırlıklı geciken iş sayısı

Lung [44], $n\ /1/n_T\ ,T_{\max}$ probleminin çözümü için geliştirdiği yöntem genel olarak $n\ /1/wn_T\ ,T_{\max}$ probleminin çözümünde de kullanılabileceğini belirterek aynı genel yönteme dayalı bir algoritma sunmuştur.

Ağırlıklı geç bitirme ve ağırlıklı geciken iş sayısı

Carraway ve diğerleri [98], doğrusal olmayan maliyet fonksiyonunu enküçüklemişlerdir. Problemlerinde ağırlıklı geciken iş sayısı ve ağırlıklı geç bitirme ölçütlerini ele almışlardır. Problem için bir dinamik programlama yaklaşımı sunmuşlardır.

Maksimum gecikme ve geciken iş sayısı

Chang ve Su [99], çalışmalarında *n* tane iş ve her işin bir varış zamanı, işlem zamanı ve teslim tarihi verilmektedir. Her iş tek makinada işlenmekte ve iki amacı vardır. Bu amaçlar geciken iş sayısını enküçükleme kısıtı altında maksimum gecikmesini enküçük yapmadır. Verilen bir sıralama için en kritik iki işi tanımlayıp basit bir yöntem kullanmışlardır. İki kritik iş arasında sıralama kritik yol olarak tanımlandı. Kritik yolun temelinde Carlier'in ikili dallanma kuralı maksimum gecikmeyi enküçüklemek için kullanılmıştır. Bu iki kritik işin pozisyonların enküçük maksimum gecikmeyi bulmak için sabitlenmesiyle, sıralama geciken iş sayısını azaltmak için kullanılabilir. Dal-sınır algoritması kullanılarak 50 işe kadar problemi, 5 saniyede çözmüştür.

Ortalama geç bitirme ve geciken iş sayısı

Duffuaa ve diğerleri [100], geciken iş sayısı kısıtı altında ortalama geç bitirmeyi enküçükleyen bir algoritma önermişlerdir.

Maksimum erken bitirme, maksimum geç bitirme ve geciken iş sayısı

Güner [95], $n\ /\ 1\ /\ T_{\max}, E_{\max}, n_T$ problemi için bir ağaç arama yöntemi önermiştir. Yöntemin küçük boyutlu problemlerde kullanılabileceğini 15 işe kadar çözerek göstermiştir. Büyük boyutlu problemler için sezgisel yaklaşımları önermiştir.

Tek makinada teslim tarihine bağlı çok ölçütlü çalışmalar eniyileme ve sezgisel tekniklere göre Tablo 5'de topluca verilmektedir.

3.1.1.3. Diğer Çalışmalar

Van Wassenhove ve Baker [51], maksimum gecikme ile sıkıştırma maliyetlerinden oluşan iki ölçütlü problemin etkin çözümlerin bulunmasını sağlayan polinom zamanlı bir algoritma önermişlerdir.

Chang ve Lee [101], çalışmalarında maksimum tamamlanma zamanı ve toplam mutlak sapmanın enküçüklenmesi problemini incelemişlerdir. Problemi çözmek için Greedy sezgisel yöntemi kullanılmıştır.

De ve diğerleri [102], tamamlanma zamanı ortalaması $\overline{C}(\sigma) = (1/n)\sum_{j \in n} C_j(\sigma)$ ile tamamlanma zamanının varyansını $V(\sigma) = (1/n)\sum_{j \in n}\left[\left(C_j(\sigma) - \overline{C}(\sigma)\right)\right]^2$ enküçükleme problemini incelemişlerdir. Problem için sezgisel bir yaklaşım önermişlerdir.

Tablo 5. Teslim tarihi ile ilgili tek makinada yapılan çok ölçütlü çalışmalar

Kullanılan ölçütler	Çalışmayı Yapanlar	Eniyileme T.	Sezgisel T.
T_{max} , n_T	Garcia (1982) Shantikumar (1983) Nelson Sarin ve Daniels (1986) Lung (1989) Lung (1989) Liao, Huang ve Tseng (1992) Güner (1994) Gupta ve Ramnarayanan (1996) Gupta, Hariri ve Potts (1999)	• • • • • • • • •	 •
$E_{\max}$, n_T	Güner, Erol ve Tani (1998)	•	
$L_{max} - L_{min}$	Gupta ve Sen (1984) Tegze ve Vlach (1988) Liao ve Huang (1991)	• • •	
$w\overline{T}$, $f_{\max}$	Elmaghraby ve Pulat (1979) Vickson (1980)	• •	
$P_{\max}$, $L_{\max}$	Hoogeveen (1996)	•	
$T_{\max}$, wn_T	Lung (1989)	•	
$wT_{\max}$, wn_T	Carraway ve diğerleri (1992)	•	•
$L_{\max}$, n_T	Chang ve Su (2001)	•	
$\overline{T}$, n_T	Duffuaa ve diğerleri (1997)	•	

Cheng ve diğerleri [103], toplam sıkıştırma ve gecikme maliyetini enküçükleme problemi üzerinde durmuşlardır. Problemin modelini şöyle tanımlamışlar:

Minimum $\sum_{j \in N} w_j U_j + \sum_{j \in N} v_j x_j +$

Kısıt $x \in X$, $\pi \in \Pi$

Burada v_j ; j işinin işleminin bir birim sıkıştırma maliyeti. x_j ; j işinin gerçek sıkıştırması ($0 \le x_j \le u_j$). u_j ; maksimum pozitif sıkıştırma ($0 \le u_j \le p_j$)'dır.

Cheng ve diğerleri [104] tek makina üzerinde çizelgeleme problemlerinde iki ölçüt üzerinde çalışmışlardır. Her işin işlem zamanı, işe ayrılan kesikli kaynağın doğrusal azalan bir fonksiyonudur. Kaynak dengeleme ve işlem sıralanmasıyla bir çözüm elde edilmiştir. Bir çözümün kalitesi F_1 ve F_2 ölçütleri ile ölçülür. F_1 ölçütü toplam kaynak kullanma, F_2 ise iş bitirme zamanlarına dayanan düzenli bir çizelgeleme ölçütüdür. Her iki ölçütte enküçüklenmelidir. Pareto kümesi oluşturularak işin genel şemasını sunmuşlardır. F_1 ve F_2 değişik fonksiyonlar için hesaplama zorlukları incelenmiştir. Bu hesaplama zorlukları $F_2 \leq k$ 'dan F_1 'i enküçükleme, $F_1 \leq k$ 'dan F_2 'yi enküçüklemek içindir. Buradaki k herhangi bir sayıdır . Bu problemi çözen ve pareto set ve pareto set $\in$ -yaklaşımı yapılmıştır.

Diskup ve Cheng [105], $f(\sigma, d, x) = \sum_{i=1}^{n} \left(\alpha E_{[i]} + \beta T_{[i]} + \theta C_{[i]} + G_{[i]} x_{[i]} \right)$ problemini incelemişlerdir. Burada $G_i x_i$ toplam sıkıştırma maliyetini, α , β ve θ ise sırasıyla erken bitirme, geç bitirme tamamlama zamanı maliyetlerini göstermektedir.

Klamroth ve Wiecek [106], zamana bağımlı çok ölçütlü tek makinalı problemi incelemişlerdir. Modellemek için sırt çantası problemini kullanıp dinamik programlama tabanlı bir algoritma sunmuşlardır.

3.1.2. Stokastik çalışmalar

Lin ve Lee [107], üç problemi stokastik olarak incelemişlerdir.

Birinci problem;

$$\min_{\alpha \in \pi} \sum_{i:=1}^{n} E\left[C_{[i]}\right]$$

$$\text{Kısıt } E\left\lfloor L_{[i]} \right\rfloor \leq \alpha \qquad \alpha = \min_{\alpha \in \pi} \max_{i} E\left\lfloor L_{[i]} \right\rfloor$$

şeklinde tanımlamışlar. Tek ölçütlü problem için ilk çalışmayı Crabill ve Maxwell [108] yapmışlar. Hodgson [67] ise bu çalışmayı genişletmiştir.

İkinci Problem;

$$\min_{\alpha \in \pi} \sum_{i:=1}^{n} E\left[\phi\left(C_{[i]}\right)\right]$$

$$\text{kısıt} \quad w_{[i]} \Pr\left(L_{[i]} \geq 0\right) \leq \beta \qquad \beta = \min_{\alpha \in \pi} \max_{i} w_{[i]} \Pr\left(L_{[i]} \geq 0\right)$$

$E\left\lfloor \phi\left(C_{[i]}\right) \right\rfloor$ var olması durumunda, $\phi\left(C_{[i]}\right)$; işin tamamlanma zamanının artan fonksiyonudur.

Üçüncü problem;

$$\min_{\sigma \in \pi} \sum_{i:=1}^{n} E\left[w_i C_i\right]$$

$$\text{kısıt } E\left\lfloor L_{[i]} \right\rfloor \leq \alpha \qquad \alpha = \min_{\alpha \in \pi} \max_{i} E\left\lfloor L_{[i]} \right\rfloor$$

şeklinde tanımlanmışlardır.

Frost [109], problem olarak beklenilen toplam ağırlıklı gecikme ve beklenilen toplam ağırlıklı akış zamanı enküçükleme problemini incelemiştir. Problem için işlem zamanlarının artan stokastik sırasındaki eniyi durumu elde edilebileceğini göstermişlerdir.

3.2. Paralel Makinalar

Lawler ve Labetoulle [110], maksimum gecikme ve işlem maliyetini enküçükleme problemini doğrusal programlama modeli kullanarak çözmüşlerdir.

Sundararaghavan ve Ahmed [111], *P* tipi olan ortalama erken bitirme ve ortalama gecikme problemiyle uğraşmışlardır. Bu problemi eniyileme ile çözmüşlerdir.

Emmons [112], aynı problem için bir algoritma önermiştir.

Leung ve Young [113], $P\ /\ pmtn\ /\ \overline{C}, C_{\max}$ problemini etkin çözümü algoritmalarında $O(n \log n)$ adımda çözmüşlerdir.

Alidaee ve Ahmedian [114], toplam işlem maliyeti ile toplam akış zamanını enküçükleme problemini, toplam işlem maliyeti ile toplam ağırlıklı erken bitirme ve ağırlıklı gecikmeyi enküçükleme problemlerini incelemiştir. Bu iki problemi polinom zamanda ulaştırma probleminden faydalanarak çözmüşlerdir.

Cheng ve Chen [115], $P\ /\ d_i = d, d\ bilinmiyor\ p_i = p, nmit\ /\ F_l\left(\overline{E}, \overline{T}, d\right)$ problemini polinom zamanda çözen bir algoritma önermişlerdir.

Li ve Cheng [116], $P\ /\ d_i = d \geq \sum_{i=1}^{n} p_i, nmit\ /\ f_{\max}\left(w_i E_i, w_i T_i\right)$ problemini incelemiştir. Burada $f_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} w_i\left(E_i + T_i\right)$ şeklinde tanımlamışlar. Bu problemin NP-zor olduğunu göstermişlerdir. $O\left(mn^2\right)$ adımda problemi çözen bir sezgisel yaklaşım önermişlerdir.

McCormick ve Pinedo [117], $Q\ /\ pmtn\ /\ \overline{C} : C_{\max}$ problemini incelemişlerdir.

Suresh ve Chaudhuri [118], maksimum tamamlanma zamanı ve maksimum gecikmeyi enküçükleme problemini çözmüşlerdir. Problem için tabu arama yöntemini kullanmışlardır. Problemlerinde 40 iş ve 10 makinaya kadar problemi çözüp sonuçları göstermişlerdir.

Mohri ve diğerleri [119], iki ve üç paralel makina için maksimum tamamlanma zamanı ve maksimum gecikmeyi enküçükleme problemini incelemişlerdir. Problemlerinde Sahni [120] algoritmasını kullanmışlardır.

Gupta ve Ruiz-Torres [121], $P\ //\ F_h\left(C_{\max} : \sum C_i\right)$şeklinde ifade edilen NP-zor problem olan, toplam akış zamanı kısıtı altındaki maksimum tamamlanma zamanı problemini incelemişler. Problem için sezgisel bir yöntem sunmuşlardır.

Gupta ve diğerleri [122], iki özdeş paralel makina için ağırlıklı maksimum tamamlanma zamanı ve akış zamanı enküçükleme problemini incelemişlerdir. $P2\ //\ wC_{\max} + (1-w)\overline{F}$ şeklinde ifade edip problemi 1000 işe kadar dinamik programlama yaklaşımı ile çözmüşlerdir.

T'kindt ve diğerleri [123], $P\ /\ pmtn\ /\ F_l\left(I_{\max}, \overline{M}\right)$ problemini çözmüşlerdir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada şimdiye kadar yapılmış çok ölçütlü tek ve paralel makinalı çizelgeleme problemleri incelenmiştir. Çalışmalara genel olarak bakıldığında akış zamanı ile maksimum gecikme, ağırlıklı akış zamanı ile maksimum gecikme ve maksimum gecikme ile geciken iş sayısının enküçüklenmesi problemleri üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür.

Ayrıca konu ile ilgili şu gözlemler elde edilmiştir:

- ✓ Stokastik modellerle ilgili çalışmaların deterministik modellere göre çok daha az olduğu görülmüştür.
- ✓ Araştırmacılar ölçütleri daha etkin kullanmak için maliyet fonksiyonlarını bazı performans özelliklerine dayalı ceza fonksiyonları şeklinde modelledikleri görülmüştür.
- ✓ Son dönemlerde özellikle de tam zamanında üretim felsefesi ortaya çıktıktan sonra düzenli olmayan ölçütlerden erken bitirme gibi ölçütler daha sık olarak dikkate alındığı görülmüştür.
- ✓ Çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin bu alanda kullanılması ile daha iyi çözümler bulunması mümkün olacağı görülmektedir.
- ✓ Çözüm metotları olarak kullanılan birerleme tekniklerinden dal-sınır, dinamik programlama ve ödünleşim eğrilerinin uygulamalardaki başarısı genellikle problem yapısına bağlıdır. Yine tamsayı programlama algoritmaları da büyük boyutlu problemlerde hesaplama zamanı açısından etkin olmadığı görülmüştür.
- ✓ Çok ölçütlü çizelgelemede tabu arama, tavlama benzetimi genetik algoritma gibi sezgisel yöntemlerin son dönemlerde sıkça kullanıldığı görülmektedir.

✓ Diğer taraftan yapay zeka uygulamalarından uzman sistemlerinin de bu alanda kullanılması ile karar vericiye uygun çözüm seçenekleri sunmada yararlı olabileceği düşünülmektedir.

Son olarak, yapılan çalışmalar daha çok teorik çalışmalardır. Bu konudaki bulguların gerçek ortamlara uygulanmasına yönelik çalışmaların daha yararlı ve çekici olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Baker, K. R., **Introduction to Sequencing and Scheduling,** John Wiley and Sons, New York, 1974.
2. Baker, K. R., and Schrage, L. E., “Finding an Optimal Sequencing by Dynamic Programming: An Extension to Precedence-Related Tasks”, **Operations Research,** Volume 26, No: 1, 1978.
3. Gupta, S., and Kyparisis, J., “Single Machine Scheduling Research”, **OMEGA International Journal of Management Science,** Volume 15, No: 3, pp. 207-227, 1987.
4. Dileepan, P., and Sen, T., “Bicriterion Static Scheduling Research For A Single Machine”, **OMEGA International Journal of Management Science,** Volume 16, No: 1, pp. 53-59, 1988.
5. Van Wassenhove, L. N., and Gelders, F., “Solving A Bicriterion Scheduling Problem”, **European Journal of Operational Research,** Volume 4, No: 1, pp. 42-48, 1980.
6. Cheun, C., and Bulfin, R.L., “Scheduling Unit Processing Time Jobs on a Single Machine with Multiple Criteria”, **Computers and Operations Research,** Volume 17, No: 1, pp. 1-7, 1990.
7. Dileepan, P., and Sen, T., “Bicriteria Scheduling with Total Flowtime and Sum of Squared Lateness”, **Engineering Cost and Production Economics,** Volume 21, No: 8, pp. 295-299, 1991.
8. Sen, T., and Gupta, S. K., “A Branch and Bound to Solve a Bicriterion Scheduling Problem**”, IEE Transactions,** Volume 15, pp. 84-88, 1983.
9. Sen, T., Raiszadeh, F. M. E., and Dileepan, P., “A Branch-and-Bound Approach to The Bicriterion Scheduling Problem Involving Total Flowtime and Range of Lateness”, **Management Science,** Volume 34, No: 2, pp. 255-260, 1988.
10. Fry, T. D., Armstrong, R. D., and Lewis, H., “A Framework for Single Machine Multiple Objective Sequencing Research”, **OMEGA,** Volume 17, No: 6, pp. 595-607, 1989.
11. Nagar, A., Hadddock, J., and Heragu, S., “Multiple and Bicriteria Scheduling: A Literature Survey”, **European Journal of Operational Research,** Volume 81, pp. 88-104, 1995.
12. T’kint, V., and Billaut J.-C., “Multicriteria Scheduling Problems: A Survey”, **RAIRO Operations Research,** Volume 35, pp. 143-163, 2001.
13. Van Wassenhove, L. N., and Gelders, F., “Four Solution Techniques for a

General One Machine Scheduling Problem: A Comparative Study”, **European Journal of Operational Research,** Volume 2, No: 4, pp. 281-290, 1978.
14. John, T. C., “Trade off Solution in Single Machine Production Scheduling for Minimizing Flowtime and Maximum Penalty”, **Computers and Operations Research,** Volume 16, No: 5, pp. 471-479, 1989.
15. Morton, T. E., Pentico, D. W., **Heuristic Scheduling Systems,** Wiley, New York, 1993.
16. Pinedo, M. L., **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems,** Prentice-Hall, Englewood, 1995.
17. Pinedo, M. L., and Chao, X., **Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services,** Irwin McGraw-Hill, Singapore, 1999.
18. Baker, K. R., **Elementes of Sequencing and Scheduling,** Dartmouth College, Hanover, 1997.
19. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and. Vecchi, M. P., “Optimization by Simulated Annealing”, **Science,** Volume 220, pp. 671–680, 1983.
20. Glover, F., and Laguna, M., **Tabu Search,** Kluwer Academic Publishers, United Stated of America, 1997.
21. Glover, F., "Future Paths For Integer Programming and Links to Artificial Intelligence", **Computers and Operations Research,** Volume 13, No: 5, pp. 533-549, 1986.
22. Glover, F., "Tabu Search - Part I", **ORSA Journal on Computing,** Volume 1, No: 3, pp. 190-206, 1989.
23. Glover, F., "Tabu Search - Part II", **ORSA Journal on Computing,** Volume 2, No: 1, pp .4-32, 1990.
24. Goldberg, D. E., **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning,** Addison-Wesley, Reading, M. A, 1989.
25. Jones, D. F., Mirrazavi, S. K., and Tamiz, M., “Multi-Objective Meta-Heuristics: An Overview of The Current State-of-The-Art”, **European Journal of Operational Research,** Volume 137, No: 1, pp. 1-9, 2002.
26. Kan, A. H. G., **Machine Scheduling Problems,** Martinus Nijhoff, The Hague, 1976.
27. Lenstra, J. K., **Sequencing by Enumerative Method**, Second Printing, Mathemtisch Centrum, 1985.
28. Cheun, C.-L., and Bulfin, R. L., “Complexity of Single Machine Multi-criteria Scheduling Problems”, **European Journal of Operational Research,** Volume 70, pp. 115-125, 1993.
29. Blazewicz, J., Ecker, K., Schmidt, G., and Weglarz, J., **Scheduling in Computer and Manufacturing Systems,** Springer, Berlin, 1993.
30. Tanaev, V. S., Gordon, V. S., and Shafransky, Y. M., **Scheduling Theory: Single-Stage Systems,** Kluwer, Dordrecht, 1994.
31. Tanaev, V. S., Sotskov, Y. N., and Strusevich, V. A., **Scheduling Theory: Multi-Stage Systems,** Kluwer, Dordrecht, 1994.
32. Chretienne, P., Co Man, Jr., E. G., Lenstra, J. K., Liu, Z., **Scheduling Theory and Its Applications,** Wiley, Chichester, 1995.

33. Blazewicz, J., Ecker, K., Pesch, E., Schmidt, G., Weglarz, J., **Scheduling Computer and Manufacturing Processes,** Springer, Berlin, 1996.
34. Sen, T., Gupta, S. K., “A State-of-Art Survey of Static Scheduling Research Involving Due Dates”, **OMEGA,** Volume 12, pp. 63–76, 1984.
35. Raghavachari, M., “Scheduling Problem with Non-Regular Penalty Functions-A Review”, **Opsearch,** Volume 25, No: 3, pp. 144-164, 1988.
36. Kawaguchi, T., and Kyan, S., “Deterministic Scheduling in Computer Systems: A Survey”, **Journal of The Operational Research Society of Japan,** Volume 31, pp. 190–217, 1988.
37. Baker, K. R., and Scudder, G. D., “Sequencing with Earliness and Tardiness Penalties: A Review”, **Operations Research,** Volume 38, No: 1, pp. 22-36, 1990.
38. Cheng, T. C. E., Gupta, M. C., “Survey of Scheduling Research Involving Due Date Determination Decisions”, **European Journal of Operational Research,** Volume 38, pp. 156–166, 1989.
39. Cheng, T. C. E., Sin, C. C. S., “A State-of-The-Art Review of Parallel-Machine Scheduling Research”, **European Journal of Operational Research,** Volume 47, pp. 271–292, 1990.
40. Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G., Shmoys, D. B., **Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity,** In: Graves S.C., Zipkin P.H., Rinnooy, 1993.
41. Koulamas, C., “The Total Tardiness Problem: Review and Extensions”, **Operations Research,** Volume 42, pp. 1025–1041, 1994.
42. Hoogeveen, J. A., Van de Velde, S. L., “Earliness–Tardiness Scheduling Around Almost Equal Due Date”, **INFORMS Journal on Computing,** Volume 9, pp. 92–99, 1997.
43. 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,** Volume 139, pp. 1-25, 2002.
44. Lung, C. C., **Multicriteria Scheduling For A Single Machine: Analysis and Algorithms,** Ph.D., Auborn University, 1989.
45. Graham, R. L., Lawler, E. L., and Rinnooy Kan, A. H. G., “Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling”, **Annals of Discrete Mathematics,** Volume 5, pp. 287-326, 1979.
46. Evans, G. W., “An Owerview of Techniques For Solving Multi-Objective Mathematical Programs”, **Management Science,** Volume 30, No: 11, pp. 1268-1283, 1984.
47. De, P., Grosh, J. B., and Wells C. E., “Some Clarifications on the Bicriteria Scheduling of Unit Execution Time Jobs on a Single Machine”, **Computers and Operations Research,** Volume 18, No: 8, pp. 717-720, 1991.
48. Smith, W. E., “Varios Optimizers for Single-Stage Production”, **Naval Research Logistics Quarterly,** Volume 3, pp. 59-66, 1956.
49. Jackson, J. R., **Scheduling a Production Line To Minimize Maksimum Tardiness,** Research Report, University of California at Los Angeles, 1965.

50. Heck, H., and Roberts, S., “A Note on The Extension of a Result on Scheduling with Secondary Criteria”, **Naval Research Logistics Quarterly,** Volume 19, pp. 403-405, 1972.
51. Van Wassenhove, L. N., and Baker, K. R., “A Bicriterion Approach to Time Cost Trade-Offs in Sequencing”, **European Journal of Operational Research,** Volume 11, pp. 48-54, 1982.
52. Townsend, W., “Single Machine Problem with Quadratic Penalty Function of Completion Times: A Branch and Bound solution”, **Management Science,** Volume 24, No: 5, pp. 530-534, 1978.
53. Nelson, R. T., Sarin, R. K. and Daniels, R. L., “Scheduling with Multiple Performance Measures: The One-Machine Case”, **Management Science,** Volume 32, No: 4, pp. 464-479, 1986.
54. Liao, C-J., Huang, R-H., and Tseng, S-T., “Use of Variable Range in Solving Multiple Criteria Scheduling Problems”, **Computers and Operations Research,** Volume 19, No: 5, pp. 453-460, 1992.
55. Hoogeveen, J. A., and Van de Velde S. L., “Minimizing Total Completion Time and Maximum Cost Simultaneously is Solvable in Polynomial Time”, **Operations Research Letters,** Volume 17, pp. 205-208, 1995.
56. Köksalan, M., “A Heuristic Approach to Bicriteria Scheduling”, **Naval Research Logistic,** Volume 46, pp. 777-789, 1999.
57. Burns, R. N., “Scheduling to Minimize The Weighted Sum of Completion Times with Secondary Criteria”, **Naval Research Logistic Quarterly,** Volume 23, No: 1, pp. 125-129, 1976.
58. Bansal, S. P., “Single Machine Scheduling to Minimize Weighted Sum of Completion Times With Secondary Criterion: A Branch and Bound Approach”, **European Journal of Operational Research,** Volume 5, pp. 177–181, 1980.
59. Miyazaki, S., “One Machine Scheduling Problem with Dual Criteria”, **Journal of Operations Research Society of Japan,** Volume24, No: 1, pp. 37-50, 1981.
60. Shanthikumar, J., and Buzacott, J. A., “On The Use of Decomposition Approaches in A Single Machine Scheduling Problem”, **Journal of The Operations Research Society of Japan,** Volume 25, No: 1, pp. 29-47, 1983.
61. Potts, C. N., and Van Wassenhove, L. N., “An Algorithm for Single Machine Sequencing with Deadlines to Minimize Total Weighted Completion Time”, **European Journal of Operational Research,** Volume 12, pp. 379-387, 1983.
62. Posner, M. E., “Minimizing Weighted Completion Times with Deadlines”, **Operations Research,** Volume 33, No: 3, pp. 562-574, 1985.
63. Chand, S. and Schneeberger, H., “A Note on The Single-Machine Scheduling Problem with Minimum weighted Completion Time and Maximum Allowable Tardiness”, **Naval Research Logistic,** Volume 33, pp. 551-557, 1986.
64. Bagchi, U., and Ahmadi, R. H., “An Improved Lower Bound for Minimizing Weighted Completion Times with Deadlines”, **Operations Research,** Volume 35, pp. 311-313, 1987.
65. Emmons, H., “One Machine Sequencing To Minimize Mean Flow Time with Minimum Number Tardy”, **Naval Research Logistics Quarterly,** Volume 22,

pp. 585-592, 1975.
66. Moore, J. M., "An n Jobs, One Machine Sequencing Algorithm for Minimizing The Number of Late Jobs", **Management Science,** Volume 15, No: 1, pp. 102-109, 1968.
67. Hodgson, T. J., "A Note on Single-Machine Sequencing with Random Processing Times", **Management Science,** Volume 23, pp. 1144-1146, 1977.
68. Kiran, A. S., and Unal, A. T., "A Single Machine Problem with Multiple Criteria", **Naval Research Logistics Quarterly,** Volume 38, pp. 721-727, 1991.
69. Kondakci, S. K. and Bekiroğlu, T., "Scheduling with Bicriteria Scheduling: Total Flowtime and Number of Tardy Jobs", **International Journal of Production Economics,** Volume 53, pp. 91-99, 1997.
70. Karasakal, E. K. and Köksalan, M., "A Simulated Annealing Approach to Bicriteria Scheduling Problems on a Single Machine", **Journal of Heuristics,** Volume 6, pp. 311-327, 2000.
71. Lawler, E. L., "Optimal Sequencing of A Single Machine Subject To Precedence Constraints", **Managemet Science,** Volume 19, pp. 544-546, 1973.
72. John, T. C., and Sadowski, R. P., **On A Bicriteria Scheduling Problem,** Presented at ORSA / Tims Meeting, Dallas, Texas, November, 1984.
73. Cheng, T. C. E., "An Improved Solution Procedure for The $n/1//\max_{i}\{\gamma_i(C_i)\} \rightarrow \sum C_i$ Scheduling Problem", **Journal of Operations Research Society of Japan,** Volume 42, No: 5, pp. 413-417, 1991.
74. Hoogeveen, J. A., and Van de Velde, S. L., "Polinomial-Time Algorithms for Single Machine Multicriteria Scheduling", **Centre for Mathematics and Computer Science,** P.O.Box. 4079, 1009 AB Amsterdam, The Netherland, 1-13, 1990.
75. Köksalan, M., Azizoğlu, M. and Kondakçı, S. K., "Minimizing Flowtime and Maximum Earliness on a Single Machine", **IEE Transactions,** Volume 30, pp. 192-200, 1998.
76. Gelders, L. F., and Kleindorfer, P. R., "Coordinating Aggregate and Detailed Scheduling in The One Machine Job Shop, Part I. Theory", **Operations Research,** Volume 22, pp. 46-60, 1974.
77. Gelders, L. F., and Kleindorfer, P. R., "Coordinating Aggregate and Detailed Scheduling in The One Machine Job Shop, Part II. Computation and Structure", **Operations Research,** Volume 23, No: 2, pp. 312-324, 1975.
78. Fry, T. D., Leong, G. K. ve Rakes T. R., "Single Machine Scheduling: A Comparison of Two Solution Procedures", **OMEGA International Journal of Management Science,** Volume 15, No: 4, pp. 277-282, 1987.
79. Taboun, S. M., Abib, A. H. and Atmani, A., "Generating Efficient Points of Bicriteria Scheduling Problem by Using Compromise Programming", **Computers and Industrial Engineering,** Volume 29, No: 1-4, pp. 227-231, 1995.
80. Vickson, R. G., "Choosing The Job Sequence and Processing Times to

Minimize Total Processing Plus Flow Cost on a Single Machine", **Operations Research,** Volume 28, No: 5, pp. 1155-1167, 1980.
81. Cheng, T. C. E., Kovalyov, M. Y., and Tuzikov, A. V., "Single Machine Group Scheduling with Two Ordered Criteria", **Journal of Operational Research Society,** Volume 47, pp. 315-320, 1996.
82. Fry, T. D. and Leong, G. K., "A Bi-criterion Approach to Minimizing Inventory Costs on a Single Machine When Early Shipments Are Forbidden", **Computers and Operations Research,** Volume 14, No: 5, pp. 363-368, 1987.
83. Elmaghraby, S. E., and Pulat, P. S., "Optimal Project Compresion with Due Dated Events", **Naval Research Logistics Quarterly,** Volume 26, pp. 331-348, 1979.
84. Lin K. S., "Hybrid Algorithm for Sequencing with Bicriteria", **Journal of Optimization Theory and Applications,** Volume 39, No: 1, pp. 105-124, 1983.
85. Hoogeveen, J. A., and Van De Velde, S. L., "Scheduling with Target Start Times", **European Journal of Operational Research,** Volume 129, pp. 87-94, 2001.
86. Gupta, J. N. D., Ho, J. C., and Van Der Veen, J. A. A., "Single Machine Hierarchical Scheduling with Customer Orders and Multiple Job Classes", **Annals of Operations Research,** Volume 70, pp. 127-143, 1997.
87. Ishii, H., Tada, M., and Nishida, T., "Bi-criteria Scheduling Problem on Uniform Processors", **Mathematical Japonica,** Volume 35, No: 3, pp. 515-519, 1990.
88. Daniels, R. L., "Incorporating Preference Information Into Multi-objective Scheduling", **European Journal of Operational Research,** Volume 77, pp. 272-286, 1994.
89. Shanthikumar, J. G., "Scheduling n Jobs on One Machine to Minimize the Maximum Tardiness with Minimum Number Tardy", **Computers and Operations Research,** Volume 10, No: 3, pp. 255-266, 1983.
90. Gupta, J. N. D., and Ramnarayanan, R., "Single Facility Scheduling with Dual Criteria: Minimizing Maximum Tardiness Subject to Minimum Number of Tardy Jobs", **Production Planning and Control,** Volume 70, pp. 127-143, 1996.
91. Gupta, J. N. D., Hariri, A. M. A. and Potts, C. N., "Single-Machine Scheduling to Minimize Maximum Tardiness with Minimum Number of Tardy Jobs", **Annals of Operations Research,** Volume 92, pp. 107-123, 1999.
92. Gupta, S., and Sen, T., "Minimizing The Range of Lateness on a Single Machine", **Journal of The Operations Research Society,** Volume35, No: 9, pp. 853-857, 1984.
93. Tegze, M., and Vlach, M., "Improved Bounds for The Range of Lateness on a Single Machine", **Journal of The Operations Research Society,** Volume 39, No: 1, pp. 675-680, 1988.
94. Liao, C-J., and Huang R-H., "An Algorithm for Minimizing The Range of Lateness on a Single Machine", **Journal of Operations Research Society,**

Volume 42, No: 2, pp. 183-186, 1991.

95. Güner, E., **Tek Makinalı Sistemler İçin Çok Ölçütlü Çizelgeleme Algoritmaları,** Ph. D., Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1994.
96. Güner, E., Erol, S., and Tani, K., "One Machine Scheduling to Minimize The Maximum Earliness with Minimum Number of Tardy Jobs", **International Journal of Production Economics,** Volume 55, pp. 213-219, 1998.
97. Hoogeveen, J. A., "Minimizing Maximum Promptness and Maximum Lateness on A Single Machine", **Mathematics of Operations Research,** Volume 21, No: 1, 100-114, 1996.
98. Carraway, R. L., Chambers, R. J., Morin, T. L., and Moskowitz, H., "Single machine Sequencing with Nonlinear Multicriteria Cost Functions: An Application of Generalized Dynamic Programming", **Computers and Operations Research,** Volume 19, No: 1, pp. 69-77, 1992.
99. Chang, P. C., and Su, L. H., "Scheduling n Jobs on One Machine to Minimize The Maximum Lateness with a Minimum Number of Tardy Jobs", **Computers and Industrial Engineering,** Volume 40, pp. 349-360, 2001.
100. Duffuaa, S. O., Raouf, A., Ben-Daya, M., and Makkı, M., "One-Machine Scheduling to Minimize Mean Tardiness with Minimum Number Tardy", **Production Planning ve Control,** Volume 8, No: 3, pp. 226-230, 1997.
101. Chang, P. C. and Lee, H. C., "A Greedy Heuristic for Bicriterion Single Machine Scheduling Problems", **Computers and Industrial Engineering,** Volume 22, No: 2, pp. 121-131, 1992.
102. De, P., Grosh, J. B., and Wells C. E., "Heuristic Estimation of The Efficent Frontier for a Bi-Criteria Scheduling Problem", **Decision Sciences,** Volume 23, No: 3, pp. 596-609, 1992.
103. Cheng, T. C. E., and Chen, Z.-L., Li, C.-L., and Lin, B. M. T., "Scheduling to Minimize The Total Compression and Late Costs", **Naval Research Logistics Quarterly,** Volume 45, pp. 67-82, 1998a.
104. Cheng, T. C. E., Janiak, A., and Kovalyov, M. Y., "Bicriterion Single Machine Scheduling with Resource Dependent Processing Time", **SIAM Journal on Optimization,** Volume 8, No: 2, pp. 617-630, 1998b.
105. Diskup, D., and Cheng, T. C. E., "Single-Machine Scheduling with Controllable Processing Times and Earliness, Tardiness and Completion Time Penalties", **Engineering Optimization,** Volume 31, pp. 329-336, 1999.
106. Klamroth, K., and Wiecek, M. M., "A Time-Dependent Multiple Criteria Single Machine Scheduling Problem", **European Journal of Operational Research,** Volume 135, pp. 17-26, 2001.
107. Lin, C-H., and Lee, C-Y., "Single-Machine Stochastic Scheduling with Dual Criteria", **IIE Transactions,** Volume 27, pp. 244-249, 1995.
108. Crabill T. B., and Maxwell, W. L., "Single-Machine Sequencing with Random Processing Time and Random Due-Dates", **Naval Research Logistics Quarterly,** Volume 16, pp. 549-554, 1969.
109. Frost, F. G., "Bicriterion Stochastic Scheduling on One or more Machines", **European Journal of Operational Research,** Volume 80, pp. 404-409, 1995.

110. Lawler, E. L., and Labetoulle, J., "On Preemptive Scheduling of Unrelated Parallel Processor", **Journal of The Association for Computing Machinery,** Volume 25, pp. 612-619, 1978.
111. Sundararaghavan, P., and Ahmed M., "Minimizing The Sum of Absolute Lateness in Single Machine and Multimachine Scheduling", **Naval Research Logistic Quarterly,** Volume 31, pp. 325-333, 1984.
112. Emmons, H., "Scheduling to A Common Due Date on Parallel Uniform Processors", **Naval Research Logistic,** Volume 34, pp. 803-810, 1987.
113. Leung, J.-T., and Young, G., "Minimizing Schedule Length Subject to Minimum flow Time", **SIAM Journal on Computing,** Volume 18, pp. 314-326, 1989.
114. Alidaee, B., and Ahmadian, A., "Two Parallel Machine Sequencing Problems Involving Controllable Job Processing Times", **European Journal of Operational Research,** Volume 70, pp. 335-341, 1993.
115. Cheng, T., and Chen, Z.–L., "Parallel-machine Scheduling Problems with Earliness and Tardiness Penalties", **Journal of Operational Research Society,** Volume 45, pp. 685-695, 1994.
116. Li, C.-J., and Cheng, T., "The Parallel Machine Min-max Weighted Absolute Lateness Scheduling Problem", **Naval Research Logistic,** Volume 41, pp. 33-46, 1994.
117. McCormick, S., and Pinedo, M., "Scheduling n Independent Jobs on m Uniform Machines with Both Flowtime and Makespan Objectives: A Parametric Analysis", **ORSA Journal on Computing,** Volume 7, pp. 63-77, 1995.
118. Suresh, V., and Chaudhuri, D., "Bicriteria Scheduling Problem for Unrelated Parallel Machines", **Computers and Industrial Engineering,** Volume 30, No: 1, pp. 77-82, 1996.
119. Mohri, S., Masuda, T., and Ishii, H., "Bi-criteria Scheduling Problem on Three Identical Parallel Machines", **International Journal of Production Economics,** Volume 60-61, pp. 529-536, 1999.
120. Sahni, S., "Preemptive Scheduling with Due Dates", **Operations Research,** Volume 17, pp. 515-519, 1979.
121. Gupta, J. N. D. and Ruiz-Torres, A. J., "Minimizing Makespan Subject to Minimum Total Flow-Time on Identical Parallel Machines", **European Journal of Operational Research,** Volume 125, pp. 370-380, 2000.
122. Gupta, J. N. D., Ho, J. C., and Webster, S., "Bicriteria Optimisation of The Makespan and Mean Flowtime on Two Identical Parallel Machines", **Journal of Operational Research Society,** Volume 51, pp. 1330-1339, 2000.
123. T'kindt, V., Billaut, J.-C., and Proust C., "Solving a Bicriteria Scheduling Problem on Unrelated Parallel Machines Occurring in The Glass Bottle Industry", **European Journal of Operational Research,** Volume 135, pp. 42-49, 2001.