

Proje Planlamada Kaynak Kısıtlı Çizelgeleme¹

Gündüz Ulusoy

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sabancı Üniversitesi, Orhanlı, Tuzla, 81474 İstanbul.
e-posta adresi: gunduz@sabanciuniv.edu

1. Giriş

Proje yönetimine 1950li ve 1960lı yıllarda gösterilen yoğun ilgi daha sonra azalmış ancak yaklaşık son on yılda yeniden hem araştırmacıların hem de uygulamacıların yakın ilgisini çekmeye başlamıştır. Konu ile ilgili yayımlanan makale ve kitapların sayısındaki büyük artıştan, bilgisayar yazılımlarının yaygınlaşmasından ve düzenlenen konferans ve seminer adedinin giderek artmasından proje yönetimine olan ilginin yoğunlaştığını anlayabiliyoruz.

Proje yönetimine olan ilginin artmasını iş yapma biçiminde son on yıllarda oluşan paradigma değişimi ile izah etmek mümkündür (Ray ve Rinzler, 1993). Organizasyonların giderek daha yatay bir yapıya yöneldiğini gözliyoruz. Bölümler arasındaki duvarların yıkılmaya, eş zamanlı yönetimin geliştirilmeye ve yerleştirilmeye çalışıldığını görüyoruz. Sorunların, sistem anlayışından hareketle, bölümlerin üstünde ve değişik bölümlerin katkısını içerecek biçimde tanımlanmaya ve projelendirilmeye çalışıldığını görüyoruz. Organizasyonlarda iş yapma biçimi projelere doğru kaymaktadır. Matris organizasyon anlayışı doğrultusunda proje ekipleri oluşturulmakta, kişiler organizasyon içinde bir birime bağlı olmakla birlikte değişik projelerde görev yapmaktadır. Bu kapsamda ele alındığında, projenin yönetimine destek önemli bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Proje finansmanı, proje organizasyonu, proje bütçeleme, proje çizelgeleme, takım oluşturma, özendirme, proje çizelge ve bütçe takibi gibi bir çok konuda karar destek sistemlerine gereksinim vardır. Bu konularda uygulamalarda kullanılabilecek metodoloji ve yazılımlar geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ticari yazılımlarda giderek artan bir derinlik söz konusudur. De Wit ve Herroelen'in (1990) ticari yazılımların kaynak kısıtlı çizelgeleme modüllerinin çok kötü durumda olduğu ifadesinden bu yana akademik ortamda geliştirilen algoritmaların yavaş da olsa ticari programlara nüfuz ettiğini gözlemliyoruz. Proje süresinin en aza indirilmesini sağlama yönünde ticari yazılımların başarısı uygulama bakımından önemlidir. Lova ve Tormos (2000) yaptıkları bir karşılaştırma sonucu, tek proje çizelgelemede proje süresi açısından en iyi performansı Primavera yazılımının; birden çok proje çizelgeleme durumunda da Primavera ve Superproject yazılımlarının gösterdiğini rapor etmektedir. Ancak Lova ve Tormos tarafından önerilen sezgisel çizelgeleme kuralları ile yazılımların sonuçları arasındaki fark henüz bu alanda daha çok çalışmaya gerek olduğunu göstermektedir. Benzer sonuçlar Maroto vd. (1999) tarafından da rapor edilmiştir. Bilgisayar yazılımlarının kalitesi artıkça, proje planlama ve özellikle proje çizelgelemenin uygulamada daha etkin ve yaygın bir kullanımını öngörebiliriz.

Yöneylem araştırması alanında proje yönetimine olan ilgi proje planlama ve takibi başlığı altında odaklanmış ve genellikle proje çizelgeleme üzerine yoğunlaşmıştır. Proje çizelgeleme alanında kaynak kısıtlı proje çizelgeleme konusu oldukça yoğun olarak işlenmiştir. Kaynakçadan da kolaylıkla görüleceği gibi, kaynak kısıtlı proje çizelgeleme araştırmacılar tarafından çok ayrıntılı olarak ve çok çeşitli yönleri ile irdelenmiştir. Bu nedenle, bu makale çerçevesinde yapılan tüm çalışmalara yer verildiği söylenemez. Örneğin, kaynak kullanım profili düzleme (*resource levelling*) konusuna hiç girilmemiştir. Makalede yer alan başlıklar altında çeşitli açılardan önemli görülen çalışmalara yer verilmiştir. Bazı konulara da, bir makalenin boyutlarını aşmama düşüncesi ile hiç girilmemesi uygun görülmüştür. Makale tümü ile deterministik proje serimlerine hasredilmiş; stokastik proje serimlerine hiç girilmemiştir.

Birinci bölümde proje çizelgeleme konusunda bazı genel ve temel bilgiler verilmektedir. İkinci bölümde, kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi tanıtılmaktadır. Tek modlu kaynak kullanımlı projelerde proje süresinin enazlanması problemi üçüncü bölümde ele alınmaktadır. Problemin matematiksel gösterimi verilmekte ve teknik yazında önerilmiş kesin ve sezgisel çözüm yöntemleri

¹ *Yöneylem Araştırması - Halim Doğrusöz'e Armağan*, M. Köksalan, N. Erkip (Editörler), 6. Bölüm, 89-128, Ankara, 2000.

üzerinde durulmaktadır. Aynı ele alış biçimi dördüncü bölümde çok modlu kaynak kullanımı projelerde proje süresinin enazlanması problemi için uygulanmaktadır. Beşinci bölümde nakit akışlarının net bugünkü değerinin ençoklanması problemi değişik yönleri ile irdelenmekte ve kesin ve sezgisel çözüm yöntemleri tartışılmaktadır. Kaynak kısıtlı birden çok projenin çizelgelenmesi altıncı bölümde; çok amaçlı kaynak kısıtlı proje çizelgeleme de yedinci bölümde incelenmektedir.

1.1. Kaynakların Sınıflandırılması

Yöneylem araştırmasının temel işlevlerinden birisi de kaynak tahsisidir. Kısıtlı kaynakların mevcudiyeti, kaynakların kullanımında belirli amaç işlevini veya işlevlerini eniyileyecek kaynak tahsislerini önemli kılar. Kaynaklar faaliyetlerin gerçekleştirilmesi için kullanılırlar. Faaliyetleri burada geniş anlamda tanımlıyoruz; örneğin, yeni bir katın betonunun atılması, bir frezenin bir parçanın yüzeyini belirli bir ölçüye indirmesi, bir işlemcinin bir alt programı işlemesi gibi. Kaynakları çeşitli şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Zaman bazına göre sınıflandırmada; yenilenebilir (*renewable*), yenilenemez (*nonrenewable*) ve çift yönden kısıtlı (*doubly constrained*) kaynaklar şeklinde bir sınıflandırma yapılır. Yenilenebilir kaynakların bir zaman birimi içindeki toplam kullanım miktarı kısıtlı olmakla birlikte kullanım ile tüketilmezler. Belirli bir faaliyet çerçevesinde kullanıldıktan sonra faaliyet sona erince tekrar kullanıma hazır duruma gelirler. Örneğin iş makineleri veya bilgisayar işlemcileri gibi. Buna mukabil, yenilenemez kaynaklar kullanımları esnasında tüketilirler. Çeşitli faaliyetlerde kullanılan tüketim malzemeleri yenilenemez kaynakların tipik örnekleridir. Yenilenemez kaynakların proje süresi boyunca kullanılabilir toplam miktarı üzerinde kısıt vardır. Bir kaynağın hem bir zaman birimi içinde kullanım miktarı hem de proje süresi boyunca toplam tüketimi üzerinde kısıt olması durumunda bu kaynak çift yönden kısıtlı kaynak olarak nitelendirilir. Örneğin para çift yönden kısıtlı bir kaynak olabilir; zaman birimi içindeki harcama kısıtlı olabildiği gibi proje süresince toplam harcama miktarı da kısıtlı olabilir.

Kısmi yenilenebilir kaynaklar (*partially renewable resources*) modellemede belirli zaman dilimleri için farklı kaynak kullanımı üst sınırı tanımlama olanağı vermektedir. Buna göre, örneğin, vardiya düzenini problem gösterimine dahil etmek mümkün olmaktadır. Bu şekilde, daha gerçekçi problem tanımlarına olanak tanınmaktadır (Drexel vd., 1999). Diğer bir farklı kaynak kullanımı durumu da bir faaliyetin uygulama süresi boyunca değişken kaynak kullanımı talebi olmasıdır (Sprecher, 1994).

Diğer bir kaynak sınıflandırma da kaynakların bölünebilirliğine dayandırılır. Adet olarak ifade edilen, yani bölünebilen kaynaklara, örneğin beş adet iş makinesi gibi, ayrık (*discrete*) kaynaklar diyoruz. Buna mukabil, örneğin elektrik enerjisi gibi bölünemeyen kaynaklara da sürekli (*continuous*) kaynaklar diyoruz.

Bu makalede kaynak kelimesi yenilenebilir kaynağı ifade etmek üzere kullanılacaktır. Yenilenebilir kaynak türünün dışında bir kaynak tipi kullanıldığında bu özel olarak ifade edilecektir.

1.2. Öncüllük İlişkileri

Çizelgeleme, sıralamadan farklı olarak faaliyetlerin hangi sıradaki gerçekleştirilecekleri bilgisi dışında bu faaliyetlerin ne zaman başlayıp ne zaman biteceği bilgisini de içerir. Çizelgelenen faaliyetlerinin kullandığı kaynaklar kısıtlı olabildiği gibi faaliyetler arasında öncüllük ilişkileri de olabilir. Öncüllük ilişkileri teknolojik bir gereksinimi yansıttığı gibi, tamamen yönetsel bir kararın sonucu da olabilirler. Öncüllük ilişkileri, zaman bazında faaliyetler arasındaki başlangıç – bitiş ilişkilerini belirler. Bir faaliyet, öncül faaliyetlerinin hepsi bitmeden başlayamaz. Genellikle kabul edilen bir faaliyetin bütün öncülleri tamamlanınca hemen başlayabileceğidir. Ancak uygulamada farklı durumlar söz konusu olabilmektedir. Örneğin, eşzamanlı (*concurrent*) tasarım faaliyetlerinde proje süresini kısaltmak için bazı faaliyetlerin kısmen paralel yürütülmesi istenir. Bir faaliyet sonucu elde edilen bozulabilir bir malzemeyi kullanacak olan bir faaliyetin malzeme hazır olduktan sonra belirli bir süre içinde başlaması istenebilir. Bu değişik durumları modelleyebilmek için genelleştirilmiş öncüllük ilişkileri (*generalized precedence relations*) tanımlanmıştır. Bunlar; Başlangıç-Bitiş (SF), Başlangıç-Başlangıç (SS), Bitiş Bitiş (FF) ve Bitiş-Başlangıç (FS) tipi öncüllük ilişkileridir. Bütün bu öncüllük ilişkileri için geçerli olmak üzere, en az bekleme süresi (*minimal time lag*) ve en çok bekleme süresi (*maximal time lag*) tanımlanmıştır. Örneğin, bir faaliyetin başlaması için diğer bir faaliyetin en azından belirli bir süre önce başlamış olması isteniyorsa, bu bir SS ilişkisidir ve en az bekleme süresi ile modellenir. Bir faaliyetin başlaması için diğer faaliyetin başlamasından sonra belirli bir süreden fazla geçmemiş olması gerekiyorsa, bu bir SS ilişkisidir ve en çok bekleme süresi ile modellenir.

Makalenin boyutlarını aşmamak amacı ile bu konu burada daha fazla irdelenmemiştir. İlgilenenler için De Reyck vd. (1999) bir başlangıç noktası oluşturabilir.

1.3. Çizelge Türleri

Çizelge türlerini tanımlamadan önce, çizelge türlerinin tanımına esas teşkil eden yerel ve global sola-kaydırma kavramlarını görelim (Baker, 1974). Yerel sola-kaydırma durumunda, çizelgedeki bir faaliyet diğer faaliyetlerin başlangıç anlarını ve çizelge sıralarını değiştirmeden daha erken zamanlarda başlatılabilir. Bu şekilde elde edilen tüm değişik çizelgeler öncüllük ilişkileri ve kaynak kısıtları açısından olurludur. Global sola kaydırmada ise, çizelgedeki bir faaliyet başlangıç anlarını değiştirmeden ancak çizelge sırasını değiştirerek daha erken zamanlarda başlatılabilir. Dolayısı ile, bu işlemi bir kaymadan ziyade bir sıçrama olarak nitelendirebiliriz.

Hiçbir faaliyetine yerel sola-kaydırma uygulanamayan olurlu bir çizelge, yarı aktif (*semi-active*) çizelge olarak tanımlanır.

Hiçbir faaliyetine yerel veya global sola-kaydırma uygulanamayan olurlu bir çizelge, aktif (*active*) çizelge olarak tanımlanır.

Bir olurlu çizelge S düşünelim ki, bu çizelgedeki her faaliyet, o faaliyetin süresi olan d adette birim zamanlı ve ardarda atanmış faaliyetten oluşsun. Bu şekilde elde edilen olurlu çizelgeye de S_{UTD} diyelim. Eğer S_{UTD} çizelgesi aktif ise, S çizelgesi bir ertelemesiz (*nondelay*) çizelge olarak tanımlanır.

Bu tanımlardan hareketle, şu kuramı ortaya koyabiliriz: S çizelgeler kümesi, FS olurlu çizelgeler kümesi, SAS semi aktif çizelgeler kümesi, AS aktif çizelgeler kümesi, NDS ertelemesiz çizelgeler kümesi olsun. Buna göre, $NDS \subseteq AS \subseteq SAS \subseteq FS \subseteq S$ ilişkileri geçerlidir.

Bir çizelgeleme ortamında enazlama uygulanan bir performans ölçütü f olsun ve j faaliyetinin bitiş zamanını C_j ile gösterelim; C_1, \dots, C_j . Eğer, herhangi iki çizelge için, $f(C_1, \dots, C_j) > f(C'_1, \dots, C'_j)$ ilişkisi $C_1 \geq C'_1, \dots, C_j \geq C'_j$ ima ediyorsa, performans ölçütü f düzgün bağımlı (*regular*) olarak nitelendirilir. Örneğin, proje süresinin enazlanması düzgün bağımlı bir performans ölçütüdür. Buna karşın, yenilenemez kaynak kullanımının enazlanması düzgün bağımlı bir performans ölçütü değildir.

Çizelgeleme algoritmalarının tasarımı açısından önemli bir gözlem, düzgün bağımlı performans ölçütlerinin kullanıldığı durumlarda, ertelemesiz çizelgeler kümesinin eniyi çözümü içermediğidir (Kolisch, 1996b).

1.4. Sınama Yöntemleri, Kıyaslama Problemleri ve Karşılaştırma Kriterleri

Geliştirilen yöntemlerin sınanması ve görelî üstünlüklerinin saptanmasının objektif bir bazda yapılabilmesi için çeşitli araştırmacılar tarafından sınama yöntemleri ve kıyaslama problemleri geliştirilmiştir.

Sınama yöntemlerini temelde iki başlık altında toplayabiliriz: (i) En kötü durum analizi (bkz. örneğin, Fischer, 1980); (ii) istatistiki analiz ve deney tasarımı (bkz. örneğin, Golden ve Steward, 1985).

En kötü durum analizi, bir algoritmanın performansına eniyi çözümün işlevi olarak bir sınır getirir. Örneğin, kutu doldurma (*bin packing*) problemi için ilk uyanı yerleştiren (FF - *first fit*) karar kuralını uygulayan algoritma için en kötü durum analizi şu sonucu vermiştir (Johnson vd., 1974): $[FF(I) \leq (17/10)OPT(I) + 2]$. Burada, I bir problem durumunu, $FF(I)$, I problem durumuna FF algoritmasının uygulanması ile elde edilen sonucu, $OPT(I)$, I problem durumunun eniyi çözümünü ifade etmektedir. En kötü durum analizi oldukça kötümser bir yaklaşımdır ve getirilen sınır oldukça sıkı olmadığı (ki genellikle gevşektir), pratik bir katkısı yoktur.

İstatistiki analiz ve deney tasarımı, basit bir aritmetik ortalamadan başlayarak geniş bir yaklaşım yelpazesini kapsar. Bu yaklaşımların temelinde bir algoritmayı değişik problemler çözerek değerlendirmek yatar. Amaç, algoritmanın genelde nasıl davrandığını bilmenin ötesinde, hangi şartlar altında iyi ve hangi şartlar altında kötü davrandığını irdelemektir. Problem parametrelerinin değişik düzeylerini içeren bir deney tasarımı ve bunu takip eden istatistiki değerlendirmeler bir fikir verecektir. İrdelenenin sadece ortalama değil, dağılımlar bazında da yapılması algoritmanın performansının daha iyi değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır. Sınama yapmak üzere türetilen problemlerin niteliği sınamanın sağlığını önemli ölçüde etkiler.

Sınama problemleri belirli parametreler esas alınarak türetilir. Büyüklük için bir parametre projedeki faaliyet adedidir. Proje seriminin karmaşıklığı (*network complexity*), (ayrıt sayısı/düğüm sayısı) olarak tanımlanmıştır. Kaynak türü faktörü (*resource factor*), faaliyet başına düşen kaynak türünü ifade eder. Her faaliyetin kullandığı kaynak türü adedinin toplanarak faaliyet adedine bölünmesi ile bulunur. Kaynak gücü (*resource strength*), bir kaynağın üst kullanım sınırının bu kaynağın faaliyet başına ortalama kullanım değerine bölünmesi ile elde edilir. Çok modlu durum için kaynaklar ile ilgili parametre tanımları karmaşıklaşmakla birlikte, temel anlayış aynı kalmaktadır.

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme ile ilgili teknik yazında önerilen kıyaslama problemlerinin bir dönem en yaygın kullanılanı Patterson'un (1984) 100 problemi olmuştur. Alvarez-Valdes ve Tamarit'in (1989) geliştirdiği sınama problemleri de kıyaslama problemleri olarak yaygın kullanılmıştır. Ancak, daha genel bir sonuca ulaşmak için sınama problemleri türeteçlerinin geliştirilmesi üzerinde durulmuştur. Bunların en çok kabul göreni Kolisch vd. (1995) tarafından geliştirilen ve PROGEN olarak ifade edilendir. Kolisch ve Sprecher (1996a) PSPLIB olarak isimlendirdikleri bir kıyaslama problemleri kümesi oluşturmuş ve kullanıma açmışlardır. Gerek PSPLIB gerekse Patterson (1984), Alvarez-Valdes ve Tamarit (1989) ve Boctor (1993) kıyaslama problemlerine, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Christian-Albrechts Universität zu Kiel'in web sitesi bünyesindeki <http://www.bwl.uni-kiel.de/Prod/psplib/index.html> adresinden ulaşılabilir (Kolisch vd., 1999). Bugün için en çok kullanılan kaynak budur.

Başka problem verisi türeteçleri de Demeulemeester vd. (1993) ve Vanhoucke vd. (2000a) tarafından önerilmiştir.

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme teknik yazınında genellikle uygulanan karşılaştırma kriterleri; eniyi çözümden ortalama sapma (*lateness*) ve bunun standart sapması, sezgisel algoritmanın eniyi çözümü kaç problemde bulduğu ve eniyi çözümün bilinmediği enazlama problemlerinde altsınırdan - ençoklama problemlerinde üstsınırdan - olmak üzere ortalama sapma ve bunun standart sapmasıdır. Bunlar çözümün kalitesini değerlendirmeye yönelik kriterlerdir. Diğer bir kriter ise elde edilen çözüm için yapılan çabadır. Bu çaba genellikle CPU-saniye olarak ifade edilmiştir. Ancak raporlamanın değişik bilgisayarlar-işlemcilerle dayandırılması karşılaştırmayı olanaksız kılabilmektedir. Bu nedenle, giderek daha yaygınlaşan bir uygulama, algoritmaların yarattığı, örneğin, ilk 1000 veya 5000 çizelgenin çözüm kalitesini karşılaştırmaktır.

Yukarıda da belirtildiği gibi, eniyi çözümün bilinmemesi durumunda, önerilen algoritmanın çözümü ile problemin altsınırı (üstsınırı) karşılaştırılır. Karşılaştırmanın başarılı olması için alt/üstsınırın eniyi çözüme mümkün olduğunca yakın olması, diğer bir deyişle etkin olması istenir. Dal-sınır yöntemlerinin uygulanmasında da, kullanılan alt/üstsınırların etkinliği yöntemin verimliliğini önemli ölçüde etkiler. Daha etkin alt/üstsınırların hesaplanması genellikle daha çok hesaplama çabası ister. Bu nedenle, daha az hesaplama ile elde edilebilecek daha etkin alt/üstsınır önerilerinin geliştirilmesi önemli bir araştırma alanıdır.

2. Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme

2.1. Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Probleminin Tanımı

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi (KKPÇP), kısıtlı kaynaklar kullanılarak bir projeyi oluşturan faaliyetlerin, öncüllük ilişkilerini ihlal etmeden amaç işlevini eniyileyecek biçimde çizelgelenmesidir.

Problemin tanımına esas teşkil eden varsayımları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- i. Faaliyet süreleri deterministiktir.
- ii. Faaliyetlerin birim zaman kaynak kullanımı sabittir.
- iii. Bir faaliyete atanan kaynak faaliyet süresince o faaliyet tarafından kullanılır.
- iv. Başlatılan faaliyetler kesintisiz bitirilmek zorundadır; ara verilemez.
- v. Faaliyetler iptal edilemez. Proje serimindeki her faaliyet gerçekleştirilmek zorundadır.

Bu varsayımların bazıları kaldırılarak daha farklı problem tanımlarına gitmek mümkündür. Örneğin, faaliyet sürelerinin rassal olmasına izin verilmesi durumunda araştırma-geliştirme projeleri gibi faaliyetlerinin içeriği tam olarak öngörülemeyen projeler için daha gerçekçi tanımlamalar yapılabilmektedir. Bir kaynağın aynı anda birden fazla faaliyete hizmet verdiği durumlar vardır – aynı anda birden fazla parça işleyebilen takım tezgâhları gibi.

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi teknik yazında yoğun olarak irdelenmekte olan bir problemdir. Bu konuda son yıllarda yayımlanmış tarama makaleleri olarak, Oğuz ve Bala (1994), Özdamar ve Ulusoy (1995), Kolisch ve Padman (1997), ve Herroelen vd.ni (1998) gösterebiliriz. Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme probleminin proje yönetimi için ifade ettiği pratik değerin yanında, teorik açıdan da araştırmacılar açısından bir çekiciliği vardır. Proje süresinin enazlandığı kaynak kısıtlı proje çizelgeleme probleminin *NP-hard in the strong sense* bir problem olduğu Blazewicz vd. (1983) tarafından gösterilmiştir.

2.2. KKPÇPnin Serim Üzerinde Gösterimi

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi bir serim (*network*) üzerinde tanımlanır. Bilindiği gibi bir serim, düğümler (*nodes*) kümesi $\{V\}$, ayrıtlar (*arcs*) kümesi $\{A\}$ ve düğümler ve ayrıtları ilişkilendiren ilişkiler kümesi $\{\Phi\}$ ile tanımlanır. İki tanımlama seçeneği vardır. Birinci uygulamada; faaliyetler ayrıtlar kümesinin, olaylar ise düğümler kümesinin elemanları olarak tanımlanır. İlişkiler kümesi, hangi faaliyetin hangi olaylar arasında yer aldığı bilgisini içerir. Bu tanımlama seçeneğine, *faaliyetlerin ayrıtlarda gösterimi* (FAG) diyoruz. FAGnde serimin oluşturulmasında yapay faaliyet tanımına gerek duyulabilmektedir. Proje çizelgeleme problemlerinin serim üzerinde tanımlanmasında ilk kullanılan gösterim şekli FAGdir. Diğer tanımlama seçeneği, faaliyetlerin düğümler üzerinde gösterildiği tanımlama şeklindedir. Ayrıtlar öncüllük ilişkilerini gösterir. Bu tanımlama seçeneğine, *faaliyetlerin düğümlerde gösterimi* (FDG) diyoruz. FDG yapay faaliyet tanımına gerek olmadığı için daha basit bir gösterimdir.

İki gösterimde de dikkat edilmesi gereken husus, proje seriminin sadece bir başlangıç ve sadece bir bitiş düğümü olması gereğidir. Aksi durumda, yapay bir başlangıç ve/veya bitiş düğümü tanımlanır.

Projenin modellenmesinde faaliyetlerin tanımlanma ayrıntısı önemli bir yere sahiptir. Projenin iş kapsamı kendi içinde bir bütün oluşturan faaliyetlere bölüştürülür. Faaliyetler belirli bir süre içinde belirli kaynaklar kullanılarak gerçekleştirilir. Faaliyetler bir maliyet merkezi olarak tanımlanabilir. Faaliyet adedi projenin yönetiminde amaçlanan ayrıntı düzeyi tarafından belirlenir. Faaliyet adedi artırıldıkça, toplanacak, depolanacak ve işlenecek veri miktarı da artacak; ayrıca takip edilecek ve raporlanacak faaliyet sayısı da artmış olacaktır. Diğer bir deyişle, faaliyet adedinin artması proje yönetimi iş yükünü önemli ölçüde artırmaktadır. Faaliyet bazında, kapsam geniş tanımlanarak faaliyet adedi düşük tutulabilir.

2.3. Faaliyet - Kaynak İlişkileri

Bir faaliyetin gerçekleştirilme süresi ile kullanılan kaynaklar arasında bir ilişki vardır. Genel olarak, birim zaman içinde daha çok kaynak kullanımının maliyeti yükseltmesi, faaliyet süresini ise azaltması beklenir. Bu öngöründen hareketle, bu uygulamayı maliyet-süre ödünleşimi (*time-cost trade-off*) şeklinde modelleyebiliriz. Kullanılan kaynağın ayrık veya sürekli olmasından bağımlı olarak maliyet-süre ödünleşimi ayrık veya sürekli bir işlev olarak ifade edilir. Ayrık işlev durumunda, işlevin her bir maliyet-süre çiftine karşı gelen noktası bir mod (*mode*) olarak nitelendirilir. Bir veya daha fazla sayıda faaliyeti birden fazla moda sahip proje çizelgeleme problemleri çok modlu (*multi-mode*) problemler olarak nitelendirilirler.

Diğer bir ödünleşim türü kaynaklar arasındaki ödünleşimdir (*resource-resource trade-off*). Burada bir faaliyetin süresi sabittir ancak değişik kaynakların değişik kullanımları söz konusudur. Örneğin bir kanal açma faaliyetinin bir kazı makinası, bir operatör ve iki düz işçi yerine aynı süre içinde on altı düz işçi tarafından yapılması gibi.

Proje yönetiminin uygulamalarında genellikle birden fazla projenin aynı kaynak havuzundan yararlanılarak yönetimi söz konusudur. Bu tür problemler, çok projeli (*multi-project*) çizelgeleme problemleri olarak nitelendirilirler.

2.4. Değişik Amaç İşlevleri

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme probleminde değişik amaç işlevleri kullanılmıştır. Proje yöneticisi açısından bakıldığında en önemli performans ölçütlerinden birisi projenin süresidir. Projenin elde mevcut kaynaklarla en az sürede bitirilmesi hedeflenir. Kaynak kısıtlarının olmadığı varsayılan ilk proje çizelgeleme gösterimlerinde kullanılan amaç işlevi proje süresinin (C_{max}) enazlanmasıdır (Malcolm, vd., 1959; Kelley, 1961). KKPÇPnde de en yaygın olarak kullanılan amaç işlevi proje süresinin enazlanmasıdır (Özdamar ve Ulusoy, 1995). Projenin bir termini olması durumunda, termin bazlı başka

amaç işlevleri de incelenmiştir. Bunlardan bir tanesi, gecikmenin (*tardiness*) enazlanmasıdır. Bir diğeri de, tam-zamanında-üretim anlayışına yönelik olarak, erken bitirme ve gecikme toplamının enazlanması olan amaç işlevidir (Vanhoucke vd., 2000b). Burada, erken bitirme ve gecikmenin ayrı ayrı etkileri olması durumunda, ağırlıklı toplam enazlanır.

Diğer sık kullanılan bir amaç işlevi de toplam maliyet veya toplam kârın ençoklanmasıdır (Herroelen vd., 1997). Bu amaç işlevi kullanılırken, nakit akışına paranın zaman değeri uygulanarak bugünkü değeri bulunur ve maliyet veya kâr, net bugünkü değer (NBD) olarak ifade edilir.

Proje yönetimi ve toplam kalite anlayışını ilişkilendirmek amacı ile, projede yeniden işlem süresi ve maliyetini tanımlayarak enazlayan bir amaç işlevi de kullanılmıştır (Icmeli-Tukel ve Rom, 1997; Erenguc ve Icmeli-Tukel, 1999).

2.5. Proje Çizelgeleme Problemlerinin Sembolik Gösterimi

Makina çizelgeleme ve kuyruk problemlerinin sembolik gösteriminden esinlenilerek proje çizelgeleme problemlerinin de sembolik gösterimi için iki öneri geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi Herroelen vd. (1999) diğeri ise Brucker vd. (1999) tarafından önerilmiştir. Bu iki öneriden sadece Herroelen vd.'nin önerisi üzerinde kısaca durulacak ve örnekler verilecektir.

Sembolik gösterim üç alandan oluşmaktadır: a/b/c. Burada, a alanı kaynak karakteristiklerini, b alanı faaliyet karakteristiklerini ve c alanı performans ölçütlerini göstermektedir. Aşağıda bazı örnekler sunulmuştur. İlk iki örnekte kaynak kısıtı olmadığından birinci alan yer almamıştır.

- i. $cpm, c_j / npv =$ Kaynak kısıtsız bir ortamda NBDin ençoklanması problemi.
- ii. $min, c_j / npv =$ Kaynak kısıtsız ve en az bekleme süresi olan bir ortamda NBDin ençoklanması problemi.
- iii. $m, 1 / cpm, c_j / npv =$ Yenilenebilir kaynak kısıtlı bir ortamda NBDin ençoklanması problemi.
- iv. $m, 1 / cpm / C_{max} =$ Tek modlu KKPCP.
- v. $m, 1 / gpr / C_{max} =$ Genelleştirilmiş öncüllük ilişkileri altında KKPCP.

İki gösterim de halen genel kabul görmemiştir ancak Herroelen vd.'nin gösterim önerisi daha yaygın kullanılmaktadır. Uygulama ile eksiklikler görülecek ve bu gösterimler ve belki başka önerilecek gösterimler geliştirilecektir. Böyle bir gösterime ihtiyaç olduğu kesindir. Umalım ki zaman içinde araştırmacılar tek bir gösterim üzerinde fikir birliğine varırlar.

3. Tek Modlu Kaynak Kullanımlı Projelerde Proje Süresinin Enazlanması Problemi

3.1. Problemin Tanımı ve Matematiksel Programlama Gösterimi

Bu bölümde incelenecek problem, tek bir projenin yukarıda yapılan varsayımlar çerçevesinde tamamlanma süresinin enazlanması problemidir. Kaynak kullanımı tek modludur. KKPCP'nin bu en basit halinin matematiksel programlama gösterimi aşağıda verilmiştir. Bu gösterimde proje seriminin oluşturulması için FDG kullanılmıştır.

$$(P1.) \min Z = \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} tX_{jt}$$

s.t.

$$(P1.1.) \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} X_{jt} = 1 \quad j = 1, \dots, J$$

$$(P1.2.) \sum_{t=EFT_i}^{LFT_i} tX_{it} \leq \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} (t-d_j)X_{jt} \quad j = 2, \dots, J, \quad i \in P_j$$

$$(P1.3.) \sum_{j=1}^J k_{jr} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} X_{j\tau} \leq K_r \quad r \in R, \quad t=1, \dots, T$$

$$(P1.4.) \quad X_{jt} = \begin{cases} 1, & \text{eger } j \text{ faaliyeti } t \text{ dönemi sonunda bitiyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Kullanılan sembollerin tanımları aşağıda verilmiştir:

t = zaman indisi (t=1,...,T),

j = faaliyet indisi (j=1,...,J),

R = yenilenebilir kaynaklar kümesi,

d_j = j faaliyetinin süresi,

P_j = j faaliyetinin öncüllerinin kümesi,

EFT_j = j faaliyetinin en erken bitiş zamanı,

LFT_j = j faaliyetinin en geç bitiş zamanı,

k_{jr} = j faaliyetinin r kaynağından birim zaman kullanım miktarı,

K_r = r yenilenebilir kaynağının birim zaman kullanım üst sınırı.

(P1) probleminde, amaç işlevi bitiş faaliyetinin bitiş zamanını – diğer bir deyişle, proje süresini – enazlamaktadır. (P1.1) kısıt kümesi her faaliyetin mutlaka çizelgelenmesini sağlar. Kısıt kümesi (P1.2) ise, j faaliyeti ile bu faaliyetin öncülü olan i faaliyeti arasındaki öncüllük ilişkisinin yerine getirilmesi gereğini ifade eder. Birim zaman başına kaynak kısıtı ise kısıt kümesi (P1.3) ile gösterilmiştir. (P1.4) ise {0,1} değişkeni x_{jt}'nin tanımıdır. Değişken adedini azaltabilmek amacı ile x_{jt} değişkeni [EFT_j,LFT_j] zaman aralığında tanımlanmıştır. Bu zaman aralıklarının, eniyi çözümü dışlamadan en dar şekilde tanımlanması değişken adedinin düşük tutulmasına katkıda bulunacaktır.

3.2. Kesin Çözüm Yöntemleri

Daha önce de belirtildiği gibi, proje süresinin enazlandığı kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi *NP-hard in the strong sense* olarak tanımlanmış bir problemdir. Bu itibarla, kesin çözüm yöntemleri ancak belirli problem büyüklükleri için geçerli olabilmektedir. İlk kesin çözüm yöntemleri arasında 0-1 tam sayı programlama yöntemleri üzerinde de durulmuştur (Pritsker vd., 1969; Patterson ve Huber, 1974; Patterson ve Roth, 1976; Talbot ve Patterson, 1978).

Çok sayıda çalışmada dal-sınır (*branch and bound*) yöntemi kullanılmaktadır. Stinson vd. (1978) bu yöntemin ilk uygulama örneğini sunmuşlardır. Bir düğümdeki kısmi çizelgede devam etmekte olan faaliyetlerin en erken bitiş zamanı, o düğümden çıkacak düğümlerin çizelgeleme zamanını belirler. Yeni yaratılan düğümler henüz atanmamış faaliyetlerin olurlu altkümeleridir. Düğüm seçimi hiyerarşik olarak uygulanan altı seçim kuralı ile gerçekleştirilir. Dal-sınır ağacını budamak için iki baskınlık kuralı kullanılmıştır.

Demeulemeester ve Herroelen (1992) dikey inişli (*depth first*) bir dal-sınır yöntemi uygulaması önermişlerdir. Aday faaliyet kümesinde yer alan faaliyetler, belirli bir çizelgeleme anında öncüllük ilişkilerine göre atanabilir durumda olan faaliyetlerdir. Dallanılan düğümden geçerli çizelgeleme anında aday faaliyet kümesindeki tüm faaliyetler atanır. Kaynak kısıtlarının ihlali durumunda, ertelenmeleri sonucu çizelgeyi kaynak kullanımını açısından olurlu kılacak en küçük faaliyet altkümeleri saptanır. Bu altkümeler, herhangi birisi diğer birisine baskın olmayacak şekilde belirlenir. En küçük ertelenen faaliyetler kümesi olarak nitelendirilen bu altkümelerin herbiri dallanılan düğüme bağlı yeni bir düğümü oluşturur. Burada ilginç olan, en küçük ertelenen faaliyetler kümesindeki bazı faaliyetlerin dallanan düğümden çizelgede yer alabiliyor olmasıdır. Buna göre, bazı faaliyetler dal-sınır ağacı üzerinde dikey olarak aşağıya inerken önce kısmi çizelgeye dahil olup sonra çıkabilmektedir. Düğüm budanması için iki baskınlık kuralından yararlanılmaktadır. Bunlardan birincisinde, başka bir düğüm ile sola kaydırma sonucu aynı kısmi çözüme sahip olacak bir düğüm budanır. Dikey iniş için seçilecek düğüm en küçük kritik sıralama bazlı altsınıra sahip düğüm olarak belirlenmektedir. Birden fazla böyle düğüm bulunması durumunda seçim rassal olarak yapılır. Dikey iniş sonucu bir dal sonuna ulaşıldığında

dallanılmamış bir düğüme ilk ulaşılanaya kadar geridönüş (*backtracking*) uygulanır. Demeulemeester ve Herroelen (1997) kendi yöntemlerinin hesaplama verimliliğini geliştirerek yeniden sunmuşlardır.

Brucker vd. (1998) ve Brucker ve Knust (1999) dikey inişli bir dal-sınır algoritması önermişlerdir. Çeşitli altsınırlar üzerinde yaptıkları deneyler sonucu Mingozi vd. (1998) tarafından önerilen ve LB2 olarak nitelendirilen altsınırı kullanmışlardır. Bu altsınır doğrusal programlama bazlı bir altsınırdır. Üst sınır değerleri hesaplamak için ise Baar vd. (1997) tarafından önerilen tabu tanımlayarak arama (*tabu search*) yöntemini kullanmışlardır.

Mingozi vd. (1999) problem için yeni bir matematiksel gösterim önermişlerdir. Bu yeni gösterimden hareketle yeni altsınırlar tanımlamışlardır. Dallanma için ise olurlu altkümeleri kullanmışlardır.

3.3. Sezgisel Yöntemler

Kesin çözüm yöntemleri ile çözüm sağlanabilen problem büyüklüklerinin kısıtlı olması ve ihtiyaç duyulan hesap sürelerinin büyüklüğü araştırmacıları daha büyük proje serimleri için yeni çözüm olmazsa da “iyi” bir çözüme süratle ulaşan sezgisel yöntemler üzerinde çalışmaya yöneltmiştir. Sezgisel yöntemlerin sonuçları aynı zamanda kesin çözüm yöntemleri için bir alt veya üst sınır oluşturmaları nedeni ile de önemlidir.

Sezgisel yöntemleri dört ayrı başlık halinde inceleyeceğiz. Birinci grup sezgisel algoritmalar, öncelik kuralları kullanarak çizelge oluşturan algoritmalar ve tek bir kere uygulanarak elde edilen çözüm nihai çözüm olarak kabul edilir. İkinci grupta ise, öncelik kuralları kullanarak veya örnekleme yolu ile birden çok uygulama yapılır ve birden çok çözüm elde edilir. En iyi çözüm nihai çözüm olarak kabul edilir. Meta-sezgisel yöntemlerin son senelerde öne çıkışı ve yaygın kullanımı nedeni ile bu sezgisel yöntemleri ayrı bir başlık altında üçüncü grup olarak incelemeyi uygun gördük. Dördüncü grup sezgisel algoritmaları ise diğer sezgisel yöntemler başlığı altında inceleyeceğiz. Sezgisel yöntemlerin daha ayrıntılı irdelenmesi Kolisch (1995), Kolisch ve Hartmann (1999), Hartmann ve Kolisch (2000) tarafından verilmektedir.

3.3.1. Öncelik Kurallarına Dayalı Tek Çözüm Türeten Sezgisel Yöntemler

Öncelik kurallarına dayalı sezgisel yöntemlerin iki boyutu vardır: Kullanılan öncelik kuralı ve çizelgenin oluşturulma yöntemi. Bu başlık altında incelenen algoritmalar tek bir çözüm oluşturmaya yöneliktir ve tüm faaliyetler öncelik kuralları kullanılarak atandıktan ve böylece öncüllük ilişkileri ve kaynak kısıtları açısından olurlu bir çizelge oluşturulduktan sonra algoritmanın uygulaması sonlandırılır.

Teknik yazında çok sayıda sezgisel öncelik kuralı önerilmiştir ve bu kuralların performansına ilişkin olarak da çeşitli değerlendirme çalışmaları yapılmıştır. Bu kurallardan nispeten daha çok kullanılanlarını teknik yazındaki kısaltmalarını da kullanarak şöyle sıralayabiliriz:

- i. En kısa işlem süresi (*shortest processing time* - SPT).
- ii. En kısa boşluk süresi (*minimum slack* - MSLK).
- iii. En çok sayıda toplam ardıl (*most total successor* - MTS).
- iv. En büyük kaynak talebi (*greatest resource demand* - GRD).
- v. En geç bitirme zamanı (*latest finish time* - LFT).
- vi. En geç başlama zamanı (*latest start time* - LST).
- vii. Kaynak çizelgeleme metodu (*resource scheduling method* - RSM).
- viii. En büyük konumsal ağırlık (*greatest rank positional weight* - GRPW).
- ix. En kötü alternatif boşluk (*worst case slack* - WCS)

Sezgisel öncelik kurallarının önemli bir bölümünün ilk defa önerildikleri kaynakları saptamak zordur. Bu sezgisel öncelik kuralları genellikle üretim planlamanın operasyon çizelgeleme yazınından kaynaklanmıştır.

Sezgisel öncelik kurallarının bir sınıflandırması, çizelgeleme esnasında değeri sabit kalanlar (durağan – *static*) ve çizelgelemenin değişik aşamalarında değişik değerler alabilenler (devingen – *dynamic*) şeklindedir. Örneğin, SPT durağan bir kural iken, MSLK devingen bir kuraldır. Diğer bir sınıflandırma da, salt faaliyet bilgisini kullanan öncelik kurallarının yerel; bunun dışında daha geniş bilgi kullananların ise global olarak sınıflandırılmasıdır. Buna göre, MIS yerel iken, GRPW global bir öncelik kuralıdır.

Çizelgenin oluşturulmasında iki ayrı yöntem vardır: (i) Paralel çizelgeleme ve (ii) seri çizelgeleme.

Paralel çizelgeleme. Paralel çizelgeleme en fazla faaliyet adedi (J) kadar aşamadan oluşur. Her aşamada, bir veya daha fazla faaliyet kısmi çizelgeye atanır. Uygulama esnasında faaliyetler dört küme içinde yer alırlar. Bitmiş faaliyetler kümesi, atanmış fakat henüz tamamlanmamış süregiden faaliyetler kümesi, kaynak kısıtlarını ihlâl etmeyen ve öncülleri bitmiş faaliyetlerin oluşturduğu karar kümesi ve bunların dışında kalan faaliyetlerin oluşturduğu kalan faaliyetler kümesi. Her aşamada, çizelgeleme anı süregiden faaliyetler kümesindeki faaliyetlerden en erken biten faaliyet(ler) tarafından belirlenir. Bu faaliyet(ler) bitmiş faaliyetler kümesine dahil edilir. Karar kümesi mevcut duruma göre yeniden belirlenir. Kullanılan öncelik kuralı uygulanarak karar kümesinden yeni atanacak faaliyet seçilir ve atanır. Atama döngüsü, karar kümesinde atanacak faaliyet kalmayana veya mevcut kaynak kullanımına göre kaynak kısıtlarını ihlâl etmeyen faaliyet kalmayana kadar sürdürülür. Tüm faaliyetler henüz çizelgenememişse adı geçen kümeler güncellenerek yeni bir aşamaya geçilir ve yeni bir çizelgeleme anı saptanarak algoritmaya devam edilir. Paralel çizelgelemenin bu biçimi için Kolisch (1995) Brooks'un yayımlanmamış bir makalesini kaynak göstermektedir.

Kelley (1963) tarafından önerilen paralel çizelgeleme yönteminde Brooks'un yönteminden farklı olarak çizelgeleme anında süregiden faaliyetler kümesinin elemanları karar kümesine dahil edilirler. Buna göre, algoritmanın uygulanmasında bir faaliyet birden fazla kere atanabilir. Bu açıdan Kelley'nin önerdiği yöntem Demeulemeester ve Herroelen (1992) tarafından önerilen dal-sınır algoritmasındaki en küçük ertelenen faaliyetler kümesi uygulamasını anımsatmaktadır.

Seri çizelgeleme (Kelley, 1963). Sezgisel çizelgelemede üç küme tanımlanmıştır. Bitmiş faaliyetler kümesi, öncülleri bitmiş faaliyetler kümesinde yer alan faaliyetlerin oluşturduğu karar kümesi ve bunların dışında kalan faaliyetlerin oluşturduğu kalan faaliyetler kümesi. Her aşamada bir faaliyet atanır. Buna göre algoritma faaliyet adedi (J) kadar aşamada sona erer. Her aşamada karar kümesi içinden bir faaliyet öncelik kuralı kullanılarak seçilir ve öncüllük ve kaynak kısıtları bakımından olurlu olduğu en erken anda atanır. Adı geçen üç küme güncellendikten sonra yeni bir aşamaya geçilerek algoritma atanacak faaliyet kalmayana kadar sürdürülür.

Paralel çizelgelemenin ertelemesiz çizelgeler türettiği; seri çizelgelemenin ise aktif çizelgeler türettiği gösterilmiştir (Kolisch, 1996a). Daha önce de belirtildiği gibi düzgün bağımlı performans ölçütleri için aktif çözümler kümesi mutlaka eniyi çözümü içermekle birlikte ertelemesiz çözümler kümesi eniyi çözümü içermeyebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında seri çizelgeleme yöntemi eniyi çözümü bulmaya daha yakın durmaktadır.

3.3.2. Çok Çözüm Türeten Sezgisel Yöntemler

Çok çözüm türeten sezgisel yöntemleri üç başlık altında inceleyebiliriz: (i). Örnekleme, (ii) öncelik kuralları (iii) Başlangıç-bitiş çıkışlı iteratif çizelgeleme. Çok çözüm türeten sezgisel yöntemlerde önceden belirlenmiş sayıda çizelgeleme türetilerek aralarından en iyisi seçilir. Bir çözüm elde etmenin çözüm süresinin azlığı, algoritmayı çok kere uygulamayı hesap süresi bakımından olurlu hale getirmiştir (öneğin, bkz. Baker, 1974 ve French, 1982).

Örnekleme. Örnekleme kullanarak birden çok çözüm türetmeye yönelik yöntemlerde, rassal bir mekanizma kullanılarak bir çözüm kümesi içinde eniyi çözüm aranır. Atanacak faaliyetin rassal olarak seçildiği bu yöntemlerde çizelge oluşturma yöntemi olarak yukarıda izah edilen seri veya paralel çizelgeleme kullanılır. Seri çizelgeleme kullanıldığında çözüm kümesi aktif çizelgeler kümesi; paralel çizelgelemede ise ertelemesiz çizelgeler kümesidir.

Seri veya paralel çizelgeleme kullanılmasından bağımsız olarak, karar kümesi içinden kısmi çizelgeye atanacak faaliyetin seçilmesi için kullanılacak rassal seçim kurallarını üç ayrı başlık altında toplamak mümkündür. (i). Karar kümesi içinde yer alan faaliyetlerin seçilme olasılıkları eşit olarak atanır (rassal örnekleme – *random sampling*). (ii). Yanlı rassal örnekleme (*biased random sampling*) seçim kurallarında, karar kümesindeki bir faaliyete onun öncelik kuralı değeri kullanılarak bir olasılık atanır. Çizelgeleme için yapılacak seçim bu olasılık değerine göre rassal olarak yapılır (Cooper, 1976). Diğer bir yaklaşımda, karar kümesindeki faaliyetlerin faaliyet numaralarının kardinal düzenden ordinal düzene dönüştürülmesi ile elde edilen öncelik listesi üzerinden liste başından sonuna doğru giderek azalan bir olasılıkla atanacak faaliyetin seçimi yapılır (Wiest, 1967 ve Baker, 1974). (iii). Üçüncü yaklaşımda, karar kümesindeki faaliyetler gözönüne alınarak, her faaliyetin seçilme olasılığı o faaliyetin öncelik kuralı değeri ile karar kümesi içindeki faaliyetlerin en kötü düzeydeki öncelik kuralı değeri arasındaki farka göre belirlenir. Buna göre, öncelik kuralı değeri en kötü değerden daha uzak olan faaliyetlerin

seçilme olasılığı daha yüksek olacaktır (Drexl, 1991; Drexl ve Grünwald, 1993). Bu örnekleme yöntemine alternatif maliyet bazlı örnekleme (*regret based biased sampling*) diyoruz.

Öncelik kuralları. Öncelik kurallarına dayalı çizelgeleme kullanılarak ve birden çok geçiş (*multi pass*) uygulanarak birden çok çizelge türetmek için çeşitli yollar denenmiştir. Bunlardan bir tanesi, türetilen her çizelge için ayrı bir öncelik kuralı uygulamaktır. Boctor (1990) yedi değişik sezgisel kural uygulamıştır. Diğer bir yaklaşım ise, her aşamada kullanılacak öncelik kuralının rassal olarak kararlaştırılmasıdır (Storer vd., 1992). Bu iki yaklaşıma da dahil olmayan ancak birinci yaklaşıma yakın olan bir sezgisel öncelik kuralı da Ulusoy ve Özdamar (1989) tarafından önerilmiştir. Ağırlıklandırılmış kaynak kullanım oranı ve ardıllık (*weighted resource utilisation ratio and precedence - WRUP*) olarak nitelendirilen bu sezgisel kuraldaki ağırlık parametresine [0,1] aralığında değişik değerler atanarak çeşitli çizelgeler türetilmektedir. Bu yaklaşım çeşitli sezgisel kuralların içbükey kombinasyonunun kullanılmasına bir örnektir.

Hem öncelik kuralları, hem de örnekleme içeren birden çok geçişli bir algoritma Kolisch ve Drexl (1996b) tarafından önerilmiştir. Algoritmada hem seri, hem paralel çizelgeleme uygulanmaktadır. Seri çizelgeleme ile LFT, paralel çizelgeleme ile WCS (Kolisch, 1995) öncelik kuralları; faaliyet seçiminde ise deterministik ve alternatif maliyet bazlı örnekleme kullanılmıştır. Adaptif algoritma olarak nitelendirilen bu algoritma, problemin niteliğinden ve o ana kadar yapılmış olan iterasyonlardan hareketle, o aşamada uygulanacak yöntemi belirlemektedir. Kısmi çözümlerin altsınır kullanılarak elenebilmesine olanak sağlanarak algoritmanın hesaplama süresi iyileştirilmiştir. Schirmer (1998) bu yaklaşımı daha da geliştirmiştir.

Başlangıç-bitiş çıkışlı iteratif çizelgeleme. Başlangıç çıkışlı (*forward pass*) çizelgelemede, çizelgeleme sıfır zamanından başlatılarak faaliyetler azalmayan zamanlarda atanırlar. Bitiş çıkışlı (*backward pass*) çizelgelemede ise, zaman yine sıfır olarak nitelendirilebilirse de, ileri bir zamandan başlanarak çizelgede faaliyetler sondan başa doğru atanır. Li ve Willis'in (1992) makalesinde, başlangıç çıkışlı çizelgeleme ve bitiş çıkışlı çizelgeleme teknikleri ile elde edilen kaynak profillerinin farkına dikkat çekilmektedir. Başlangıç çıkışlı çizelgeleme tekniği faaliyetleri mümkün olduğu kadar erken çizelgelerken, bitiş çıkışlı çizelgeleme tekniği faaliyetleri mümkün olduğu kadar geç çizelgeler. Li ve Willis bitiş çıkışlı çizelgeleme tekniğinden doğan problemleri detaylı olarak incelemiştir. Örneğin; bitiş çıkışlı çizelgeleme tekniği, başlangıç çıkışlı çizelgeleme tekniği uygulandığı zaman bulunacak proje süresinden daha uzun bir proje süresi ile sonuçlanabilmektedir. Faaliyetlerin mümkün olduğu kadar geç çizelgelenmesi ile bütün faaliyetlerin kritik faaliyet haline dönüşmesi ve bir faaliyetin başlamasında meydana gelen bir gecikme ile bütün projenin etkilenmesi bir başka problemdir. Bitiş çıkışlı çizelgelemenin olurlu bir çizelge oluşturmakta sık sık başarısızlığa uğraması da önemli bir problemdir. Bu nedenlerden hareketle, Li ve Willis makalelerinde başlangıç çıkışlı ve bitiş çıkışlı çizelgeleme tekniklerinin avantajlarını birleştirmeye çalışan iteratif bir algoritma önermişlerdir. Ulusoy ve Özdamar (1995), ileride ayrıntılandırılacak olan yerel kısıt temelli analiz (*local constraint based analysis - LCBA*) isimli algoritmalarının performansını, MSLK, LFT ve WRUP sezgisel karar kuralları ve Li ve Willis'in algoritması ile karşılaştırmıştır. LCBA ve diğer karar kuralları öncelikle tek geçişli (*single pass*) sezgisel yöntem olarak kullanılmış, sonra da iteratif bir sürece konulmuştur. Çalışmada, bütün karar kurallarının iteratif sürece katıldığında daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Karşılaştırmalar iteratif LCBA'nın Li ve Willis'in algoritmasının da içinde bulunduğu diğer yaklaşımlardan çok daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Benzer sonuçlar Özdamar ve Ulusoy'da (1996a, 1996b) da rapor edilmiştir.

3.3.3. Meta-sezgisel Yöntemler

Meta-sezgisel yöntemlerin genelde kombinatoriyal eniyilemede özelde ise proje ve makina çizelgelemede giderek daha yaygın bir kullanımını gözlüyoruz. Burada, meta-sezgisel yöntemleri üç ayrı grupta inceleyeceğiz: (i). Genetik algoritmalar; (ii). Tavlama benzetimi yöntemi (*simulated annealing method*); (iii). Tabu tanımlayarak arama yöntemi. Meta-sezgisel yöntemler arasında yer alan sinir ağları (*neural networks*) ve karınca sistemleri (*ant systems*) üzerinde burada durulmayacaktır. Bu konularda temel bilgiler için, sırası ile, Hopfield ve Tank (1985) ve Dorigo vd. (1996) önerilir.

Meta-sezgisel yöntemlerde, öncelikle, çözümün gösterimi ve bu gösterimi çizelgeye dönüştüren çizelgeleme yöntemi üzerinde durulacaktır. Bu gösterimlerden bir tanesi, rassal anahtar (*random key*) gösterimidir. Rassal anahtar gösteriminde, gösterimin her bir elemanı bir faaliyete ilişkin bir değere karşı gelir. Faaliyet listesi (*activity list*) gösterimi olarak nitelendirilen gösterimde, gösterimin her bir elemanı bir faaliyetin proje serimi üzerinde atanmış gösterim sayısına karşı gelir. Üçüncü gösterimde

ise, gösterimin elemanlarını öncelik kuralları oluşturur: Bu gösterime öncelik kuralları (*priority list*) gösterimi denir. Bu gösterim daha önce atelye çizelgeleme problemlerinde kullanılmıştır (Dorndorff ve Pesch, 1995 ve Herrmann vd., 1995).

Çözüm gösteriminin çizelgeye dönüştürülmesinde seri ve paralel çizelgeleme kullanılır. Paralel çizelgelemenin ertelemez çizelge üretmesi ve eniyi çözümün bunlar arasında olmaması olasılığı nedeni ile bazı paralel çizelgeleme uygulamalarında çizelgelenebilir faaliyetlerin ertelenebilmesine olanak sağlanmıştır. Bu şekilde uygulanan paralel çizelgeleme, uyarlanmış paralel çizelgeleme olarak nitelendirilmektedir.

Meta-sezgisel yöntemlerin bitiş kriteri olarak çeşitli seçenekler önerilmiştir: Sabit bir CPU süresi; belirli bir sayıda çizelge (komşu çözüm) türetilmesi; veya amaç işlevi üzerinde tanımlanmış bir duruş kriteri.

Genetik algoritma. Genetik algoritmalar Holland (1975) tarafından biyolojik evrim sürecinden hareketle önerilmiştir. Burada tanıtılan diğer iki meta-sezgisel yöntemden farklı olarak, genetik algoritma tek bir çözüm yerine aynı anda birden fazla sayıda çözümü değerlendirir. Bu özellik, genetik algoritmanın paralel arama özelliği olarak nitelendirilir. Problem çözümü genlerden oluşan bir kromozom ile ifade edilir. Genetik algoritma, bir dizi çözümün oluşturduğu bir kuşak (*generation*) ile başlatılır. Güncel kuşak içindeki kromozomlara kopyalama (*reproduction*), çaprazlama (*crossover*) ve mutasyon (*mutation*) işlemleri (*operator*) uygulanarak yeni bir kuşak oluşturulur. Yeni kuşak oluşturulurken uygulanan işlemlerde “daha iyi” kromozomların bir sonraki kuşağa aktarılması ve yeni kromozomların oluşturulmasındaki etkinliklerinin olasılıkları uygunluk değerlerine (*fitness value*) doğrudan bağlıdır. Daha iyi kromozomlar, daha yüksek uygunluk değerlerine sahip olan kromozomlardır. Bu şekilde, biyolojik evrim sürecinin “güçlünün yaşamını sürdürmesi” anlayışı genetik algoritmaya yansıtılmaktadır. Genetik algoritmaların ayrıntısına burada girilmeyecektir. Genetik algoritmalarına iyi bir giriş olarak Goldberg (1989) önerilir.

Genetik algoritmaların kaynak kısıtlı proje çizelgeleme uygulamalarını çözümün değişik gösterimleri esas alarak rapor edeceğiz. Başlangıç kuşağının kromozomlarının gen değerleri rassal olarak veya öncelik kuralları kullanılarak elde edilir. Lee ve Kim (1996) önerdikleri genetik algoritmada rassal anahtar gösterimi ile birlikte tek noktadan çaprazlama (*one-point crossover*) kullanmışlar ve paralel çizelgeleme uygulamışlardır. Leon ve Ramamoorthy (1995) ise rassal anahtar gösterimi ve tek noktadan çaprazlama ile birlikte yukarıda bahsedilen amaçla uyarlanmış paralel çizelgeleme uygulamışlardır.

Hartmann (1998) üç gösterimi de incelemiştir. Her gösterimde de, tek noktadan çaprazlama, çift noktadan çaprazlama (*two-point crossover*) ve düzgün sıralı çaprazlama (*uniform crossover*) yöntemleri sınanmıştır. Yine her gösterimde, seri çizelgeleme kullanılmaktadır. Faaliyet listesi gösteriminde faaliyetlerin kromozom üzerinde sıralanışı öncüllük açısından olurlu bir sıralamadır. Kromozom üzerindeki sıraya göre en erken olurlu ana atama yapılarak çizelge oluşturulur. Hartmann, öncelik gösteriminde LFT, LST, MTS, MSLK, WRUP ve GRPW öncelik kurallarını kullanmıştır. Rassal anahtar gösterimi uygulamasında her gen öncelik değerine karşı gelen $[0,1]$ aralığında bir değer almaktadır.

Tavlama benzetimi. İlk defa Kirkpatrick vd. (1983) tarafından sunulan tavlama benzetimi yöntemi, ilk karşılaşılan daha iyi çözümü kabul ederek eniyiyi arama stratejisinin temelinde bir değişik uygulama biçimidir. Her adımda daha iyi bir noktaya gitmeyi hedefleyen gradyan ile arama yönteminden farklı olarak tavlama benzetimi yöntemi süreç içinde giderek azalan bir olasılıkla daha kötü bir çözüme gitmeye izin verir. Tavlama benzetimi yöntemi ile bir çözüm önerisi Boctor (1996a) tarafından sunulmuştur. Önerilen algoritmada, faaliyet listesi kullanılarak seri çizelgeleme uygulanmıştır. Komşu çözüm kümesinin tanımlanması ve aranmasında, Sampson ve Weiss (1993) tarafından önerilen öteleme vektörü (*shift vector*) kavramı kullanılmıştır. Sampson ve Weiss, herhangi bir çözümün gösterimi amacı ile $(1 \times J)$ boyutunda ve elemanları tam sayı olan bir öteleme vektörü, V , tanımlamışlardır. Buna göre, j faaliyetinin başlangıç anı bu faaliyetin öncüllerinin en geç biteninin bitiş anı ile V vektörünün j faaliyetine karşı gelen $V(j)$ elemanının değerinin toplamı ile ifade edilir. Her j faaliyeti için $V(j)$ elemanının alabileceği değerler üzerinden bir arama yapılır.

Lee ve Kim (1996) önerdikleri tavlama benzetimi yönteminde rassal anahtar gösterimi ve paralel çizelgeleme kullanmışlardır. Yeni çözüm yaratmak için kısıtlı bir çiftli yer değiştirme (*pairwise interchange*) uygulamışlardır. Cho ve Kim (1997), Lee ve Kim'in (1996) tavlama benzetimi yönteminden hareketle bir algoritma önermişlerdir. Bu algoritmada rassal anahtar gösterimi bazı

atanabilir faaliyetlerin ertelenmelerine izin verecek şekilde değiştirilmiş ve uyarlanmış bir paralel çizelgeleme yöntemi kullanılmıştır.

Bouleimen ve Lecocq (1998a) önerdikleri tavlama benzetim yaklaşımında yenilenemez kaynakları da içermişlerdir. Faaliyet listesi gösterimi kullanılmıştır. Faaliyetler en geç başlayan öncülü ve en erken başlayan ardılı arasında bir yer alır. Komşu çözüm için rasgele bir faaliyet seçilir ve en geç başlayan öncülü ve en erken başlayan ardılı arasında bir yere rasgele atanır. Seri çizelgeleme uygulanmıştır. Sayısal deneyler başarılı sonuçlar üretmiştir.

Tabu tanımlayarak arama. Glover (1989a, 1989b) tarafından geliştirilen tabu tanımlayarak arama temelde güncel çözümün çevresinde yerel eniyi çözümü arayan gradyan yönteminin (*best fit strategy*) bir uyarlamasıdır. Algoritmanın bir yerel eniyi çözümden ayrıldıktan hemen sonra tekrar aynı yerel eniyi çözüme yönelmemesi için algoritmanın attığı son adımlar tabu ilan edilir. Tabu listesi dinamiklidir. Her yeni bir eleman tabu listesine girdiğinde, tabu listesinde en çok kalmış olan eleman liste dışına çıkarılır. Bu şekilde algoritmaya bir hafıza kazandırılmış olur. Lee ve Kim (1996) önerdikleri tabu tanımlayarak arama yönteminde tıpkı önerdikleri tavlama benzetimi yönteminde olduğu gibi rassal anahtar gösterimi ve paralel çizelgeleme kullanmışlardır. Yeni çözüm yaratmak için kısıtlı bir çiftli yer değiştirme uygulamışlardır. Baar vd. (1997) tabu tanımlayarak arama için gerek çözüm gösterimi gerekse komşu küme tanımı farklı iki ayrı yöntem önermişlerdir. Başlangıç çözümleri için sezgisel karar kuralları kullanılmıştır. Brucker vd. (1999) bu algoritmanın 30 faaliyetli problemlerde eniyi değerlerden ortalama % 0,4 ve en fazla %6,9 saptığını rapor etmişlerdir.

3.3.4. Diğer Sezgisel Yöntemler

Yerel kısıt analizi. Yerel kısıt temelli analiz (LCBA) yöntemi (Özdamar, 1991) her çizelgeleme anında faaliyetlerin kısıtlarını yeniden değerlendirir. Bu kısıtlar, kaynakların sınırlı olmasından kaynaklanan kaynak kısıtları ve öncüllük ilişkilerinden kaynaklanan kısıtlardır. Her çizelgeleme anında kısıtlar güncellenir. Bu kısıtlar çizelgelenebilir faaliyetler kümesini belirler. Çizelgelenebilir faaliyetler kümesini oluşturan faaliyetleri atama önceliğine göre gruplandırılan bir dizi gerekir (*essential*) kural geliştirilmiştir. Gerekir kurallar bu kümenin elemanları arasında en yüksek atama önceliğine sahip faaliyetleri belirlerler. Bu faaliyetler atanmalarında halde poje süresinin uzamasına neden olacak olan faaliyetlerdir. Gerekir kurallar bu çizelgeleme anında atanmaması gereken faaliyetleri de ayrıca belirleyerek kümeden dışlar ve böylece çizelgelenebilir faaliyetler kümesini daraltır. En yüksek öncelikli gruptaki faaliyetlerin hepsinin çizelgelenebilmesinden sonra hâlâ yeterli kaynak varsa, çizelgelenebilir faaliyetler kümesinden dışlanmamış faaliyetler çizelgelenecek üzere ele alınır.

Yerel arama. Makina çizelgeleme problemlerinin çözümünde oldukça yoğun olarak kullanılan yerel arama yöntemlerinin (bkz. French, 1982) proje çizelgelemede bir örneği Sampson ve Weiss (1993) tarafından verilmiştir. Uygulanacak yerel arama yöntemi; çözümün gösterimi, komşu çözüm kümesinin tanımı ve bu kümenin taranma yöntemi ile tanımlanır. Eldeki çözümün öncüllük ilişkileri açısından olurlu olması istenir ancak kısıtlı kaynaklar bakımından olurlu olmayabilir. Kısıtlı kaynakların ihlâli belirli bir ceza yöntemi ile yöntemin proje süresinin enazlanması olan amaç işlevine dahil edilir. Faaliyetler sıra ile ele alınarak; her faaliyet j için yukarıda tanımlanan öteleme vektörü V 'nin j . elemanının, $V(j)$, değeri sırası ile $0, 1, 2, \dots, m_j$ alınarak her değer için yeni bir çözüm elde edilir. j faaliyetinin komşu çözüm kümesi tarandıktan sonra elde edilen en iyi çözüm mevcut çözüm olarak kabul edilerek yeni bir V vektörü oluşturulur ve sıradaki faaliyet için bu döngü tekrarlanır. Bütün faaliyetler için bu döngünün tekrarlanması bir iterasyon oluşturur. Önceden kararlaştırılmış bir iterasyon sayısına erişildikten sonra algoritma sonlandırılır. Sampson ve Weiss'in, Patterson problemleri üzerinde 10 iterasyon kullanarak yaptıkları sayısal deneyler, önerilen yerel arama algoritmasının sonuçlarının eniyi çözümden ortalama %1,98 daha yüksek sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Budanmış dal-sınır yöntemi. Budanmış dal-sınır (*truncated branch and bound*) yönteminde, tüm olası dallanma olanakları kullanılmaz. Dallanma, sezgisel kural(lar) marifeti ile daraltılır ve böylece birerleme ağacının çok daha az sayıda düğüm içermesi ve daha kısa sürede bir sonuca ulaşılması sağlanır. Ulaşılan sonucun eniyi olması garantisizdir; iyi bir çözüm elde edilmeye çalışılır. Alvarez-Valdes ve Tamarit (1989) tarafından önerilen budanmış dal-sınır yönteminde her düğümden sadece bir düğüme dallanılır. Alvarez-Valdes ve Tamarit daha sonra, yukarıda da açıklanan Demeulemeester ve Herroelen (1992) tarafından kullanılan ağaç yapısı ile çalışmışlardır.

Ayırgeç Ayrıt Yöntemi. Ayırgeç ayrıt (*disjunctive precedence arc*) yönteminin ana fikri, öncüllük açısından olurlu olmakla birlikte kaynak kısıtları nedeni ile birarada atanamayan faaliyetlerin en küçük

kümesindeki faaliyetler arasında gerçekte olmayan öncüllük ilişkileri yaratarak bu kümeyi parçalamaktır. Bu işlem, yaratılan öncüllük ilişkisinin proje seriminin FDG gösteriminde iki faaliyet arasına bir ayırgeç ayırıt eklenmesi ile gerçekleştirilir. Faaliyetlerinin en erken atanabileceği, hem öncüllük hem de kaynak kısıtları açısından olurlu yeni faaliyet kümelerinin oluşturulması hedeflenir.

Alvarez-Valdes ve Tamarit (1989) en küçük kümeyi parçalamak için dört ayrı yol önermişlerdir. Bunların en başarılı olanı, en küçük eleman sayısına sahip kümeler arasından birisinin rasgele seçilmesi ve bu kümedeki faaliyetler arasına proje süresini en az artıracak ayırgeç ayırıtın eklenmesi kuralıdır. Bell ve Han (1991) ayırgeç ayırıt kullandıkları iki aşamalı bir algoritma önermişlerdir. Birinci aşamada, kaynak kısıtı olumsuzluklarını her seferinde ayırgeç ayırıtlar kullanarak çözen tek geçişli bir algoritma ile bir çözüm elde edilmektedir. İkinci aşama ise bir geridönüş algoritmasıdır. Bu aşamada, bu olurlu çözümdeki kritik yol üzerindeki her ayırgeç ayırıt sıra ile geçici olarak kaldırılıp birinci aşama yeniden uygulanmaktadır. Bu iteratif uygulama gelişme sağlanamayana kadar devam etmektedir.

3.3.5. Sezgisel Kuralların Etkinliği

Sezgisel kuralların etkinliği üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bazılarında proje seriminin yapısal özelliklerinin de etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmaların bazılarını şöyle sıralayabiliriz: Davis ve Patterson (1975), Ulusoy ve Özdamar (1989), Alvarez-Valdes ve Tamarit (1989), Boctor (1990), Kolisch (1995, 1996a, 1996b), Kolisch ve Hartmann (1999), Hartmann (1999a), Hartmann ve Kolisch (2000).

Son yıllardaki çalışmalar, genel olarak meta-sezgisel yöntemlerin üstünlüğünü ortaya koymuştur. Meta-sezgisel algoritmaların en iyileri, sezgisel karar kuralları kullanan algoritmaların en iyilerinden daha iyi sonuçlar vermektedir. İlginç bir gözlem de, meta-sezgisel algoritmaların 1000 çözüm düzeyinde görülen üstünlüğünün 5000 çözüm düzeyinde daha da artmasıdır. Bunun makul bir açıklaması, sezgisel karar kuralları kullanan algoritmalarından farklı olarak, meta-sezgisel algoritmaların yeni çözüm türetirken daha önce türetmiş olduğu çözümlerin oluşturduğu bilgi birikiminden yararlanmasıdır.

Meta-sezgisel algoritmalar içinde hâlen en iyi sonuçları türeten algoritma Hartmann (1999a) tarafından önerilen geliştirilmiş genetik algoritmadır. Bunu yine Hartmann (1998) tarafından önerilen faaliyet listesi ve rassal anahtar gösterimlerini kullanan genetik algoritmalar ve Bouleimen ve Lecocq (1998a) tarafından önerilen tavlama benzetimi algoritması takip etmektedir. Teknik yazında önerilen tabu tanımlayarak arama algoritmaları henüz önemli bir başarı gösterememişlerdir.

Meta-sezgisel algoritmaların en iyileri sezgisel öncelik kuralları kullanan algoritmaların en iyilerinden daha iyi sonuçlar üretiyor olmakla birlikte sezgisel öncelik kuralları yine de önemlidir. Sezgisel öncelik kuralları, çok büyük problemlerin çözümünde kullanıldıkları gibi, meta-sezgisel algoritmaların başlangıç çözümlerinin oluşturulmasında da kullanılmaktadırlar. Sezgisel öncelik kuralı kullanan algoritmalar arasında genellikle örnekleme dayalı algoritmalar öne çıkmaktadır. En iyi sonuçların adaptif algoritmalar (Schirmer, 1998; Kolisch ve Drexl, 1996b) ile alındığı görülmektedir. Sezgisel kurallardan, LFT, LST ve WCS de iyi sonuçlar vermektedir.

Seri ve paralel çizelgeleme uygulamalarından; seri çizelgelemenin nispeten küçük problemlerde (30 faaliyet gibi) daha iyi sonuçlara yol açtığı, paralel çizelgelemenin ise nispeten büyük problemlerde (120 faaliyet ve üstü gibi) daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bilindiği gibi, paralel çizelgeleme ertelemesiz çizelgeler türetir ve ertelemesiz çizelgeler kümesi eniyi çözümü içermeyebilir. Buna karşın, seri çizelgeleme aktif çizelgeler türetir ve aktif çizelgeler kümesi eniyi çözümü içerir. Kolisch (1995) bu gözlem ve tespitten hareketle; daha küçük problemlerde paralel çizelgelemenin eniyi çözümü dışlayabileceği, buna karşın seri çizelgelemenin eniyi çözümü daha kolaylıkla saptayabileceğini, daha büyük problemlerde ise paralel çizelgelemenin daha küçük bir çözüm kümesi üzerinde çalıştığından daha iyi sonuçlara ulaşabileceğini belirtmektedir.

4. Çok Modlu Kaynak Kullanımlı Projelerde Proje Süresinin Enazlanması Problemi

4.1. Problemin Tanımı ve Matematiksel Programlama Gösterimi

Çok modlu kaynak kullanımlı projeler üzerindeki çalışmaların Elmaghraby (1977) ile başladığını söyleyebiliriz. Problemin tanımı, KKPÇPnden sadece kaynak kullanımında birden fazla modun varlığına izin verilmesi ile farklılaşır. Bu şekilde, problem tanımının daha gerçekçi olması sağlanmıştır. Aşağıdaki gösterimde mod indisi m kullanılarak değişken ve parametrelere mod boyutu eklenmiştir.

Yenilenemez kaynakların matematiksel gösterimini örneklemek amacı ile aşağıdaki gösterime yenilenemez kaynaklar da dahil edilmiştir.

$$(P2.) \min Z = \sum_{t=EFT_J}^{LFT_J} tX_{Jt}$$

s.t.

$$(P2.1) \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} X_{jmt} = 1 \quad j = 1, \dots, J$$

$$(P2.2) \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{\tau=t}^{t+d_{jm}-1} X_{jmt} \leq K_r \quad r \in R, \quad t = 1, \dots, T$$

$$(P2.3) \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=EFT_i}^{LFT_i} tX_{imt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} (t-d_{jm})X_{jmt} \quad j = 2, \dots, J, \quad i \in P_j$$

$$(P2.4) \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} X_{jmt} \leq K_r \quad r \in N$$

$$(P2.5) X_{jmt} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J; \quad m = 1, \dots, M_j; \quad t = EFT_j, \dots, LFT_j$$

Yukarıda (P1) probleminde kullanılan semboller dışında kalanlar için tanımlar aşağıda verilmiştir:

$M_j = j$ faaliyetinin mod adedi,

$m = \text{mod}$ indisi ($m=1, \dots, M_j$),

$N = \text{yenilenemez kaynakların kümesi.}$

(P2) probleminde, amaç işlevi proje süresini enazlamaktadır. (P2.1) kısıt kümesi her faaliyetin mutlaka çizelgelenmesini sağlar. Kısıt kümesi (P2.2) yenilenebilir kaynakların birim zaman içinde kullanımlarının üst sınırını gösterir. Kısıt kümesi (P2.3) ise, j faaliyeti ile bu faaliyetin öncülü olan i faaliyeti arasındaki öncüllük ilişkisinin yerine getirilmesi gereğini ifade eder. (P2.4) kısıt kümesi yenilenemez kaynakların birim zaman içinde tüketimlerinin üst sınırını gösterir. (P2.5) ise $\{0,1\}$ değişkeni x_{jmt} 'nin tanımıdır. Karar değişkeni x_{jmt} 'nin üç indisli olması değişken adedini tek modlu gösterime göre büyük oranda artırmaktadır. Bu nedenle, $[EFT_j, LFT_j]$ zaman aralıklarının eniyi çözümü dışlamadan en dar şekilde tanımlı bu gösterimde daha da önem kazanmaktadır.

4.2. Kesin Çözüm Yöntemleri

Talbot (1982) faaliyet listesi üzerinde tanımladığı bir birerleme yöntemi önermiştir. Bu yöntemde, faaliyet listesinde bir sonraki faaliyet en hızlı modunda atanmakta ve en erken zamanda başlatılmaktadır. Eğer faaliyet zaman aralığı içinde atanmazsa, yöntem bir önceki öncüle geri dönmekte ve o faaliyetin daha geç bir zamanda veya daha yavaş modunda atanması olanağını araştırmaktadır. Patterson vd. (1989) bu yaklaşımı geliştirmişler ve sayısal olarak da irdelemişlerdir (Patterson vd., 1990).

Bu ilk çözüm önerileri 15 faaliyete kadarki problemlere çözüm getirebilmiştir. Sprecher vd. (1997), Demeulemeester ve Herroelen (1992) tarafından tek modlu problemler için önerilen dal-sınır yöntemini çok modlu problemlere uyarlamıştır. Benzer şekilde, Sprecher ve Drexl (1998) önerdikleri yeni baskınlık kurallarını kullanarak dal-sınır yöntemi ile en fazla 20 faaliyet içeren problemleri çözebilmişlerdir. Hartmann ve Drexl (1998), Stinson vd.'nin (1978) tek modlu problemler için önerdiği yöntemi çok modlu problemlere uyarlamışlardır. Sprecher (1994), Demeulemeester ve Herroelen (1992) ve Stinson vd.'nin (1978) dal-sınır yöntemlerinin ayrıntılı bir karşılaştırmasını yapmışlardır. Hartmann ve Drexl, yaptıkları sayısal değerlendirmeler sonucu, Sprecher ve Drexl algoritmasının halen bu konudaki en etkin kesin çözüm yöntemi olduğunu rapor etmişlerdir.

4.3. Sezgisel Yöntemler

Talbot (1982) ve Sprecher ve Drexl (1998) kendi dal-sınır yöntemlerinin uygulanmasına bir zaman sınırı konarak sezgisel bir çözüm yöntemi olarak kullanılmasını önermişlerdir.

Drexl ve Grünewald (1993) yanlı örnekleme yöntemi önermişlerdir. Kolisch ve Drexl (1997) bir yerel arama yöntemi geliştirmişlerdir.

Özdamar ve Ulusoy (1994), LCBA algoritmasının çok modlu durum için uyarlamasını sunmuşlardır. MSLK, LFT ve WRUP sezgisel kuralları ile 95 problem üzerinde karşılaştırılan LCBA'nın çok daha üstün bir performans sergilediği gösterilmiştir. Sinama problemlerinin faaliyet adetleri 20-57, kaynak adetleri 1-6 aralığında seçilmiş ve her kaynak için mod adedi en fazla 3 olarak kabul edilmiştir. LCBA algoritmasının iteratif uygulaması Ulusoy ve Özdamar (1995), Özdamar ve Ulusoy (1996a, 1996b) tarafından ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

Boctor (1993) uyarlanmış bir paralel çizelgeleme uygulamıştır. Buna göre, öncüllük ilişkileri açısından olurlu ve en az bir modu ile kaynak kısıtları açısından olurlu bir faaliyet karar kümesine dahil edilmiştir. Faaliyetler MSLK kuralına, modlar ise SPT kuralına göre belirlenmiştir. Birden çok geçiş uygulanmıştır. Boctor (1996b), karar kümesi içinden bir baskın çizelgelenebilir faaliyetler kümesi tanımlayarak, karar kümesinden bir faaliyet yerine tanımlanan kümenin faaliyetlerinin atandığı bir yöntem önermiştir.

Maniezzo ve Mingozzi (1999) Benders ayrıştırmasına (*decomposition*) dayanan bir sezgisel yöntem sunmuşlardır. Yenilenemez kaynaklar da göz önüne alınmıştır. Problem, bir master problem (MP) ve bir altprobleme (SP) ayrıştırılmıştır. MP, yenilenemez kaynakları da göz önüne alarak faaliyetlere mod atar. SP bu mod ataması ile bir KKPÇP olarak sezgisel olarak çözülür. SP çözümünden geçerli bir Benders kesiti (*cut*) elde edilerek bir sonraki iterasyonda MP'ye eklenir. Sezgisel yöntem iteratif olarak MP ve SP'yi çözer. İterasyonlar sırasında elde edilen en iyi K sezgisel çözüme Mingozzi vd.'nin (1998) kesin çözüm yöntemi uygulanarak çözüm kalitesi artırılmaya çalışılır.

4.4. Meta-sezgisel Yöntemler

Genetik algoritma. Sivrikaya-Şerifoğlu (1997) sunduğu ve bölüm 5.6'da anlatılan genetik algoritma yaklaşımı NBDin ençoklanması için olduğu gibi proje süresinin enazlanması amaç işlevine yönelik olarak da uygulanmıştır. Proje süresinin enazlanması amacı için iteratif LCBA ile karşılaştırılmış ve daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Sivrikaya-Şerifoğlu vd. (2000) bu algoritmayı yenilenemez kaynakları da içerecek şekilde genişletmişlerdir.

Mori ve Tseng (1997) sadece yenilenebilir kaynakların bulunduğu KKPÇP'ni ele almışlardır. Çalışmada, kromozomun her geninde bir faaliyet numarası, bu faaliyet için atanmış mod, çizelgeleme sırası ve başlama-bitiş zamanları bilgilerini taşıyan bir kodlama uygulanmıştır. Sundukları bu GA yaklaşımını Drexl ve Grünewald'ın (1993) sundukları stokastik bir yaklaşımla karşılaştırarak, GA'nın daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmektedirler.

Hartmann (1997), hem yenilenebilir hem de yenilenemez kaynakların yer aldığı bir GA yaklaşımı sunmuştur. Bu çalışmada kromozom, öncüllük ilişkileri bakımından olurlu bir faaliyet sıralaması ve bu faaliyetler için seçilmiş birer modun bulunduğu bir kodlama ile sunulmaktadır. Bu yaklaşım için farklı bir dizi deneysel çalışmalar yapılarak en iyi olanı seçilmiş ve bu GA yaklaşımını literatürde raporlanmış bulunan üç sezgisel yöntemle karşılaştırılmıştır. Sunulan yeni yaklaşımın, eniyi proje süresinden ortalama sapma kriterine göre diğer üç sezgisel yöntemden daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Özdamar (1999), yenilenemez kaynakların da yer aldığı probleme özel bilgilerin de yer aldığı bir melez GA yaklaşımı ile çözüm aramıştır. Bu yaklaşımda, dolaylı bir kodlama kullanarak, ilki faaliyetler

için atanmış moda ait, diğeri bir grup öncelik kuralından belirlenen bir kural numarası olan iki boyutlu bir kromozom yapısı tanımlanmıştır. Çalışmada, bu yaklaşımla, uygun bir CPU süresi içinde yaklaşık eniyi sonuçlara ulaşıldığı gösterilmiştir.

Tavlama benzetim. Bouleimen ve Lecocq (1998b) önerdikleri ve yukarıda (bölüm 3.3.3) tek modlu problemler için tanımlanan tavlama benzetim yaklaşımını çok modlu probleme de uyarlamışlardır. Modlar faaliyetlerden ayrı bir liste olarak tutulmaktadır. Faaliyet listesindeki yer değişimi ile yeni bir faaliyet listesinin türetilmesinden sonra rasgele bir faaliyet için mod değişikliği uygulanır. Rasgele seçilen faaliyet için rasgele bir mod seçilir ve olurluluğu araştırılır. Olurlu ise, yeni bir komşu çözüm elde edilmiştir ve amaç işlevi değeri hesaplanarak tavlama benzetim uygulamasına devam edilir. Olurlu değilse, mod değişikliği için yeni bir faaliyet rasgele seçilir. Bu uygulama olurlu bir çözüme ulaşana veya belirli bir sayıda uygulama yapılana kadar devam eder. Son durumda, faaliyetlerin yer değiştirme aşamasına geri dönülür ve yeni bir faaliyet listesi türetilir. Faaliyet listesinin çizelgeye dönüştürülmesinde seri çizelgeleme uygulanmıştır.

Jozefowska vd. (1999) yenilenemez kaynakları da içeren yaklaşımlarında faaliyet listesi ve mod listesi üzerinde çalışmışlardır. İki ayrı çözüm stratejisi önerilmiştir. Bir yaklaşım sürekli olurlu çözümlerle çalışır ve proje süresini enazlamayı amaçlar. Diğer yaklaşım ise, yenilenemez kaynaklar açısından olursuz çözümleri de kullanır ancak olurluluğa amaç işlevine eklenmiş bir ceza işlevi ile ulaşmaya çalışır. Ceza işlevi yenilenemez kaynakların kısıt ihlalinin bir işlevidir (Hartmann, 1997). Komşu çözüm türetimi için üç ayrı işleç tanımlanmıştır: Faaliyet listesi üzerinde rasgele seçilen bir faaliyetin yine rasgele en yakın öncülü ve en yakın ardılı arasında bir pozisyona atanması; mod listesinde rasgele seçilen pozisyondaki mod için rasgele bir mod değeri atanması; ilk iki işlecin beraberce uygulanması. Ceza işlevi uygulanmayan yaklaşımda, işleç uygulaması olurlu bir çözüme ulaşana veya belirli bir sayıda uygulama yapılana kadar devam eder. Son durum algoritmanın uygulamasını sonlandırma kriterlerinden birisidir. Faaliyet listesinin çizelgeye dönüştürülmesinde seri çizelgeleme uygulanmıştır. Sayısal deneyler ceza işlevi stratejisinin daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Önerilen algoritmanın, belirli bir CPU süresi içinde, eniyi çözümü yakalama kriterine göre Bouleimen ve Lecocq (1998b) algoritmasından daha iyi, Hartmann (1997) algoritması ile ise benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak, eniyi çözümden sapmada bu iki algoritmadan daha kötü sonuçlar rapor edilmiştir. Algoritmanın faaliyet sayısı arttıkça daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır.

5. Nakit Akışlarının Net Bugünkü Değerinin Ençoklanması Problemi

Projeler uygulanırken faaliyetlere ilişkin olarak nakit girişleri ve çıkışları söz konusudur. Nakit girişlerini pozitif olarak tanımlarsak, proje çizelgelemede nakit akışlarının NBDinin ençoklanması karar verici açısından bir amacı tanımlar. Salt nakit çıkışlarının göz önüne alındığı bir ortamda amaç maliyetin NBDinin enazlanmasına; salt nakit girdilerinin göz önüne alındığı bir ortamda da kârın NBDinin ençoklanmasına dönüşür.

Daha önce de belirtildiği gibi, proje süresinin enazlandığı kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi *NP-hard in the strong sense* olarak tanımlanmış bir problemdir. Nakit akışlarının NBDinin ençoklanması problemi Patterson vd. (1990) tarafından belirtildiği gibi daha da zor bir problemdir. Ayrıca, sezgisel yöntemler açısından bir zorluk da, nakit akışlarına ilişkin amaç işlevlerinin düzgün bağımlı olmayışlarıdır.

Finansal hususların kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemlerine dahil edilmesi çalışmaları nispeten geç kalmıştır. Bu konudaki ilk makaleler yayımlandıktan sonra uzun bir süre bu alanda fazla bir yayın görülmemiştir (Russell, 1970; Grinold, 1972). Bu makalelerde kaynak kısıtları göz önüne alınmamıştır. Ancak Grinold (1972) sabit bir terim problem tanımına dahil etmiştir. Bütçenin tek kaynak kısıtı olarak içerildiği ilk problem gösterimi Doersch ve Patterson (1977) tarafından 0-1 tam sayı programlama problemi olarak verilmiştir. Genel anlamda kaynak kısıtlarının göz önüne alındığı ilk makale Russell (1986) tarafından yayımlanmıştır. Ancak son zamanlarda bu alana büyük bir ilgi gözlenmektedir. Kaynakların kısıtlı olduğu ortamlarda, projenin mümkün olduğunca erken bitirilmesi amaç işlevinin, diğer bir deyişle proje süresinin enazlanmasının her zaman nakit akışının NBDinin ençoklanması amaç işlevini de sağladığı söylenemez (Bey vd., 1981). Bu nedenle, amaç işlevi nakit akışının NBDinin ençoklanması olan kısıtlı kaynaklarla proje çizelgeleme problemi kendi başına incelenmesi gereken önemli bir problem sınıfını oluşturur.

5.1. Proje Ortamı, Taraflar ve İlişkileri

Maliyet ve kârdan bahsetmeden önce projenin gerçekleştirildiği ortamı tanımlamak gerekir. Projenin bir sahibi (*client*) vardır. Proje sahibi projeyi kendisi yapar veya bir başkasına yaptırır. İkinci durumda, projeyi yapan kişi veya kuruluşa müteahhit (*contractor*) diyoruz. Projenin finansal modeli bir nakit akışı olarak ifade edilir. Müteahhit açısından bakıldığında; maliyetler nakit çıkışları, ödemeler ise nakit girişi olarak ifade edilir.

Finansal modelde projenin mutlaka bir termini vardır. İş sahibi projenin termine uygun bitirilmesini sağlamak için gecikme durumunda önceden belirlenmiş bir ceza (*penalty*) uygulayabilir. İş sahibi, projenin erken bitmesi ile erken başlayacak uygulama sonucu oluşacak ek kârı (daha da genelde yararı) elde edebilmek için müteahhiti özendirmek amacı ile bu ek kârı müteahhit ile bölüşmeyi kabul edebilir. Bu durumda, proje termininden önce bitirildiği takdirde müteahhite önceden belirlenmiş bir ödül (*bonus*) verilir. Ceza ve ödül bir kerelik toplu bir miktar olabildiği gibi birim zaman cinsinden ifade edilen ve zamanın fonksiyonu olan bir miktar da olabilir.

Faaliyetlerin maliyeti, yapılan iş süresince dağılmış olarak veya faaliyetin başında veya faaliyetin sonunda oluşabilir. Ne şekilde olursa olsun, paranın zaman değeri kullanılarak maliyet faaliyetin istenen bir noktada tek bir nakit çıkışı olarak ifade edilir. Maliyetlerin nakit çıkışı olarak bir olay düğümünde oluştuğu durumu yansıtan modeller de kurulmuştur.

Ödemeler, iş sahibi ile müteahhit arasındaki anlaşmaya göre gerçekleşir. Çeşitli anlaşma tipleri söz konusudur (Herroelen vd, 1997). Burada ancak bazı temel anlaşma biçimleri üzerinde duracağız.

(i). *Toplu ödeme*. Toplu ödemede tüm ödeme proje tamamlandığında yapılır. Toplu ödeme, nispeten küçük projelerde uygulanır. Müteahhitin finansal kaynak açısından zorlanmadan projeyi gerçekleştirebileceği öngörülür.

(ii). *Belirli zaman aralıkları ile yapılan ödemeler*. Diğer bir ödeme biçimi belirli zaman aralıkları ile yapılan ödemelerdir; örneğin aylık ödemeler gibi. Burada, iki tip ödeme yapılabilir.

Birinci tip ödemede, ödeme miktarı zaman aralığı içinde yapılan harcamaların maliyeti ve kâr toplamı olarak saptanır. Bir yaklaşımda, kâr, maliyetin öngörülen belirli bir yüzdesi şeklinde belirlenebilir (*cost plus profit*). Diğer bir yaklaşımda, kâr sabit bir ücret şeklinde belirlenebilir (*cost plus fixed fee*). Ancak iş sahibi bir tedbir olarak o anda ödemenin tümünü değil bir bölümünü ödemeyi tercih edebilir ve kalan bölümünü proje bitiminde toplu halde ödemek üzere elinde tutar (*retainage*).

İkinci tip ödemede ise, müteahhite proje bütçesinin daha önceden belirlenmiş bir yüzdesi ödenir. Belirli zaman aralıklarında yapılan ödemelerde, proje termini de göz önüne alınarak, yapılan ödemelerin adedi de önceden sabitlenebilir. Bu durumda, projenin bitirilmesi proje termininin ötesine sarkarsa, son ödeme bir önceki ödeme ile aradaki süreye bakılmaksızın proje sonuna ertelenir.

(iii). *Belirli olaylarda yapılan ödemeler*. Proje boyunca daha önceden basamak taşı (*milestone*) olarak tespit edilmiş olaylarda müteahhite ödeme yapılır. FAG gösteriminde bu olaylar düğümlere karşı gelebildiği gibi, belirli faaliyetlerin sonu olarak da tanımlanabilir. Ödeme tipleri (ii)de belirtilen iki tip gibidir. Birinci tip ödeme, basamak taşı olayın oluştuğu anda tamamlanmamış faaliyetlerin o ana kadar olan maliyetlerini de içerebilir veya sadece o anda tamamlanmış faaliyetlerin maliyetleri üzerinden yapılır. Bazı modellerde, o olayın oluşması ile öncülleri tamamlanmış ve başlatılabilecek durumda olan faaliyetlerin maliyetine karşılık bir miktar avans ödemesi de göz önüne alınmaktadır. Ancak modelleme ve hesaplama açısından, avans ödemelerinin paranın zaman değeri de göz önüne alınarak faaliyetin tek noktada ifade edilen maliyetine dahil edilmesi daha uygun gözükmektedir.

Görüldüğü gibi, toplu ödeme anlaşma biçimi, belirli olaylarda yapılan ödemeler anlaşma biçiminin özel bir halidir. Ancak, toplu ödemenin ayrıca belirtilmesinin nedeni projenin yönetimi ve iş sahibi-müteahhit ilişkileri bakımından içerdiği farklılıklardır.

İndirgenmiş nakit akışlı kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi (İNAKKPÇP) varsayımları itibarı ile daha önce tanımlanmış tek modlu ve çok modlu kaynak kullanımlarını içeren KKPÇP ile aynıdır. Burada tanımlanan problemin farklılığı nakit akışları içermesinden ve bunun yansıtıldığı amaç işlevinden kaynaklanmaktadır. Yukarıda anlatılan anlaşma biçimlerinden, önce, belirli olaylarda yapılan ödemeler için önerilmiş modeller ve algoritmalar üzerinde durulacaktır. Daha önce de belirtildiği gibi, bu anlaşma biçimi toplu ödeme anlaşmalarını da içermektedir.

5.2. Problemin Tanımı

Nakit akışları faaliyetlerin başlangıcında, bitiminde veya faaliyet süresince oluşabilmekte ve paranın zaman değeri de göz önüne alınarak faaliyetin başlangıcına veya bitimine indirgenmektedir. Problemin amacı ise, bu nakit akışlarının NBDinin ençoklanmasıdır. Yukarıda bahsedilen ödeme biçimlerine uygun bir amaç işlevi tanımlanır. Örneğin, nakit çıkışları (NA_j^-) her j faaliyetinin başlangıcında meydana gelen ve projenin bitiminde toplu bir tek nakit girişi (TNG) olan bir ödeme planı için amaç işlevi aşağıda verilmiştir (1).

$$NBD = \sum_j NA_j^- (1+r)^{-BZ_j} + TNG(1+r)^{-C_{maks}} \quad (1)$$

Faaliyetler, proje süresinin verilen terminini (T) geçmeyecek şekilde çizelgelenmektedir. Burada, BZ_j , j. faaliyetin başlama zamanı, r iskonto oranıdır.

Bu amaç işlevine belirli olaylarda yapılan ödemeler (nakit girişleri) de dahil edilerek genel bir ifade elde edilebilir.

5.3. Kesin Çözüm Yöntemleri

Yang vd. (1992), Talbot ve Patterson'un (1978) örtük birerleme yöntemini nakit akışlarının NBDinin ençoklanmasına uyarlamışlardır. İcmeli ve Erenguc (1996) bir dal-sınır algoritması önermişlerdir. Yaklaşımları yukarıda rapor edilen Demeulemeester ve Herroelen (1992) dal-sınır algoritmasına yakındır. Başlangıç çözümü, Grinold (1972) algoritmasının, nakit akışlarının NBDinin ençoklanması probleminin kaynak kısıtları kaldırılmış şekline uygulanması ile elde edilmektedir. Dallonma için en küçük ertelenen faaliyetler kümesi kullanılmıştır. Dallonma, çözüm ağacının herhangi bir düzeyinde en büyük amaç işlevine sahip olan düğüm üzerinden yapılmaktadır. Bu iki yaklaşım da nakit çıkış ve girişlerine izin vermekte ve projenin bitişi üzerine koyulmuş bir termini göz önüne almaktadır. Proje terminini serbest bırakan ve sadece nakit girişlerine izin veren bir dal-sınır algoritması Baroum ve Patterson (1999) tarafından önerilmiştir.

Dayanand and Padman (1997), müteahhitin nakit akışının NBDini ençoklayacak şekilde iş sahibinin ödemelerinin ödeme zamanları ve miktarlarının belirlenmesi problemini tanımlamış ve bu problem için değişik proje ortamlarını göz önüne alan modeller geliştirmişlerdir.

5.4. Sezgisel Karar Kurallarına Dayalı Yöntemler

Russell (1986) altı adet sezgisel karar kuralını incelemiştir. Bu kurallardan üçü, problemin kaynak kısıtsız hali için daha önce Russell (1970) tarafından önerilen algoritmanın kullanılması sonucu elde edilen çözümlerden hareketle geliştirilmiştir. Küçük boyutlu problemler için, önerilen sezgisel karar kurallarının birisinin diğerine üstünlük sağladığı gösterilememiştir. Büyük boyutlu problemlerde ise; kaynak kısıtlarının çok sıkı olmadığı durumlarda ve kısa boşluk süresi (MSLK) sezgisel kuralının baskın olduğu, kaynak kısıtlarının sıkı olduğu durumlarda ise yukarıda belirtilen üç kuralın nispeten iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Yukarıda (1)de amaç işlevi verilen nakit akışı modeli için Smith-Daniels ve Aquilano (1987) bir sezgisel model önermişlerdir. Algoritmalarını elde ettikleri çizelgeyi sola kaydırmalarla daha da geliştirme esası üzerine kurmuşlardır. Baroum ve Patterson (1996), GRPW sezgisel kuralını İNAKKÇPne uyarlamışlardır. Buna göre, bir faaliyetin önceliği o faaliyeti takip eden faaliyetlerin nakit akışlarının toplamı olarak alınmıştır. Padman vd. (1997), tıpkı Russell (1986) gibi problemin kaynak kısıtsız halinin çözümünden yararlanan bir algoritma önermişlerdir. Dokuz ayrı sezgisel kural çeşitli proje parametreleri için denenmiştir. En iyi sonuçların, ara ödemelere yol açacak faaliyetlerin daha erken çizelgelenmesine yol açan karar kuralları tarafından sağlandığı görülmüştür. Zhu ve Padman (1997) altı değişik sezgisel kuralı birarada kullanarak iyi sonuçlar rapor etmişlerdir.

5.5. Diğer Sezgisel Yöntemler

Ulusoy ve Özdamar (1995), iteratif LCBA algoritmasını amaç işlevi (1) ile ifade edilen, yani nakit çıkışlarının faaliyetlerin başında gerçekleştiği ve projenin bitiminde toplu ödemenin yapıldığı bir nakit akışı modeline uygulamışlardır. Sadece yenilenebilir kaynaklar göz önüne alınmış ve hem tek modlu hem de çok modlu kullanım durumları için çözülmüştür. LCBA'nın iteratif uygulamasının, MSLK, LFT, WRUP sezgisel kurallarının başlangıç-bitiş çıkışlı iteratif uygulamalarından ve Li ve Willis'in (1992) algoritmasından daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Burada irdelenen nakit akışı modeli için

NBDin ençoklanması ve proje süresinin enazlanması amaçlarının birbirini desteklediği, diğer bir deyişle aynı yönde geliştiği gözlenmiştir. Aynı gözlem Smith-Daniels ve Aquilano (1987) tarafından da rapor edilmiştir.

Ulusoy ve Özdamar (1996) bir modelleme ve bir de çizelgeleme modüllerinden oluşan bir karar destek sistemi önermişlerdir. Modelleme modülü ile karar verici kendi modelini oluşturabilmektedir. Yenilenebilir, yenilenemez ve çift yönden kısıtlı kaynakların çok modlu ortamda kullanılabilirdiği, projenin değişik noktalarında oluşabilen genel nakit akışlarını içerebilen bir modelleme ortamı sunulmaktadır. Karar verici, nakit akışlarının NBDini ençoklama, proje süresini enazlama veya bir termin koyulmuşsa, terminden sapmayı enazlama gibi amaç işlevlerinden birisini kullanabilmektedir. Çizelgeleme modülü LCBA uygulamasıdır. Karar verici değişik durumları sınyarak bir karara varma olanağına sahiptir. Önerilen karar destek sistemi proje planını güncelleştirme amacı ile de kullanılabilir. Proje yönetiminin ilerideki faaliyetlere ilişkin olarak yapmış olabileceği anlaşmalarda fazla bir değişikliğe neden olmamak için plandan en az sapma amaçlanmaktadır. Karar vericiye ilerisi için planlanmış bazı faaliyetleri dondurma olanağı da verilmektedir.

5.6. Meta-Sezgisel Yöntemler

Genetik algoritma. Sivrikaya-Şerifoğlu (1997) bir genetik algoritma uygulaması sunmuştur. Problemin çok modlu halini de göz önüne alabilen, çok-bileşenli, düzgün, sıralama temelli bir çaprazlama işleci önerilmiştir. Gösterim, faaliyet listesi gösteriminin geliştirilmiş bir halidir. Kromozom üzerindeki her gen bir faaliyet ile ilişkilendirilir ve o faaliyetin kullandığı kaynaklara ilişkin mod seçimlerini de içerir. İki mutasyon işleci kullanılmıştır: Faaliyetler için yer transferi mutasyonu işleci ve mod seçimi için mod mutasyonu işleci. Yer transferi mutasyonu, kromozomda rasgele bir konum seçer ve bu konumdaki genin içeriğini rasgele seçilmiş ikinci bir konuma taşır. Mod mutasyonu ise rasgele seçilen sayılarla belirlenen mutasyon yapılacak konumdaki faaliyete, modlarından birini rasgele atar. Fakat bu atamada daha önceki modun aynısı da atanabilir ve bu da etkin mutasyon oranının belirlenen mutasyon oranından daha küçük olabileceği anlamına gelmektedir. Sivrikaya-Şerifoğlu'nun önerdiği algoritma, toplu ödeme durumu için Ulusoy ve Özdamar (1995) tarafından önerilen iteratif LCBA ile karşılaştırılmış ve daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Sivrikaya-Şerifoğlu vd. (2000) bu algoritmayı yenilenemez kaynakları da içerecek şekilde genişletmişlerdir.

Tabu tanımlayarak arama. Icmeli ve Erenguc (1994) bir tabu tanımlayarak arama yöntemi önermişlerdir. Başlangıç çözümünü elde etmek için tek geçişli bir sezgisel yöntem kullanmışlardır. Komşu çözümler, bir çizelgedeki faaliyetlerin bitiş anlarının, o faaliyetin en erken ve en geç bitiş anlarını ihlal etmeyecek şekilde, bir zaman birimi erkene veya geçe alınması ile tanımlanmıştır. Ayrıca, yöntemin bir parçası olarak uzun vadeli hafıza unsurunu da tanımlayarak kullanmışlardır. Diğer bir tabu tanımlayarak arama yöntemi Zhu ve Padman (1996) tarafından önerilmiştir.

Tavlama Benzetimi. Dayanand ve Padman (1994), iki aşamalı bir yöntem önermişlerdir. Birinci aşamada yapılan bir tavlama benzetimi ile elde edilen çözüm, ikinci aşamada çizelgeleme değişiklikleri uygulanarak geliştirilmektedir.

5.7. Belirli Zaman Aralıkları İle Yapılan Ödemeler Modeli

Belirli zaman aralıkları ile yapılan ödemeler modeli için Kazaz ve Sepil (1996) bir karışık tam sayı programlama modeli önermişlerdir. Kaynak kısıtlarını içermeyen bu problem gösterimi için Benders ayrıştırma tekniği önerilmiştir. Problemin kaynak kısıtlarını da içeren tanımlaması için, Sepil ve Ortaç (1997) üç ayrı sezgisel yöntem önermişler ve bunları ayrıntılı bir şekilde sınımışlardır.

5.8. İş Sahibi Açısından Modelleme

Nakit akışı modelleri ile ilgili yukarıda tartışılan model ve çözüm önerileri müteahhitin kârını ençoklamaya yöneliktir. İş sahibi açısından probleme bakıldığında, problem iş sahibinin yapacağı ödemelerin miktarının ve yapılacağı zamanın belirlenmesi olarak tanımlanır. Dayanand ve Padman (1995), temel iş sahibi modeli, belirli zaman aralıkları ile yapılan ödemeler ve bunun özel hali olan sabit aralıklar ile yapılan ödemeler için karışık tam sayı programlama modeli önermişlerdir. Eniyi ödeme planı çözümlerinin özelliklerini araştırmışlar ve bazı sonuçlar rapor etmişlerdir.

5.9. İş Sahibi-Müteahhit Müşterek Modeli

İş sahibi için ayrı ve müteahhit için ayrı olarak nakit akışlarının eniyilenmesi için geliştirilmiş algoritmalar yukarıda tanıtılmaya çalışılmıştır. Ancak iş sahibi ile müteahhit arasında bir anlaşma sonucu gerçekleşen projeler için anlaşma öncesi evrede anlaşma şartlarını belirlemek üzere yapılan müzakerelerin modellenmesi de ilginç bir araştırma konusudur. Bu konuda proje planlama dışında çalışmalar uzun süredir yapılmaktadır. Yarar işlevi uygulamaları için Raiffa (1982) ve oyun kuramı uygulamaları için Kohli ve Park (1989, 1994) örnek gösterilebilir.

Proje planlama açısından bir çalışma Ulusoy ve Cebelli (2000) tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada müzakere süreci sonucu iş sahibinin ve müteahhitin hakça bir çözüme ulaştıkları varsayılmaktadır. Hakça çözümün tanımı ise, iki tarafın da ideal çözümlerinden eşit oranda uzak oldukları çözüm olarak tanımlanmıştır. İdeal çözümler; iş sahibi için tüm ödemeyi projenin bitiminde yapmak, müteahhit için ise tüm ödemenin projenin başlangıcında yapılmasıdır. Çift döngülü bir genetik algoritma önerilmiştir. Dış döngü iş sahibini, iç döngü ise müteahhiti temsil eder. İç döngü, dış döngü tarafından önerilen bir ödeme planı için faaliyetlerin çizelgelemesini müteahhitin kârını ençoklayacak şekilde yapar. İç döngü için Sivrikaya-Şerifoğlu'nun (1997) algoritması kullanılmıştır. Dış döngünün kromozomu proje seriminin düğümlerinde iş sahibi tarafından yapılacak ödemeleri gösterir. Toplam bütçe genlere eşit yüzdede dağıtılır. Kromozomda 20 gen varsa, her bir gen toplam bütçenin %5'ine karşı gelir. Genlere düğümler atanır. Bir düğüm birden fazla gene atanabilir. Bir düğümün kromozomdaki üzerinde gözüktüğü gen sayısı daha önceden saptanmış eşit yüzde ile çarpılarak, o düğümde ödenecek miktar bütçenin bir yüzdesi olarak belirlenir. Dış döngü genetik algoritmasında, çift noktadan çaprazlama uygulanmıştır. Dış döngüde, her bir kromozomun uygunluk değerinin belirlenmesi için iç döngü bir kere uygulanmıştır.

6. Kaynak Kısıtlı Birden Çok Projenin Çizelgenmesi

Kaynak kısıtlı birden çok projenin çizelgenmesi uygulamadaki gerçek durumu yansıtması bakımından kaynak kısıtlı proje çizelgelemede önemli bir araştırma alanıdır. Örneğin, değişik şantiyelerde iş yapan bir inşaat şirketi bu şantiyelerde ortak ve kısıtlı kaynaklarını kullandığından tipik olarak bu poje çizelgeleme modeline uygun bir görünüm sergiler. Aynı şekilde, bir otomotiv firmasının aynı anda birden fazla ürün geliştirme projesinde ortak ve kısıtlı kaynaklarının kullanıldığı ortamın planlanması da kaynak kısıtlı birden çok projenin çizelgenmesini icap ettirir.

Kaynak kısıtlı birden çok projenin çizelgenmesi için iki temel yaklaşım vardır: (i). Her projenin kendi başına ele alınması (diğer bir deyişle, her projenin kendi başlangıç ve bitiş düğümünün olması); (ii). Tüm projelerin bir proje halinde bütünleştirilmesi (diğer bir deyişle, tüm projeler için bir başlangıç ve bir bitiş düğümü olması). Çizelgeleme için kullanılan sezgisel kurallar, genelde, iki ayrı modelleme için farklı değerler verecektir.

Genelde, zaman bazlı amaçlar üzerinde çalışılmıştır. Çizelgeleme için amaç işlevi iki tür modelleme için de temelde aynıdır: kaynakların kısıtlı olması sonucu oluşan gecikmenin, yani kaynak kısıtlı çizelgeleme ile elde edilen proje süresi ile kaynak kısıtsız (CPM) proje süresi arasındaki farkın bir işlevidir. Her projenin kendi başına ele alınması durumunda, gecikme her bir proje için ayrı ayrı hesaplanır ve proje sayısına bölünerek ortalaması alınır (MPD- *mean project delay*). Tüm projelerin tek bir proje halinde birleştirildiği durumda ise, bu tek proje boyutunda gecikme hesaplanır ve tek proje boyutundaki CPM proje süresine bölünerek oransal bir değer olarak kullanılır (MDI- *multi-project duration increase*).

Tüm projelerin tek bir proje halinde bütünleştirilmesi durumu için tek proje çizelgelemede sürenin enküçüklenmesinde başarılı olmuş LFT, LST, MSLK gibi sezgisel kurallar kullanılmıştır. Kaynak kısıtlı birden çok projenin çizelgenmesi için önerilmiş sezgisel kuralların bazılarını şöyle listeleyebiliriz:

- i. En büyük toplam iş kapsamı (*maximum total work content - MAXTWK*).
- ii. En kısa süreli projenin en kısa süreli faaliyeti (*shortest activity from shortest project - SASP*).
- iii. En kısa boşluk süresi (*minimum total slack - MSLK-MP*).
- iv. En geç bitirme zamanı (*minimum latest finish time - MINLFT- MP*).

Her projenin kendi başına ele alındığı modelleme durumu için, tek proje için geliştirilmiş sezgisel kuralların bu duruma uygulamasına göre daha iyi sonuçlar vermiştir (Kurtulus ve Davis, 1982; Kurtulus

ve Narula, 1985). Yine aynı araştırmacılar, MAXTWK ve SASP sezgisel kurallarının MPD'nin enazlanmasında en iyi sonuçları verdiği rapor etmişlerdir.

Tsubakitani ve Deckro (1990) ev inşaatlarında birden çok projenin çizelgelenmesi ve kontrolü için dinamik bir algoritma önermişlerdir. SASP sezgisel kuralını kullanarak her biri 100den fazla faaliyet içeren 50den fazla projeyi birarada çizelgelemişlerdir. Bir UPDATE modülü ile proje yöneticisine proje planını güncelleme olanağı sağlanmıştır. Faaliyet bölme ve uygulanan bir faaliyeti durdurarak uygulamasını erteleme, öncüllük ve kaynak kısıtı gibi hususlarda güncel durumu yansıtılabilmek için bunları göz ardı edebilme olanakları proje yöneticisine sağlanmıştır.

Projeler için termin belirlenmesi pratik açıdan önemli bir problemdir. Dumond ve Mabert (1988) projelerin değişik zamanlarda sisteme girebildiği dinamik bir ortamı incelemişlerdir. Ortalama sapma, ortalama bitiş zamanı ve toplam gecikme amaç işlevlerini irdelemişlerdir. Dumond ve Mabert, MSLK, LFT, SASP gibi sezgisel çizelgeleme kurallarını dinamik ortama uyarlayarak kullanmışlar ve değişik termin belirleme kurallarını sınıamışlardır. Terminlerin proje yüküne göre belirlendiği durumlarda FIFO sezgisel kuralının diğerlerine göre daha iyi sonuçlar verdiğini rapor etmişlerdir. Bock ve Patterson (1990), Dumont ve Mabert'in elde ettiği sonuçları daha değişik proje ortamlarında sınıamışlar ve benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Faaliyetlerin yarıda kesilip ertelendiği durumlarda uygulanacak politikaların termine uyabilme konusunda kritik rol oynadığını göstermişlerdir. Dumond (1992) daha önce yapılan çalışmadaki (Dumond ve Mabert, 1988) sezgisel çizelgeleme ve termin belirleme kuralları üzerinde kaynak olanaklarının etkinliğini irdelemiştir.

Lawrence ve Morton (1993) her projenin gecikmesinin farklı bir maliyeti olması durumunu irdelemişlerdir. Bunu amaçla, ağırlıklı gecikme maliyetinin enazlanması için kaynak kullanımının yoğunluğuna bağlı kaynak fiyatlandırma politikaları kullanmışlardır.

Lova ve Tormos (2000), her projenin kendi başına ele alındığı modelleme durumu için iki aşamalı bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Atanacak faaliyetin saptanması için ilk aşamada toplam iş kapsamı (TWK) sezgisel kuralı kullanılarak proje seçilmiş, ikinci aşamada ise, GRD, en erken başlama zamanı (EST), ilk gelen ilk önce (FCFS) ve LST sezgisel karar kurallarında birisi kullanılarak atanacak faaliyet belirlenmiştir. Yapılan sayısal karşılaştırma çalışmalarında iki aşamalı algoritma MAXTWK sezgisel kuralı kullanan tek aşamalı sezgisel algoritma ile karşılaştırılmış ve iki aşamalı algoritmanın genelde daha iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. Yukarıda sayılan sezgisel kurallar arasında ikinci aşamada LST'nin en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. Sezgisel kurallardan hiçbirisinin diğerlerinden çok öne çıkması sonucu, Lova ve Tormos, TWK-LST, TWK-FCFS ve TWK-EST kombinasyonlarının uygulanarak elde edilen en iyi çözümün nihai çözüm olarak önerildiği bir uygulama önermişlerdir. Tek proje çizelgeleme ortamındaki birden çok geçiş uygulaması ile paralel bir uygulama olan bu uygulamanın daha çok hesaplama süresi kullanarak daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Bahsedilen hesap süreleri saniye mertebesinde CPU-süreleri olduğundan, BEST-MP olarak nitelendirilen bu algoritmanın pratikteki uygulamalarda tercih edilmesinin gereği açıktır. Lova ve Tormos, sezgisel kurallarla birlikte seri ve paralel çizelgeleme yöntemlerinin katkısını da araştırmışlar ve paralel çizelgelemenin daha iyi sonuçlar verdiğini saptamışlardır.

Bouleimen ve Lecocq (1999) birden çok proje çizelgeleme ortamı için bir çok amaçlı sezgisel yöntem önermişlerdir. İlginç bir yaklaşımla, projeler amaç olarak iade edilmişlerdir. Bu şekilde, karar vericinin projeler arasında bir öncelik sıralaması yapabilmesine olanak sağlanmıştır. Kaynak kullanımı çok modludur. Gösterimde yenilenemez kaynaklar da içermektedir. Dinamik bir ortam söz konusudur. Diğer bir deyişle, projelerin hepsinin sıfır anında hazır olması gerekmemekte; projeler değişik zamanlarda sisteme girebilmektedir. Kullanılan sezgisel yöntem Bouleimen ve Lecocq'un (1998b) önerdikleri tavlama benzetimi yönteminin (bölüm 4.4) çok amaçlı tavlama benzetimine uyarlanmış halidir. İki ve üç proje için sayısal deneyler rapor edilmiştir.

7. Çok Amaçlı Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme

Slowinski (1981, 1989) süre ve maliyet bazlı amaçları göz önüne alan ve yenilenemez kaynakları da içeren çok amaçlı kaynak kısıtlı proje çizelgeleme üzerinde çalışmıştır. Faaliyetler çok modlu olarak tanımlanmıştır. Faaliyetlerin gerçekleştirilmesine ara verilebileceği (*preemption*) varsayılmıştır. Ancak ikincil bir amaç olarak da bu ara verme sayısının enazlanması kabul edilmiştir. Slowinski'nin birinci algoritmasında (Slowinski,1981), öncülleri tamamlanan tüm faaliyetlerin oluşturduğu ve kaynak kısıtlarını ihlal etmeyen kümeler saptanır. Bu kümeler arasından atanacak kümenin seçimi çok amaçlı

doğrusal programlama kullanılarak eniyileme yolu ile belirlenir. İkinci algoritmada (Slowinski, 1989) ise, küme seçimi karar verici ile etkileşimli olarak gerçekleştirilir.

Norbis ve Smith (1988) bitirme zamanı, termin ve kaynak kullanım amaçlarını dinamik bir ortamda hiyerarşik olarak ele almışlardır. Hiyerarşinin her düzeyinde faaliyetlere o düzeyin amaç işlevine uygun öncelikler atanmış ve değişik öncelik dizileri elde edilmiştir. Dean vd. (1992) proje süresinin enazlanması, kaynak kullanım maliyeti ve terminden toplam veya ortalama sapma amaçlarını içeren bir sezgisel yöntemi birden çok projenin olduğu ve kaynak miktarlarının değişebildiği bir ortama personel çizelgeleme için uygulamışlardır.

Çok amaçlı proje çizelgeleme için bir karar destek sistemi Slowinski vd. (1994) tarafından önerilmiştir. Burada, sezgisel olarak yaratılan baskın çözümler karar verici tarafından etkileşimli olarak değerlendirilerek bir uzlaşma (*comprromise*) çözümüne ulaşılmaktadır. Sezgisel çözüm için tavlama benzetimi yaklaşımı uygulanmıştır. Komşu çözümler, öncüllük ilişkisi olmayan faaliyetler arasında ikili yer değiştirme ile elde edilmiştir. Faaliyet listesinden çizelgeye geçiş için seri çizelgeleme yöntemi kullanılmıştır. Örnek olarak, 40 faaliyetten oluşan ve iki kaynak kullanan bir ziraat problemi çözülmüştür. Birinci kaynağın işgücü, ikinci kaynak ise ziraat motorlarıdır. Proje süresinin enazlanması; birinci kaynağın kullanımının enazlanması; ve ikinci kaynağın kullanımının enazlanması göz önüne alınan üç amaçtır.

Proje süresi ve nakit akışlarının NBDi arasındaki ilişki Özdamar vd. (1998) tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Modelde nakit akışları olaylara karşı gelen düğümlerde meydana gelmektedir ve proje serimi üzerine yayılmıştır. Proje sonundaki ödeme, toplam ödemenin %10-15i dolaylarında tutulmuştur. Birim zaman başına bir gecikme cezası uygulanmaktadır. Çalışmada 16 sezgisel çizelgeleme kuralı kullanılmıştır. Bunların yedi tanesi NBD bazlı, üç tanesi gecikme bazlı, dört tanesi NBD ve gecikme bazlarının karışımı ile elde edilmiş melez (*hybrid*) kurallar ve iki tanesi de LCBA uygulamasıdır. Kaynak kıstlarının sıklığı ve termin sıklığı ikiye düzeyde olmak üzere irdelenmiştir. Buna göre, gecikme ve NBD arasındaki ödünleşim kaynakların sıkı olduğu durumda daha önem kazanmaktadır. En düşük gecikme değerleri daima en çok NBD çözümünün gecikme değerinden daha düşüktür. Terminin sıkı olduğu durumda NBD daha gevşek termin durumuna göre daha düşük bulunmuştur. İki amacın birarada göz önüne alındığı durumda üç melez kural en iyi sonuçları vermiştir. İyi sonuç vermeyen melez kuralın diğer melez kurallardan farklı olarak tek geçişli olduğu gözlenmiştir. Farklı ağırlıklarla çok geçişli sezgisel kurallar farklı çizelgeler üretmektedir. Karar verici bunlar arasından kendi beklentilerini en iyi karşılayan çözümü seçecektir.

Nabrzycki ve Weglarz (1999) uzman sistem ve çok amaçlı tabu tanımlayarak arama yöntemi kullanarak bir çok amaçlı proje çizelgeleme yöntemi geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, karar verici amaçlarını bir amaçlar listesi içinden belirler. Bu listede yer alan amaçlar şunlardır: Proje süresi, kaynak profilinin düzgünlüğü, ortalama ağırlıklı terminden sapma, ortalama ağırlıklı akış süresi, toplam kaynak kullanımı, ağırlıklı kaynak kullanımı ve NBD.

Lova vd. (2000), birden çok proje çizelgeleme ortamı için iki amaçlı bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Ödünleşimsiz bir eniyileme yaklaşımı benimsenmiştir. Buna göre, birincil amacın eniyilenmesi esas alınmış ve birincil amacın gerçekleşen düzeyinden ödün verilmeden ikincil amaç eniyilenmeye çalışılmıştır. Amaçlardan birincili zaman bazlıdır ve MPD veya MDI olarak seçilir; ikincili ise zaman bazlı değildir ve ara stok, kaynak kullanımı, kaynak kullanımı profili düzleme gibi amaçlar arasından seçilir. Altıncı bölümde bahsedilen MAXTWK ve MINLFT sezgisel kurallarını kullanan iki aşamalı bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Birinci aşama, başlangıç-bitiş çıkışı iteratif bir algoritmadır. İkinci aşamada ise, değişik amaçlar için değişik çözüm iyileştirme algoritmaları uygulanmıştır.

Viana ve de Sousa (2000) üç amaçlı ve yenilenemez kaynakların da göz önüne alındığı bir gösterime tavlama benzetim ve tabu tanımlayarak arama yöntemlerini uygulamışlardır. Gösterimde her faaliyetin bir termin vardır. Amaçlar, proje süresinin enazlanması, faaliyetlerdeki toplam gecikmenin enazlanması ve yenilenebilir ve yenilenemez kaynakların toplam ağırlıklı kısıt ihlallerinin enazlanmasıdır. Sınama problemleri üzerindeki sayısal karşılaştırmalar sonucu, tabu tanımlayarak aramanın tavlama benzetim yönteminden daha iyi sonuç verdiğini rapor edilmiştir.

8. Değerlendirme

Bu makalede kaynak kısıtlı proje çizelgeleme probleminin tüm çalışma alanları kapsanmamakla birlikte yine de makalenin Kaynakçasında yer alan kaynak sayısı alandaki yoğun araştırmanın bir göstergesidir.

Ancak buna rağmen araştırmacılar henüz bir çok konuya yeterince el atamamışlardır. Böyle henüz yeterince işlenmemiş bir konu, proje ortamında belirsizliktir. Belirsizlik sadece kaynak kısıtlı proje çizelgeleme için değil, proje yönetiminin tüm unsurları ve aşamaları için de kritik bir olgudur (Chapman ve Ward, 1997). Nitekim proje yönetimi yayınları arasında risk yönetimine ilişkin yayınların hızla arttığını görüyoruz. Bu nedenle, yönetim alanında risk yönetimi ve çizelgeleme alanında stokastik modelleme iki ilginç araştırma alanıdır. Stokastik modellemenin temel katkısı gerçek durumları daha iyi yansıtmaya yönelik yeni modellerin tasarımıdır. Nakit akışlarındaki belirsizlik; kaynakların kullanımındaki belirsizlik; bir faaliyetin istenen standartlara uygun biçimde gerçekleştirilememesi nedeni ile kısmen veya tümü ile tekrarı; belirli faaliyetlerin sonuçlarına göre projenin topolojisinin değişmesi gibi hususların tatminkâr bir biçimde modele dahil edilebilmesi ve matematiksel programlama yöntemleri ile çözüm getirilmesi teorik çalışmaların pratiğe yansıtılması ve pratikte kullanılabilir sonuçların üretilebilmesi bakımından önemli katkılar olacaktır.

Üretim planlama ve kontrolü araştırmalarında malzeme yönetimi geniş bir yer tutar. Proje yönetimi araştırmalarında ise malzeme yönetimine aynı önemin verildiği söylenemez. Bu konuda görece az sayıda araştırma yayımlanmıştır (Aquilano ve Smith-Daniels, 1980; Smith-Daniels ve Aquilano, 1984; Smith-Daniels ve Smith-Daniels, 1987; Erbaşı ve Sepil, 1999). Projenin ve gerektirdiği malzemenin müştereken planlanması ilginç bir araştırma alanıdır.

Bir önemli uygulama-araştırma alanı da proje planlama yazılımlarının geliştirilmesidir. Proje planlama yazılımlarının, uzun uğraşlar sonucu elde edilen kuramsal katkıları içermesinin sağlanması, bu kuramsal uğraşların katma değerini artırması bakımından da değerlendirilmelidir. Ayrıca, bu tür bir ilişkinin, kuramsal çalışmaların yönünün belirlenmesine olan etkisi ile yönlendirici bir rolü de vardır.

Değişik zamanlarda, araştırmacılar, bazı makina çizelgeleme problemlerinin kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi şeklinde nasıl ifade edilebileceği ve iki ayrı yaklaşımın ilişkisi üzerinde çalışmış ve yollar önermişlerdir. Böyle bir ilişki kurulmasının hemen akla gelen pratik yansımaları ise, makina çizelgeleme ile proje çizelgeleme üzerinde çalışan araştırmacıların birbirlerinin araştırmalarından öğrenmeleri ve bazen iki alan için de geçerli yöntemler geliştirerek araştırmanın katma değerini artırmalarıdır. Son olarak bu konu üzerinde durmak istiyorum.

Bilindiği gibi atelye çizelgeleme problemi *NP-complete in the strong sense*'dir (Garey vd., 1976a). Atelye çizelgeleme problemi ve KKPÇP (P1) arasındaki ilişki Schrage (1970) ve daha sonra başka araştırmacılar tarafından irdelenmiştir. Sprecher (1994) atelye çizelgeleme probleminin KKPÇP'nin bir özel hali olduğunu göstermiştir.

Montaj hattı dengeleme problemi üretim yönetiminin eski problemlerinden birisidir. Montaj hattı dengeleme probleminde amaç, operasyonların atandığı istasyon adedinin enazlanması veya hattın çevrim süresinin enazlanmasıdır. İstasyon adedinin enazlanması problemi için Elmaghraby (1977), KKPÇP (P1) ile montaj hattı dengeleme problemi arasındaki ilişkiyi göstermiştir. De Reyck ve Herroelen (1995) ise bu amaçla (SS) öncüllük ilişkilerini kullanmışlardır. Sprecher (1999) faaliyetin uygulaması esnasında değişken kaynak talebi kullanarak montaj hattı dengeleme problemi ile KKPÇP arasındaki ilişkiyi yansıtmıştır.

Tek boyutlu kutu doldurma problemi ile KKPÇP (P1) arasındaki ilişki Garey vd. (1976b) tarafından irdelenmiştir. İki boyutlu kutu doldurma problemi için Schrage (1970) kutunun bir boyutunun KKPÇP'nin zaman boyutu; ikinci boyutunun ise KKPÇP'nin yenilenebilir kaynak boyutu ile ifade edildiği bir ilişki kurmuştur. Üç boyutlu kutu doldurma problemi için bir dönüşüm önerisi Hartmann (1999b) tarafından verilmiştir. Hartmann, ayrıca, sırt çantası doldurma (*knapsack packing*) probleminin bir, iki ve üç boyutlu gösterimleri için dönüşüm önerileri geliştirmiştir.

Demeulemeester ve Herroelen (1996) üretim planlamanın hazırlık süreleri, katile üretimi gibi unsurlarını, KKPÇP'nin en az bekleme süresi, termin, faaliyetin uygulanması esnasında değişken kaynak talebi gibi unsurlarını kullanarak ifade edebilmenin yollarını irdelenmişlerdir.

Yukarıda makina ve proje çizelgeleme arasındaki ilişkinin irdelendiği bazı çalışmalardan örnekler verilmiştir. Teknik yazın incelendiğinde bu konuda yayınların giderek arttığını gözlenmektedir. Bu alan da verimli bir araştırma alanı olarak gözükmektedir.

Kaynakça

Alvarez-Valdes, R., Tamarit, J.M. (1989), "Heuristic algorithms for resource-constrained project scheduling: A review and empirical analysis", R. Slowinski, J. Weglarz içinde, 113-134.

- Aquilano, N.J., Smith-Daniels, D.E. (1980), "A formal set of algorithms for project scheduling with critical path scheduling / material requirements planning", *Journal of Operations Management*, 1, 57-67.
- Baar, T., Brucker, P., Knust, S. (1997), "Tabu search algorithms and lower bounds for the resource-constrained project scheduling problem", *Çalışma Raporu*, Osnabrück Üniversitesi, Osnabrück.
- Baker, K. (1974), *Introduction to Scheduling and Sequencing*, Wiley, New York.
- Baroum, S.M., Patterson, J.H. (1996), "The development of cash flow weight procedures for maximizing the net present value of a project", *Journal of Operations Management*, 14, 209-228.
- Baroum, S.M., Patterson, J.H. (1999), "An exact solution procedure for maximizing the net present value of cash flows in a network", *J. Weglarz içinde*, 107-134.
- Bell, C.E., Han, J. (1991), "A new heuristic solution method in resource-constrained project scheduling", *Naval Research Logistics*, 3, 315-331.
- Bey, R.B., R.H. Doersch, J.H. Patterson, "The net present value criterion: its impact on project scheduling", *Project Management Quarterly*, 12, pp. 223-233, 1981
- Blazewicz, J., Lenstra, J.K., Rinnooy Kan, A.H.G. (1983), Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity, *Discrete Applied Mathematics*, 5, 11-22.
- Bock, D.B., Patterson, J.H. (1990), "A comparison of due date setting, resource assignment and job preemption heuristics for the multiproject scheduling problem", *Decision Sciences*, 21, 387-402.
- Boctor, F.F. (1990), "Some efficient multi-heuristic procedures for resource-constrained project scheduling", *European Journal of Operational Research*, 49, 3-13.
- Boctor, F.F. (1993), "Heuristics for scheduling projects with resource restrictions and several resource duration modes", *International Journal of Production Research*, 31, 2547-2558.
- Boctor, F.F. (1996a), "An adaptation of the simulated annealing algorithm for solving resource-constrained project scheduling problems", *International Journal of Production Research*, 34, 2335-2351.
- Boctor, F.F. (1996b), "A new and efficient heuristic for scheduling projects with resource restrictions and multiple execution modes", *European Journal of Operational Research*, 90, 349-361.
- Bouleimen, K., Lecocq, H. (1998a), "A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem", Technical Report, Université de Liège, Belçika.
- Bouleimen, K., Lecocq, H. (1998b), "A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode version", Technical Report, Université de Liège, Belçika.
- Bouleimen, K., Lecocq, H. (1999), "Resource-constrained multi-project scheduling problem multi-objective simulated annealing", Technical Report, Université de Liège, Belçika.
- Brucker, P., Knust, S. (1999), "Solving large sized the resource-constrained project scheduling problems", *J. Weglarz içinde*, 27-52.
- Brucker, P., Knust, S., Schoo, A., Thiele, O. (1998), A branch & bound algorithm for the resource-constrained project scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 107, 272-288.
- Brucker, P., Drexel, A., Möhring, R., Neumann, K., Pesch, E. (1999), "Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods", *European Journal of Operational Research*, 112, 3-41.
- Chapman, C., Ward, S. (1997), *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insight*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Cooper, D.F. (1976), "Heuristics for scheduling resource-constrained projects: An experimental investigation", *Management Science*, 22, 1186-1194.
- Davis, E.W., Patterson, J.H. (1975), "A comparison of heuristic and optimum solutions in resource-constrained project scheduling", *Management Science*, 21, 944-955.

- Dayanand, N., Padman, R. (1994), "A simulated annealing approach for scheduling payments in projects", Çalışma Raporu, The Heinz School, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.
- Dayanand, N., Padman, R. (1995), "Project contracts and payment schedules: The client's problem", Çalışma Raporu, The Heinz School, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.
- Dayanand, N., Padman, R. (1997), "On modelling payments in projects", *Journal of the Operational Research Society*, 48, 906-918.
- De Reyck, B., Herroelen, W.S. (1995), "Assembly line balancing by resource-constrained project scheduling – A critical appraisal", Çalışma Raporu 9505, Katholieke Universiteit Leuven, Belçika.
- De Reyck, B., Demeulemeester, E., Herroelen, W.S. (1999), "Algorithms for projects with generalized precedence relations", *J. Weglarz içinde*, 77-15.
- De Wit, J., Herroelen, W.S. (1990), "An evaluation of microcomputer-based software packages for project management", *European Journal of Operational Research*, 49, 102-139.
- Dean, B.V., Denzler, D.R., Watkins, J.J. (1992), "Multiproject staff scheduling with variable resource constraint", *IEEE Transactions on Engineering Management*, 39, 59-72.
- Demeulemeester, E.L., Herroelen, W.S. (1992), "A branch and bound procedure for the multiple resource-constrained project scheduling problem", *Management Science*, 38, 1803-1818.
- Demeulemeester, E.L., Herroelen, W.S. (1996), "Modelling setup times, process batches and transfer batches using activity network logic", *European Journal of Operational Research*, 89, 355-365.
- Demeulemeester, E.L., Herroelen, W.S. (1997), "New benchmark results for the resource-constrained project scheduling problem", *Management Science*, 43, 1485-1492.
- Demeulemeester, E.L., Dodin, B., Herroelen, W.S. (1993), "A random activity network generator", *Operations Research*, 41, 972-980.
- Doersch, R.H., Patterson, J.H. (1977), "Scheduling a project to maximize its present value: A zero-one programming approach", *Management Science*, 23, 882-889.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, A. (1996), "The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 26, 1-13.
- Dorndorf, U., Pesch, E. (1995), "Evolution based learning in a job shop scheduling environment", *Computers and Operations Research*, 2, 25-40.
- Drexl, A. (1991), "Scheduling of project networks by job assignment", *Management Science*, 37, 1590-1602.
- Drexl, A., Grünewald, J. (1993), "Nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling", *IEEE Transactions*, 25, 5, 74-81.
- Drexl, A., Juretzka, J., Salewski, F., Schirmer, A. (1999), "New modelling concepts and their impact on resource-constrained project scheduling", *J. Weglarz içinde*, 413-432.
- Dumond, J. (1992), "In a multi-resource environment how much is enough?", *International Journal of Production Research*, 3, 411-431.
- Dumond, J., Mabert, V.A. (1988), "Evaluating project scheduling and due date assignment procedures: An experimental analysis", *Management Science*, 34, 101-118.
- Dyckhoff, H. (1990), A typology of cutting and packing problems, *European Journal of Operational Research*, 44, 145-159.
- Elmaghraby, S.E. (1977), *Activity Networks: Project Planning and Control by Network Models*, Wiley, New York.
- Erbaşı, A., Sepil, C. (1999), "A modified heuristic procedure for materials management in project networks", *International Journal of Industrial Engineering*, 6, 132-140.
- Erenguc, S.S., Icmeli-Tukel, O. (1999), "Integrating quality as a measure of performance in resource-constrained project scheduling problems", *J. Weglarz içinde*, 433-450.

- Fischer, M.L. (1980), "Worst-case analysis of heuristic algorithms", *Management Science*, 2, 1-17.
- French, S. (1982), *Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job-Shop*, Wiley, New York.
- Garey, M.R., Johnson, D.S., Sethi, R. (1976a), "The complexity of flowshop and jobshop scheduling", *Mathematics of Operations Research*, 1, 117-129.
- Garey, M.R., Graham, R.L., Johnson, D.S., Yao, C.C. (1976b), "Resource constrained scheduling as generalized bin packing", *Journal of Combinatorial Theory*, 21, 257-298.
- Glover, F. (1989), "Tabu search – Part I", *ORSA Journal on Computing*, 1, 190-206.
- Glover, F. (1989), "Tabu search – Part II", *ORSA Journal on Computing*, 1, 190-206.
- Goldberg, D.J. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Golden, B.L., Steward, W.L. (1985), "Empirical analysis of heuristics", Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnooy Kan, A.H.G., Shmoys, D.B. (editörler), *The Travelling Salesman Problem*, Wiley, New York, 207-249.
- Grabowski, J., Janiak, A. (1987), "Job-shop scheduling with resource-time models of operations", *European Journal of Operational Research*, 28, 58-73.
- Grinold, R.C., "The payment scheduling problem", *Naval Research Logistics Quarterly*, 9, 123-136, 1972.
- Hartmann, S. (1997), "Project scheduling with multiple modes: A genetic algorithm", Çalışma Raporu 435, Manuskripte aus den Institut für Betriebswirtschaftslehre der Universitaet Kiel, Almanya.
- Hartmann, S. (1998), "A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling", *Naval Research Logistics*, 45, 733-750.
- Hartmann, S. (1999a), *Project Scheduling under Limited Resources. Models, Methods, and Applications*, Springer Verlag, Berlin.
- Hartmann, S. (1999b), "Packing problems and project scheduling models: An integrating perspective", Çalışma Raporu 509, Manuskripte aus den Institut für Betriebswirtschaftslehre der Universitaet Kiel, Almanya.
- Hartmann, S., Drexl, A. (1998), "Project scheduling with multiple modes: A comparison of exact algorithms", *Networks*, 3, 283-297.
- Hartmann, S., Kolisch, R. (2000), "Experimental evaluation of the state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 127, 394-407.
- Herrmann, J.W., Lee, C.-Y., Hinchman, J. (1995), "Global job shop scheduling with a genetic algorithm", *Production and Operations Management*, 4, 30-45.
- Herroelen, W.S., P. Van Dommelen, E.L. Demeulemeester (1997), "Project network models with discounted cash flows: A guided tour through recent developments", *European Journal of Operational Research*, 100, 97-121.
- Herroelen, W.S., De Reyck, B., Demeulemeester, E.L. (1998), "Resource-constrained project scheduling: A survey of recent developments", *Computers and Operations Research*, 25, 279-302.
- Herroelen, W.S., Demeulemeester, E.L., De Reyck, B. (1999), "A classification scheme for project scheduling", J. Weglarz (1999) içinde, 147-178.
- Holland, J.H. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
- Hopfield, J.J., Tank, D.W. (1985), "Neural computation of decisions in optimization problems", *Biological Cybernetics*, 52, 141-152.
- Icmeli, O., Erenguc, S.S. (1994), "A tabu search procedure for the resource constrained project scheduling problem with discounted cash flows", *Computers and Operations Research*, 21, 841-853.

- Icmeli, O., Erenguc, S.S. (1996), "A branch and bound procedure for the resource constrained project scheduling problem with discounted cash flows", *Management Science*, 42, 1395-1408.
- Icmeli-Tukel, O., Rom, W.O. (1997), "Ensuring quality in resource constrained project scheduling", *European Journal of Operational Research*, 103, 483-496.
- Johnson, D.S., Demers, A., Ullman, J.D., Garey, M.R., Graham, R.L. (1974), "Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms", *SIAM Journal on Computing*, 3, 299-325.
- Kazaz, B., Sepil, C. (1996), "Project scheduling with discounted cash flows and progress payments", *Journal of the Operational Research Society*, 47, 1262-1272.
- Kelley, J.E., Jr. (1961), "Critical path planning and scheduling: Mathematical basis", *Operations Research*, 9, 296-320.
- Kelley, J.E., Jr. (1963), "The critical-path method: Resources planning and scheduling", Muth, J.F. ve Thompson, G.L. (editörler), *Industrial Scheduling*, Prentice Hall, New Jersey, 347-365.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, Jr., C.D., Vecchi, M.P. (1983), "Optimization by simulated annealing", *Science*, 220, 671-680.
- Kohli, R., Park, H. (1989), "A cooperative game theory model of quantity discounts", *Management Science*, 35, 693-707.
- Kohli, R., Park, H. (1994), "Coordinating buyer-seller transactions across multiple products", *Management Science*, 40, 1145-1150.
- Kolisch, R. (1995), *Project Scheduling under Resource Constraints*, Physica-Verlag, Heidelberg.
- Kolisch, R. (1996a), "Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation", *European Journal of Operational Research*, 90, 320-333.
- Kolisch, R. (1996b), "Efficient priority rules for the resource-constrained project scheduling problem", *Journal of Operations Management*, 14, 179-192.
- Kolisch, R., Sprecher, A. (1996a), "PSPLIB - A project scheduling problem library", *European Journal of Operational Research*, 96, 205-216.
- Kolisch, R., Drexl, A. (1996b), "Adaptive search for solving hard project scheduling problems", *Naval Research Logistics*, 43, 23-40.
- Kolisch, R., Padman, R. (1997), "An integrated survey of project scheduling", Manuskripte aus den Institut für Betriebswirtschaftslehre 463, Universitaet Kiel, Almanya.
- Kolisch, R., Hartmann, S. (1999), "Heuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem: Classification and computational analysis", J. Weglarz (1999) içinde, 147-178.
- Kolisch, R., Sprecher, A., Drexl, A. (1995), "Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems", *Management Science*, 41, 1693-1703.
- Kolisch, R., Schwindt, C., Sprecher, A. (1999), "Benchmark instances for project scheduling problems", J. Weglarz içinde, 197-212.
- Kurtulus, I.S., Davis, E.W. (1982), "Multi-project scheduling: Categorization of heuristic rule performance", *Management Science*, 2, 161-172.
- Kurtulus, I.S., Narula, S.C. (1985), "Multi-project scheduling: Analysis of project performance", *IIE Transactions*, 17, 58-66.
- Lawrence, S.R., Morton, T.E. (1993), "Resource-constrained multi-project scheduling with tardy costs: Comparing myopic, bottleneck and resource pricing heuristics", *European Journal of Operational Research*, 64, 168-187.
- Lee, J.-K., Kim, Y.D. (1996), "Search heuristics for resource-constrained project scheduling", *Journal of the Operational Research Society*, 47, 678-689.
- Leon, V.J., Ramamoorthy, B. (1995), "Strength and adaptability of problem-space based neighborhoods for resource-constrained scheduling", *OR Spektrum*, 17, 173-182.

- Li, K.Y., Willis, R.J. (1992), "An iterative scheduling technique for resource-constrained project scheduling", *European Journal of Operational Research*, 56, 370-379.
- Lova, A., Tormos, P. (2000), "Analysis of scheduling schemes and heuristic rules performance in resource-constrained multiproject scheduling:", basılmak üzere kabul edildi, *Annals of Operations Research*.
- Lova, A., Maroto, C., Tormos, P. (2000), "A multicriteria heuristic method to improve resource allocation in multiproject scheduling", *European Journal of Operational Research*, 127, 408-424.
- Malcolm, D.G., Roseboom, J.H., Clark, C.E., Fazar, W. (1959), "Applications of a technique for research and development program evaluation", *Operations Research*, 7, 646-669.
- Maniezzo, V., Mingozzi (1999), "A heuristic procedure for the multi-mode project scheduling problem based on Benders' decomposition", J. Weglarz içinde, 179-196.
- Maroto, C., Tormos, P., Lova, A. (1999), "The evolution of software quality in project scheduling", J. Weglarz içinde, 239-259.
- Mori, M., Tseng, C.C., (1997) "A genetic algorithm for multi-mode resource constrained project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 100, 134-141.
- Mingozzi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S., Bianco, L. (1998), "An exact algorithm for project scheduling with resource constraints based on a new mathematical formulation", *Management Science*, 4, 714-729.
- Nabrzycki, J., Weglarz, J. (1999), "Knowledge-based multiobjective project scheduling problems", J. Weglarz içinde, 383-411.
- Norbis, M.I., Smith, J.M. (1988), "A multiobjective multi-level heuristic for dynamic resource-constrained project scheduling", *European Journal of Operational Research*, 3, 30-41.
- Oğuz, O., Bala, H. (1994), "A comparative study of computational procedures for the resource constrained project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 72, 406-416.
- Özdamar, L. (1991), *Local Constraint Based Analysis in Resource-Constrained Project Scheduling*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Özdamar, L. (1999), "A genetic algorithm approach to a general category project scheduling problem", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Part C: Applications and Reviews, 29, 1, pp. 44-59.
- Özdamar, L., Ulusoy, G. (1994), "A local constraint based analysis approach to project scheduling under general resource constraints", *European Journal of Operational Research*, 79, 287-298.
- Özdamar, L., Ulusoy, G. (1995), "A survey on the resource-constrained project scheduling problem", *IIE Transactions*, 27, 574-586.
- Özdamar, L., Ulusoy, G. (1996a), "An iterative local constraint based analysis for solving the resource-constrained project scheduling problem", *Journal of Operations Management*, 14, 193-208.
- Özdamar, L., Ulusoy, G. (1996b), "A note on an iterative forward/backward scheduling technique with reference to a procedure by Li and Willis", *European Journal of Operational Research*, 89, 400-407
- Özdamar, L., Ulusoy, G., Bayyigit, M. (1998), "A heuristic treatment of tardiness and net present value criteria in resource constrained project scheduling", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 28, 805-824.
- Padman, R., Smith-Daniels, D.E., Smith-Daniels, V.L. (1997), "Heuristic scheduling of resource-constrained projects with cash flows", *Naval Research Logistics*, 44, 364-381.
- Patterson, J.H. (1984), "A comparison of exact approaches for solving multiple constrained resource project scheduling problem", *Management Science*, 3, 854-867.
- Patterson, J.H., Huber, W.D. (1974), "A horizon varying, zero-one approach to project scheduling", *Management Science*, 2, 990-998.
- Patterson, J.H., Roth, G.W. (1976), "Scheduling a project under multiple resource constraints: a zero-one programming approach", *AIIE Transactions*, 8, 449-455.

- Patterson, J.H., Slowinski, R., Talbot, F.B., Weglarz, J., (1989), "An algorithm for a general class of precedence and resource constrained scheduling problem", R. Slowinski ve J. Weglarz içinde.
- Patterson, J.H., Talbot, F.B., Slowinski, R., Weglarz, J., (1990), "Computational experience with a backtracking algorithm for solving a general class of precedence and resource constrained scheduling problems" *European Journal of Operational Research*, 49, 68-79.
- Pritsker, A.A.B., Watters, L.J., Wolfe, P.M. (1969), "Multiproject scheduling with limited resources: a zero-one programming approach", *Management Science*, 16, 93-107.
- Ray, M., Rinzler, A. (1993), *The New Paradigm in Business*, Tarcher/Perigee Books, New York.
- Russell, A.H., "Cash flows in networks", *Management Science*, 16, 357-373, 1970.
- Russell, R.A. (1986), "A comparison of heuristics for scheduling projects with cash flows and resource restrictions", *Management Science*, 32, 1291-1300.
- Sampson, S.E., Weiss, E.N. (1993), "Local search techniques for the generalized resource constrained project scheduling problem", *Naval Research Logistics*, 40, 365-375.
- Schirmer, A. (1998), "Case-based reasoning and improved adaptive search for project scheduling", Manuskript aus den Instituten der Betriebswirtschaftslehre 472, Universitaet Kiel, Almanya.
- Schrage, L. (1970), "Solving resource-constrained network problems by implicit enumeration – nonpreemptive case", *Operations Research*, 18, 263-278.
- Sivrikaya-Şerifoğlu, F. (1997), *A New Uniform Order-Based Crossover Operator for Genetic Algorithm Applications to Multi-Component Combinatorial Optimization Problems*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Sivrikaya-Şerifoğlu, F., Ulusoy, G., Şahin, Ş. (2000), "Kaynak kısıtlı proje çizelgelemede indirgenmiş nakit akışı maksimizasyonu için bir genetik algoritma yaklaşımı", *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 11, 2, 2-12.
- Slowinski, R. (1981), "Multiobjective network scheduling with efficient use of renewable and nonrenewable resources", *European Journal of Operational Research*, 7, 265-273.
- Slowinski, R. (1989), "Multiobjective project scheduling under multiple category resource constraints", R. Slowinski ve J. Weglarz içinde, 151-167.
- Slowinski, R., Weglarz, J. (Editörler) (1989), *Advances in Project Scheduling*, Elsevier, Amsterdam.
- Slowinski, R., Soniewicki, B., Weglarz, J. (1994), "DSS for multiobjective project scheduling", *European Journal of Operational Research*, 79, 220-229.
- Smith-Daniels, D.E., Aquilano, N.J. (1984), "Constrained resource project scheduling subject to material constraints", *Journal of Operations Management*, 4, 369-387.
- Smith-Daniels, D.E., Aquilano, N.J. (1987), "Using a late-start resource-constrained project schedule to improve project net present value", *Decision Sciences*, 18, 617-630.
- Smith-Daniels, D.E., Smith-Daniels, V.L. (1987), "Optimal project scheduling with materials ordering", *IIE Transactions*, 19, 122-129.
- Sprecher, A. (1994), *Resource-constrained Project Scheduling: Exact Methods for the Multi-mode Case*, No. 409 in Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer Verlag, Berlin.
- Sprecher, A. (1999), "A competitive exact algorithm for assembly line balancing", basılmak üzere kabul edildi, *International Journal of Production Research*.
- Sprecher, A., Drexl, A. (1998), "Multi-mode resource-constrained project scheduling by a simple, general and powerful sequencing algorithm", *European Journal of Operational Research*, 107, 431-450.
- Sprecher, A., Hartmann, S., Drexl, A. (1997), "An exact algorithm for project scheduling with multiple modes", *OR Spektrum*, 1, 195-203.
- Stinson, J.P., Daves, E.W., Khumawala, B.M. (1978), "Multiple resource-constrained scheduling using branch and bound", *AIIE Transactions*, 10, 252-259.

- Storer, R.H., Wu, S.D., Vaccari, R. (1992), "New search spaces for sequencing problems with application to job shop scheduling", *Management Science*, 38, 1495-1509.
- Talbot, F.B. (1982), "Resource-constrained project scheduling with time-resource tradeoffs. The nonpreemptive case", *Management Science*, 28, 1197-1210.
- Talbot, F.B., Patterson, J.H. (1978), "An efficient integer programming algorithm with network cuts for solving resource-constrained scheduling problems", *Management Science*, 24, 1163-1174.
- Thomas, P.R., Salhi, S. (1998), "A tabu search approach for the resource-constrained project scheduling problem", *Journal of Heuristics*, 4, 123-139.
- Tsubakitani, S., Deckro, R.F. (1990), "A heuristic for multi-project scheduling with limited resources in the housing industry", *European Journal of Operational Research*, 49, 80-91.
- Ulusoy, G., Özdamar, L. (1989), "Heuristic performance and network/resource characteristics in resource-constrained project scheduling", *Journal of Operational Research Society*, 40, 114-1152.
- Ulusoy, G., Özdamar, L. (1995), "A heuristic scheduling algorithm for improving the duration and net present value of a project", *International Journal of Operations & Production Management*, 15, 89-98.
- Ulusoy, G., Özdamar, L. (1996), "A framework for an interactive project scheduling system under limited resources", *European Journal of Operational Research*, 90, 362-375.
- Ulusoy, G., Cebelli, S. (2000), "An equitable approach to the payment scheduling problem in project management", *European Journal of Operational Research*, 127, 262-278.
- Ulusoy, G., Sivrikaya-Şerifoğlu, F., Şahin, Ş. (2000), "Four payment models for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem with discounted cash flows", basılmak üzere kabul edildi, *Annals of Operations Research*.
- Vanhoucke, M., Demeulemeester, E., Herroelen, W. (2000a), "A new random network generator for activity-on-the-node networks", *Proceedings of the Seventh Workshop on Project Management and Scheduling*, 290-293, Osnabrück, Almanya.
- Vanhoucke, M., Demeulemeester, E., Herroelen, W. (2000b), "An exact procedure for the resource-constrained weighted earliness-tardiness project scheduling problem", basılmak üzere kabul edildi, *Annals of Operations Research*.
- Viana, A., de Sousa, J. P. (2000), "Using metaheuristics in multiobjective resource constrained project scheduling", *European Journal of Operational Research*, 120, 359-374.
- Yang, K.K., Talbot, F.B., Patterson, J.H. (1992), "Scheduling a project to maximize its net present value: An integer programming approach", *European Journal of Operational Research*, 64, 188-198.
- Weglarz, J. (Editör) (1999), *Project Scheduling – Recent Models, Algorithms and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Wiest, J.D. (1967), "A heuristic model for scheduling large projects with limited resources", *Management Science*, 13, B359-B377.
- Zhu, D., Padman, R. (1996), "Tabu search for scheduling resource-constrained projects with cash flows", Çalışma Raporu, The Heinz School, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.
- Zhu, D., Padman, R. (1997), "A multiheuristic combination model for scheduling resource-constrained projects with cash flows", Çalışma Raporu, The Heinz School, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.