

**KAYNAK KISITLI PROJE ÇİZELGELEMEDE
İNDİRGENMİŞ NAKİT AKIŞI MAKSİMİZASYONU İÇİN
BİR GENETİK ALGORİTMA YAKLAŞIMI**

Funda Sivrikaya Şerifoğlu

Abant İzzet Baysal Üniversitesi
İşletme Bölümü, Gölyaka Mevkii, Bolu

Tel. 374 2534511; Fax. 374 2534521; e-posta fss@ibu.edu.tr

Gündüz Ulusoy

Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Orhanlı, 81474 Tuzla, İstanbul

Tel. 216 483 95 03; Fax 216 483 95 50; e-posta gunduz@sabanciuniv.edu

Şule Şahin

Boğaziçi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
Bebek, 80815 İstanbul

Endüstri Mühendisliği Dergisi, 11, 2, 2-12, 2000

ÖZET

Bu çalışmada kaynak kısıtlı proje çizelgelemede indirgenmiş nakit akışını ençoklamak için geliştirilen bir genetik algoritma sunulmaktadır. Problem hem yenilenebilir hem de yenilenemez kaynaklar göz önüne alınarak tanımlanmaktadır. Kaynakların uygulanmasında sonlu sayıda mod söz konusudur. Genetik algoritmada, çok-bileşenli, düzgün, sıralama temelli bir çaprazlama operatörü kullanılmıştır. Bu çaprazlama operatörünün öncüllük kısıtlarını ihlal etmeyişi önemli bir avantaj sağlamaktadır. Genetik algoritmanın parametrelerinin saptanması için bir meta-seviye genetik algoritma uygulanmıştır. Önerilen algoritmanın sınanması için teknik yazında mevcut 93 problemlik bir test problem kümesi kullanılmıştır. Ayrıca, salt yenilenebilir kaynaklar problemi için, özel amaçlı bir algoritma ile karşılaştırma yapılmış ve önerilen algoritmanın özellikle büyük boyutlu problemlerde başarılı olduğu gösterilmiştir.

ABSTRACT

In this paper, a genetic algorithm (GA) is presented to maximize the discounted cash flow in multi-mode resource constrained project scheduling problem. The problem is defined to include both renewable and nonrenewable resources. A multi-component uniform order-based crossover operator (MCUOX) is employed. An advantage of MCUOX is that it does not violate precedence constraints. A meta-GA is employed to determine the parameters of the GA. A set of 93 problems from the literature is used to test the GA. Furthermore, for the problem with only renewable resources present, the GA approach is compared with a domain specific heuristic and is shown to outperform it especially for large size problems.

1.GİRİŞ

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi (KKPÇP), öncüllük ve kaynak kısıtları altında proje süresini enazlamaya çalışan faaliyet çizelgeleme problemidir. Problem, birden fazla termin zamanı verilmiş proje içeriyorsa zamana bağlı başka performans ölçütleri, örneğin ortalama tamamlanma süresi veya ortalama geç kalma süresi ölçütü de kullanılabilir. KKPÇP'nin NP-hard olduğu ispatlanmıştır (Blazewicz vd., 1983).

Kaynaklar kullanım ile tüketilip tüketilemediklerine göre sınıflandırılırlar (Shtub, Bard ve Globerson, 1994). Her zaman diliminde sabit bulunan tüketilemez kaynaklara yenilenebilir kaynaklar denmektedir, örneğin sabit işgücü gibi. Projenin başında toplu olarak elde bulunan ve proje süresince tüketilen kaynaklar, CPU zamanı gibi, ise yenilenemez kaynaklar olarak adlandırılmaktadır. Yenilenemez kaynaklar proje bütününde kısıtlı olabildiği gibi her zaman diliminde de kısıtlı olabilir. Hem zaman dilimlerinde hem de proje bütününde kısıtlı olan kaynaklara çift yönlü kısıtlı kaynaklar denilmektedir. Nakit para, çift yönlü kısıtlı kaynaklara örnek olarak verilebilir.

Yakın zamana kadar KKPÇP üzerinde yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu, her faaliyetin belli kaynak kullanımları altında süresinin sabit olduğunu varsaymaktadır. Daha gerçekçi formülasyonlarda, faaliyetin süresi ek bir maliyetle daha fazla kaynak tahsis edilmek suretiyle kısaltılabilmektedir. Bu süre-kaynak ikilileri faaliyetin modları olarak adlandırılmaktadır. Bir faaliyetin modları, o faaliyet için geçerli zaman-maliyet ilişkisini temsil etmektedir ve modların varlığı problemin karmaşıklığını artırır.

KKPÇP'nin önemli bir uzantısı da indirgenmiş nakit akışlı kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemidir (İNAKKPÇP). Bu problemler maliyetleri de içermektedir. Nakit hareketleri 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 net bugünkü değerinin (NBD'inin) ençoklanmasıdır.

Özdamar ve Ulusoy (1995) kısıtlı kaynaklı proje çizelgeleme problemi üzerinde bir kaynak taramasını yapmıştır. Bu tarama; araştırmaların, tek ve çok projeli modelleri, kesikli ve sürekli zaman-kaynak işlevli, zamana bağlı ve maliyete dayalı amaçlı, ve çeşitli tipteki kısıtları (sadece öncüllük kısıtlarının olduğu, öncüllük ve çift yönlü kısıtlı kaynaklı, yenilenebilir kaynaklı ve yenilenemez kaynaklı kısıtların olduğu) içeren geniş bir problem yelpazesini kapsadığını ortaya çıkarmıştır. Hem eniyileme hem de sezgisel yaklaşımlar incelenmiştir.

Bu taramada gösterildiği gibi, proje süresinin kısaltılması ve NBD'inin ençoklanması bu konuda en çok vurgulanan amaçlardır. NBD kriterini içeren modellerde genellikle projenin bir termini olduğu ve/veya projenin sonunda büyük bir pozitif nakit akışı olduğu varsayılmaktadır. Aksi takdirde negatif nakit akışı içeren faaliyetler NBD'in ençoklanmasını sağlamak için sonsuza kadar ertelenecektir (Elmaghraby ve Herroelen, 1990). Bu varsayımlar altında, proje süresinin enazlanması ve NBD'in ençoklanması birbirini desteklemektedir. Burada sunulan İNAKKPÇP bu varsayımların ikisi ile uyumludur.

Burada incelenen İNAKKPÇP'nin ayrıntılı tanımı 2. bölümde verilmektedir. Genetik algoritma yaklaşımı 3. bölümde sunulmaktadır. 4. bölümde sayısal analiz sonuçları incelenmekte, 5. bölümde yenilenemez kaynakların probleme katılması çalışması ele alınmakta ve son bölümde ise sonuçlar ve öneriler verilmektedir.

2. PROBLEM TANIMI VE TEKNİK YAZIN ARAŞTIRMASI

Bu makalede incelenen İNAKKPÇP'nin tanımı şu şekildedir: N faaliyetli tek bir proje ve bir yenilenebilir kaynaklar kümesi verilmiştir. Öncüllük kısıtları faaliyet sıralamasına göre verilmiştir. Faaliyetlerin bölünmesine izin verilmemiştir. Her bir zaman diliminde yenilenebilir kaynakların elde bulunması ile ilgili kaynak kısıtları bulunmaktadır. Bir faaliyetin süresi boyunca kaynak kullanımının aynı kaldığı kabul edilmiştir. Her faaliyete ilişkin zaman-maliyet ilişkisini temsil eden modları vardır. Her bir kaynağa ilişkin bir kullanım maliyeti bulunmaktadır. Nakit çıkışları (NA_j^-) her j faaliyetinin başlangıcında meydana gelmekte ve projenin bitiminde toplu bir tek nakit girişi (TNG) olmaktadır. Veri üretme işleminde, bu toplu nakit girişi, proje süresinin enazlanması probleminin çözülmesi sonucunda elde edilen maliyetlerin proje sonundaki net değerinin r iskonto oranı ile hesaplanması ve bunun 1.3 katı alınması ile belirlenmiştir. Böyle bir katsayı ile çarpılmasının nedeni, bu çalışmada elde edilecek NBD'lerinin negatif olmasını engellemektir. Projelerde termin verisi, proje süresinin hiç bir kaynak kısıtı olmadan bulunan en küçük değerinin iki katı olarak belirlenmiştir. Faaliyetler, proje süresinin verilen terminini (T) geçmeyecek şekilde çizelgelenmekte ve aşağıda verilen ifadedeki gibi hesaplanan bütün nakit akışlarının NBD'i ençoklanmaktadır:

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

Burada, BZ_j faaliyet j 'nin başlama zamanıdır. NA_j^- verisi şu şekilde elde edilmiştir: İlk olarak, j . faaliyet için her bir kaynaktan gereken miktarlar o kaynağın birim maliyeti ile

çarpılarak bütün kaynaklar için bulunan sonuçlar toplanmış; böylelikle birim zamana karşılık gelen toplam maliyet bulunmuştur. Sonra, o faaliyetin süresine bağlı olarak NA_j yi elde etmek için, j . faaliyetin süresi ile çarpılmıştır.

Bu problemi içeren çalışmaların yoğun bir incelemesi, yukarıda bahsedilen Özdamar ve Ulusoy (1995) makalesinde verilmiştir. Bu problem için yeni algoritmalar ise Li ve Willis'in (1992) iteratif algoritması ve Ulusoy ve Özdamar'ın (1995) iteratif yerel kısıt temelli analiz (LCBA) yöntemidir.

Li ve Willis (1992) makalesinde, başlangıç çıkışlı çizelgeleme (*forward scheduling*) ve bitiş çıkışlı çizelgeleme (*backward scheduling*) 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. Bu nedenle bitiş çıkışlı çizelgeleme tekniği faaliyetlere ilişkin nakit çıkışlarını erteler ve bu nakit çıkışları ile ödemeler (proje yürürken veya bitiminde) arasındaki zamanı azaltır. Bu, ödünç alınan fonların faiz ödemelerini düşürür ve projenin NBD'ini artırır. Fakat bitiş çıkışlı çizelgeleme tekniğinin de dezavantajları bulunmaktadır. 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 (bu da maliyetlerin finansından elde edilecek tasarrufların uzun proje süresinden doğacak maliyetlerden az olmasına neden olabilmektedir). Faaliyetlerin mümkün olduğu kadar geç çizelgenmesi 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. Li ve Willis başlangıç çıkışlı ve bitiş çıkışlı çizelgeleme tekniklerinin avantajlarını birleştirmeye çalışan iteratif bir algoritma önermişler ve böylece hem kısa süreli hem de düşük maliyetli projeler elde etmişlerdir.

LCBA yöntemi de (Özdamar, 1991) hem kısa süreli hem de düşük maliyetli projelere ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu teknik, her çizelgeleme anında faaliyetlerin kısıtlarını yeniden değerlendirir. Bu kısıtlar, kaynakların sınırlı olmasından kaynaklanan kaynak kısıtları ve öncüllük ilişkilerinden kaynaklanan kısıtlardır. Her kısıtlama 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 atanmamaları halinde proje 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 çizelgenmesinden sonra hâlâ yeterli kaynak varsa, çizelgelenebilir faaliyetler kümesinden dışlanmamış faaliyetler çizelgenmek üzere ele alınır. LCBA yönteminin çok modlu KKPÇP'ne uygulaması Özdamar ve Ulusoy (1994) tarafından verilmiştir.

Ulusoy ve Özdamar (1995), LCBA yönteminin performansını bazı iyi karar kuralları ve Li ve Willis'in algoritması ile karşılaştırmıştır. LCBA ve diğer karar kuralları öncelikle tek geçişli sezgisel yöntem olarak kullanılmış, sonra da iteratif bir sürece konulmuştur. Çalışmada, bütün karar kurallarının iteratif sürece katıldığında daha iyi sonuçlar verdiği, özellikle LCBA

performansının iteratif bir sürece katılmakla üç kat arttığı gözlemlenmiştir. Karşılaştırmalar iteratif LCBA yönteminin Li ve Willis'in algoritmasının da içinde bulunduğu diğer yaklaşımlardan çok daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu nedenle bu çalışmada, genetik algoritma (GA) yaklaşımı iteratif LCBA yöntemi ile karşılaştırılacaktır.

Ayrıca sonuçlar, proje süresinin enazlanması ve NBD'inin ençoklanması amaçlarından bir tanesinin iyileşmesinin diğerinin de iyileşmesi anlamına gelmekte olduğunu göstermektedir. Bu iki kriter arasındaki bu karşılıklı destek ayrıca Smith-Daniels ve Aquilano (1987) tarafından da gösterilmiştir.

3. GENETİK ALGORİTMA YAKLAŞIMI

Bir önceki bölümde tanımlanan İNAKKPÇP çok bileşenli kombinatoral eniyileme problemlerinin sıralama ve seçme bileşenlisine (ÇBKOP_SS) bir örnek oluşturmaktadır. ÇBKOP_SS, bir sıralama bileşeni ve bir veya birden fazla seçme bileşeni olan kombinatoral eniyileme problemleri tanımlamaktadır. Çizelgeleme, devre ve serim tasarımı ve araç turu gibi çeşitli alanlardan problemleri de içeren geniş bir problem kümesini içine almaktadır. Örneğin, tipik bir çizelgeleme probleminde, işlerin sıralanması ve her iş için bir veya birden fazla mevcut kaynaklar seçilmesi gerekmektedir (Sivrikaya-Şerifoğlu, 1997).

İNAKKPÇP'nde faaliyetler sıralanmaktadır. Seçim problemi ise, her bir faaliyet için mümkün olan modlarından birinin seçilmesidir. Buradaki ek zorluk, faaliyetlerin sıralanmasında öncüllük ilişkilerinin de bir kısıt olarak yer almasıdır.

Genetik algoritmalar (GA'lar); doğal evrimin benzetimini yapan yapay uyum sağlama sistemleri olarak John Holland (1975) tarafından geliştirilmiştir. Bunlar güçlü araştırma algoritmaları olarak kendilerini ispatlamışlar ve çeşitli alanlarda zor problemlerle başa çıkmak için kullanılmışlardır. Genetik algoritmaların asıl etkisi, çok çeşitli problemlerde başarıyla uygulanabilmesidir. Buna paralel olarak, bu çalışmada kullanılan GA, ÇBKOP_SS'in bütün örneklerinde uygulanabilen genel bir GA yaklaşımıdır.

Kısaca özetlenirse, GA'lar, birden fazla (nüfus sayısı kadar) çözüm üzerinde çalışırlar. Çözümler, problemin yapısına uygun bir şekilde kodlanmış kromozomlar tarafından temsil edilirler. Uygunluk işlevi, kromozomların ifade ettikleri çözümlerin ne derece iyi olduğunu tanımlar. Uygunluk bazlı seçme, çaprazlama ve mutasyon gibi başlıca operatörler, belli olasılıklar altında çalışarak, eldeki kuşağa ait kromozomlardan yeni bir kuşak yaratır. İstenen sayıda kuşak yaratıldığında veya başka bir durma kriteri doğrulandığında bir GA koşumu tamamlanmış olur. GA koşumu, tekrar sayısı kadar tekrarlanır ve tüm koşumlarda yaratılan en iyi çözüm problemin çözümü olarak alınır. Goldberg (1989), GA'lar hakkında iyi bir giriş kitabı sunmuştur.

Teknik yazında KKPÇP için çeşitli GA yaklaşımları sunulmuştur. Lee and Kim (1996), tabu tanımlayarak arama (*tabu search*), tavlama benzetimi (*simulated annealing*) ve GA yaklaşımları kullanarak sadece yenilenebilir kaynaklar içeren KKPÇP çözmeye çalışmıştır. Geniş sayısal analizler yaparak bu yöntemlerin Li ve Willis'in (1992) yaklaşımının da aralarında bulunduğu üç sezgisel yöntemden daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. 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 Grünwald'ın (1993) sundukları stokastik bir yaklaşımla karşılaştırarak, GA'nın daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmektedirler.

Özdamar (1999), hem yenilenebilir hem de yenilenemez kaynakların yer aldığı probleme özel bilgilerin de yer aldığı bir melez GA yaklaşımı sunmaktadır. 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.

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 yaklaşımı teknik yazında 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.

Hartmann (1998), tek modlu faaliyetler ve yenilenebilir kaynaklar içeren KKPÇP için geliştirdiği sıralama bazlı GA'nın öncelik değerleri bazlı GA yaklaşımlarından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

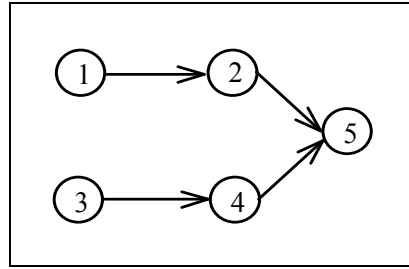
Ulusoy ve Cebelli (1999) birden çok modlu faaliyetler ve yenilenebilir kaynaklar içeren KKPÇP için finansal bir amaç denkleminde sahip bir GA yaklaşımı geliştirmişlerdir. Ele alınan problem, ödeme çizelgeleme probleminin bir uzantısıdır. Ödeme çizelgeleme probleminde, proje boyunca yükleniciye yapılacak olan ödemelerin hem miktarı hem de zamanı karar değişkenidir. Ulusoy ve Cebelli (1999) çalışması, iş sahibi ile işi yüklenicinin mutabık kalacakları hakça bir ödeme planı geliştirmek amacını güden iki döngülü bir GA yaklaşımı içermektedir.

3.1. Kromozomların Gösterimi ve Değerlendirilmesi

3.1.1. Kromozomların gösterimi

Kromozom, problemin iki bileşenini oluşturan faaliyet sıralaması ve mod seçimini içine almaktadır. Kromozomda her biri bir faaliyete karşılık gelen N tane gen bulunmaktadır. Bir gen, hem karşılık geldiği faaliyeti hem de bu faaliyet için seçilmiş mod bilgilerini içermektedir. Bu gösterim hem KKPÇP hem de İNAKKPÇP'ne uygulanabilir. Sadece amaç işlevinde bir değişiklik yapmakla bir diğerinden ötekine geçilebilmektedir.

Bunu göstermek için Şekil 1'de görünen yapıya sahip 5 faaliyetlik küçük bir örnek sunulmaktadır. Sadece bir tane yenilenebilir kaynak mevcut değeri ve birim maliyeti ile verilmektedir. Veriler Tablo 1'de listelenmektedir.



ŞEKİL 1. KKPÇP Örnek Probleminin Faaliyetlerin Düğüm Üzerine Atandığı Serimi

TABLO 1. İNAKKPÇP Örnek Probleminin Verileri

Faaliyet	Mod	Süre	Kaynak Kullanımları
1	1	3	5
	2	10	2
2	1	2	5
	2	4	4
	3	13	3
3	1	6	4
	2	15	1
4	1	2	5
	2	10	1
5	1	1	5
	2	5	4
	3	17	1

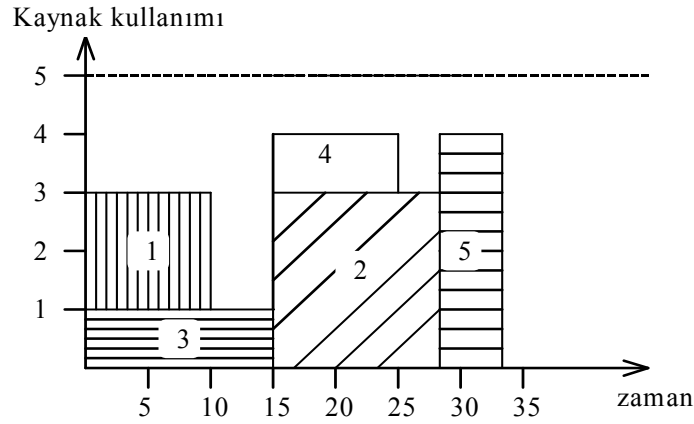
Örnek olarak, problemin potansiyel bir çözümünü temsil eden [3-2 1-2 4-2 2-3 5-2] kromozomunu seçelim. Bu kromozomda her biri bir faaliyete karşılık gelen 5 tane gen bulunmaktadır. Her bir gen iki sayı içermektedir, ilki faaliyet numarası, ikincisi ise o faaliyet için seçilmiş olan modu belirtmektedir. Bu kromozom faaliyetleri 3, 1, 4, 2 ve 5 olarak sıralayacaktır ve bu öncüllük ilişkileri bakımından olurlu bir sıralamadır. 3., 1., 4. ve 5. faaliyetler ikinci modlarında, ve 2. faaliyet de üçüncü modunda gerçekleşecektir.

3.1.2. Kromozomların değerlendirilmesi

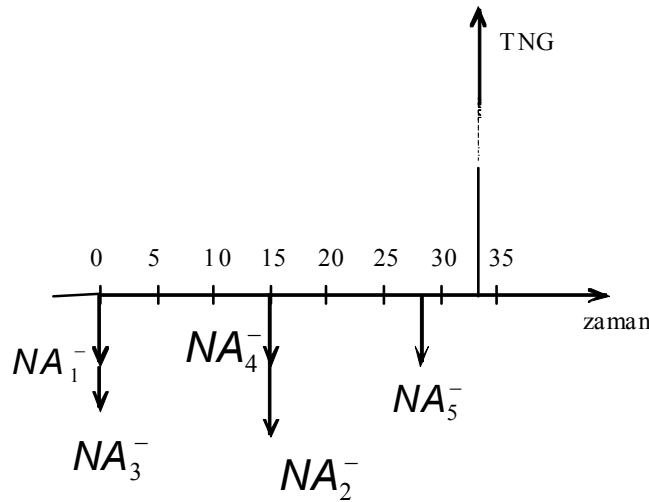
Faaliyetleri kromozomdaki sıraya göre çizelgelemek için bitiş çıkışlı çizelgeleme tekniğinin yukarıda özetlenen ve Li ve Willis'in (1992) detaylı olarak anlattığı başarısızlıklarından dolayı başlangıç çıkışlı çizelgeleme tekniği tercih edilmiştir. Basit bir çizelgeleyici, kaynakların elde bulunan miktarlarını izleyerek faaliyetleri kromozomdaki verilen sıraya göre çizelgelemektedir.

Faaliyetler çizelgelendikten sonra projenin NBD'i, oluşan nakit akış diyagramından ve ifade 1'den bulunabilir. Kromozomun uygunluk değeri NBD'ine eşit olarak alınmıştır.

Tek kaynağın birim maliyetinin 10, her zaman diliminde mevcut miktarının 5 birim, ıskonto oranının 0.005 ve toplu ödemenin 1750 olduğunu varsayarsak, örnek kromozomun kaynak kullanımı ve nakit akış diyagramı Şekil 2(a) ve (b)'de verildiği gibi olacaktır.



(a) Kaynak profili



$$NA_1^- = -200, NA_2^- = -390, NA_3^- = -150, NA_4^- = -200 \text{ ve } NA_5^- = -200 \Rightarrow NBD = +413.02$$

(b) Nakit akış diyagramı

ŞEKİL 2. Örnek Kromozomun Değerlendirilmesi [3-2 1-2 4-2 2-3 5-2]

Buradaki çizelgeleyici, ertelemez (nondelay) tipi bir çizelgeleyici değildir. Ertelemez çizelgeleyici, faaliyetleri öncelik ve kaynak kısıtlarının izin verdiği mümkün olan en erken zamanda çizelgeler. Buradaki çizelgeleyici kromozomdaki faaliyet sıralamasını bozmamakta,

başka bir deyişle kromozomdaki bir faaliyet öncelik ve kaynak kısıtlarının yanında bir de kromozomda kendinden önce gelen faaliyetlerin başlamış olmasını kısıt olarak kabul etmekte ve önceki faaliyetler başlamadan başlayamamaktadır. Böyle bir ek kısıtın getirilmiş olması kromozomdaki yapıya sadık kalma gereğidir. Böyle yapılmaması durumunda kromozom üzerindeki faaliyetler sıra değiştirebilecektir. Yer değiştirme işleminin, eğer daha iyi sonuç verecekse, dışarıdan müdahale yerine GA'nın kendi doğal süreci içinde gerçekleşmesi GA'nın mantığına daha uygundur.

Ayrıca buradaki çizelgeleyicide ek bir uygulama olarak, elde edilen kromozomun çizelgesi bir veya birden fazla faaliyetin bitiş zamanlarını temsil eden olaylar takip edilerek, faaliyetler kromozomdaki öncüllük, kaynak ve kromozomdaki sıra kısıtlarına uygun olan en geç olay zamanında bitecek şekilde çizelgelenmektedir. Bu uygulama, çizelgenin takip eden bölümlerindeki çizelgeyi değiştirmeden nakit çıkışlarını ertelediğinden, NBD'inin ençoklanması amaç işlevi ile uyum içindedir.

3.2. Operatörler

3.2.1. Çaprazlama Operatörü

Genetik algoritmanın kalbi çaprazlama operatörüdür. Burada uygulanan çaprazlama operatörü; ÇBKOP_SS'lerin örneklerindeki GA uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilmiş, genel ve güçlü bir operatör olan çok bileşenli, düzgün, sıralama temelli bir çaprazlama operatörüdür (MCUOX) (Sivrikaya-Şerifoğlu, 1997). Bu ana kadar MCUOX, iki farklı ÇBKOP_SS örneklerinde başarıyla uygulanmıştır (Ulusoy, Sivrikaya-Şerifoğlu, Bilge, 1997), (Sivrikaya-Şerifoğlu ve Ulusoy, 1999).

KKPÇP'nde MCUOX aşağıdaki gibi tanımlanabilir. Anne-baba olarak seçilen kromozomların ilk faaliyetlerinden başlamak üzere, anne- babadan biri rastgele seçilir ve daha önce ele alınmamış ilk faaliyeti çocuğun yeni faaliyeti olarak atanır. Eğer seçilen faaliyetin modu anne ve babada aynı ise bu mod çocuğun o faaliyetinin modu olarak belirlenir, aksi taktirde anne babadan birisi rastgele seçilir ve onun modu çocuğun o faaliyetinin modu olarak atanır.

MCUOX'nün en önemli avantajlarından biri öncüllük kısıtlarına uygun olarak yeni bir çocuk oluşturmasıdır. Bu uygulamada faaliyet sıralamasında öncüllük kısıtları göz önüne alındığından dolayı bu özellik çok yararlıdır. MCUOX'nün uygulanmasının öncüllük kısıtlarını bozmaması, olurlu bir çocuk yaratmak için çaprazlama operatörünün yanında bir düzeltme işlevi ihtiyacı doğmamasını sağlamaktadır.

3.2.2. Mutasyon Operatörleri

İki mutasyon operatörü kullanılmaktadır: Faaliyetler için yer transferi mutasyonu operatörü ve mod seçimi için mod mutasyonu operatörü. Yer transferi mutasyonu, kromozomda rastgele bir konum seçer ve bu konumdaki genin içeriğini rastgele seçilmiş ikinci bir konuma taşır. Mod mutasyonu ise rastgele seçilen sayılarla belirlenen mutasyon yapılacak konumdaki faaliyete, modlarından birini rastgele atar. Fakat bu atamada daha önceki modun aynısı da atanabilir ve bu da etkin mutasyon oranının belirlenen mutasyon oranından daha küçük olabileceği anlamına gelmektedir.

Yer transferi mutasyonu, üzerinde uygulandığı kromozomda, öncüllük ilişkilerine ters düşecek bir durum oluşturabilir. Bu nedenle bu operatör basit bir düzeltme işlevi ile birlikte çalışmaktadır. Rastgele seçilen ilk konumun yerinin *konum1* olduğunu ve bu konumun içeriğinin (yani faaliyet ve modunun) ikinci rastgele seçilen yere (*konum2*) taşınacağını kabul edelim. Burada iki durum bulunmaktadır: *konum1 < konum2* ve *konum2 < konum1*. *Konum1 < konum2* olduğu durumda *konum1*'deki faaliyet *konum2*'ye getirilmesi durumunda bazı ardıl faaliyetlerini de geçmiş olabilir. Bunu engellemek için *konum1*'deki faaliyetin yerini değiştirmeden önce kromozom üstünde *konum2+1*'e kadar tek tek ilerleyerek bu konumlardaki faaliyetlerin *konum1*'deki faaliyetin ardıl faaliyeti olup olmadığı kontrol edilir. Bu işlem ya ilk ardıl faaliyete rastlayana kadar ya da *konum2*'deki faaliyetin kontrol edilmesine kadar devam eder. Tarama işleminin durduğu noktadaki gene (ki bu ya ardıl faaliyetten bir önceki konum ya da *konum2*'dir) *konum1*'deki faaliyet ve modu yerleştirilir ve *konum1*'deki faaliyetin geçtiği genlerdeki içerikler sırayla bir önceki gene kaydırılır. Eğer *konum1 > konum2* ise bu durumda da *konum1*'deki faaliyet *konum2*'ye getirilirken öncül faaliyetlerini geçmiş olabilir. Bu nedenle yine kromozom üzerinde *konum1* ile *konum2-1* aralığındaki konumlardaki faaliyetler tek tek incelenerek *konum1*'deki faaliyetin öncül faaliyeti olup olmadığı kontrol edilir. İlk rastlanan öncül faaliyete veya *konum2-1*'e geldiğinde işlem biter ve *konum1*'deki faaliyet moduyla birlikte, duruma göre ya öncül faaliyetten bir sonraki konuma ya da *konum2*'ye getirilir. Geçilen konumların içerikleri de kendilerinden bir sonra gelen genlere kaydırılır. Eğer *konum1*'deki faaliyetin ardıl faaliyeti kendisinden hemen sonra veya öncül faaliyeti kendisinden hemen önce yer alıyor ise, bu düzeltme işlevi nedeniyle *konum1*'deki faaliyet kendi eski yerinde kalacak ve kromozom orijinal halini değiştirmemiş olacaktır. Bu nedenle etkin yer transferi mutasyon oranı belirlenen oranından daha küçük olacaktır.

Buradaki yer transferi mutasyon operatörü, daha yaygın kullanımı olan rastgele iki konum seçip bunların yerlerini değiştirme işlemini gerçekleştiren yer değiştirme mutasyon operatörüne tercih edilmiştir. Bunun nedeni, yer değiştirme operatörünün iki faaliyetin yerini değiştirmesi ve bu yüzden iki defa öncüllük kısıtlarını ihlal edebilecek ve iki kere düzeltme işlevine ihtiyaç duyabilecek olmasıdır. Oysa burada kullanılan yer transferi operatörü sadece *konum1*'deki faaliyetin yerini değiştirmektedir. Ayrıca, yer değiştirme operatöründe kullanılan düzeltme işlevi kromozomun içeriğinin yeniden düzenlenmesidir ve bu da GA'larda mümkün olduğu kadar kaçınılması gereken bir işlemdir.

3.3. İlk Kuşağın Oluşturulması

İlk kuşağın kromozomları bir çözüm üretici ile rastgele olarak yaratılır. Çözüm üretici ilk olarak hiç öncül faaliyeti olmayan faaliyetleri seçilebilir faaliyetler kümesine alır; diğer faaliyetler ise kalan faaliyetler kümesini oluşturur. Seçilebilir faaliyetler kümesinden bir faaliyet rastgele seçilir ve kromozomun ilk genine yerleştirilir. Bu faaliyetin modlarından biri rastgele seçilerek o genin içeriği tamamlanır. Seçilen faaliyet çizelgelenmiş faaliyetler kümesine alınır ve seçilebilir faaliyetler kümesi de yeniden oluşturulur. Bu işlem, kalan faaliyetler kümesinden bütün öncül faaliyetleri çizelgelenmiş faaliyetler kümesinde bulunan faaliyetlerin seçilebilir faaliyetler kümesine dahil edilmesi işlemidir. Yine seçilebilir faaliyetler kümesinden yeni bir faaliyet rastgele seçilir ve bu faaliyete bir mod atanarak bir sonraki gen de oluşturulur. Bütün kümeler güncellenir ve bu işlem bütün faaliyetler çizelgelenmiş faaliyetler kümesine dahil olana kadar devam eder. Böylelikle bir kromozom oluşturulur ve bu işlem belirlenen nüfus büyüklüğüne ulaşılan kadar tekrarlanır.

3. 4. Meta-Seviye Genetik Algoritma

Meta-seviye GA, İNAKKPÇP için kullanılan GA'nın parametrelerinin en uygununu seçmek için tasarlanmış ve uygulanmıştır. GA'nın parametrelerini ayarlamak için gene GA'dan faydalanma fikri Grefenstette (1986) çalışmasına dayanmaktadır. Sözü geçen çalışma, çeşitli zorluk derecelerindeki beş farklı fonksiyon üzerinde GA'nın parametrelerini ve çevrimiçi ve çevrimdışı eniyileme performansını incelemektedir.

Bu çalışmada sunulan GA'da yedi tane parametre bulunmaktadır. Bu parametreler ve bunlar için belirlenen aralıklar ve değerleri, Tablo 2'de meta-seviye kromozomdaki sırası ile verilmektedir.

TABLO 2. Meta-seviye GA'da Eniyilenen GA Parametreleri ve Değerleri

Parametreler	Değerler
Nüfus sayısı	20,30,40,...,150
Kuşak sayısı	10,20,30,...,250
Tekrar sayısı	5,8,10,12,15,18,20,22,25,28,30
Çaprazlama olasılığı	0, .10, .20, .30, .40, .45, .50, .55, .60, ...,1
Mod mutasyonu olasılığı	0, .05, .10, .15, .20, ..., .50, .60, .70, ...,1
Yer transferi mutasyon olasılığı	0, .05, .10, .15, .20, .30, .40, ...,1
Elit kromozom sayısı	1,2,3,...,20

Meta-seviye GA'da örnek bir kromozom olarak [50, 160, 8, 0.20, 0.30, 0.00, 3] kromozomunu seçelim. Bu kromozom, 50'lik bir nüfus sayısına sahip 160 kuşağın 8 defa tekrarlandığını; her bir kuşağın oluşturulmasında çaprazlama olasılığının, yer transferi mutasyonu olasılığının ve mod mutasyonu olasılığının sırasıyla 0.20, 0.30 ve 0.00 olduğunu; ve en iyi 3 kromozomun aynen bir sonraki kuşağa aktarıldığını (elit kromozom sayısı) ifade etmektedir. Tablo 2'den görüleceği üzere meta-seviye GA, 2^{28} olası parametre kümesinden daha geniş bir uzayı araştırmaktadır.

Meta-seviye GA'daki bir kromozom şu şekilde değerlendirilir: İNAKKPÇP için tasarlanmış olan GA bu kromozomdaki değerlerle tekrar sayısı kadar çalıştırılır ve her tekrarlama elde edilen en iyi NBD'lerinin ortalaması alınarak bu değer hem bu kromozom amaç işlevi değeri hem de uygunluk değeri olarak kabul edilir.

Meta-seviye GA, 93 problem kümesindeki en fazla faaliyeti olan problem için uygulanmıştır. Bu problemde 53 faaliyet ve 3 tane yenilenebilir kaynak bulunmaktadır ve iskonto oranı 0.005 olarak alınmıştır. Meta-seviye GA parametreleri olarak genel olarak Grefenstette (1986) çalışmasında kullanılan değerler alınmıştır. Nüfus sayısı 51, kuşak sayısı 60, tekrar sayısı 1, çaprazlama olasılığı 0.60, mutasyon olasılığı 0.125, elit kromozom sayısı 5 olarak belirlenmiştir. Meta-seviye GA koşumu çok uzun zaman aldığından tekrar sayısı 1 olarak alınmıştır. Bu tek koşulda, (tekrarlanabilecek kromozomlar da dikkate alınarak) en fazla 3060 meta-kromozomu, diğer bir deyişle, 3060 GA yaratılmış ve sınanmıştır.

Meta-seviye GA sonunda elde edilen ve İNAKKPÇP için tasarlanan GA'da kullanılan parametreler şu şekildedir: Nüfus sayısı=140, Kuşak sayısı=240, Tekrar sayısı=8, Çaprazlama olasılığı=0.65, Mod mutasyonu olasılığı=0.05, Yer transferi mutasyonu olasılığı=0.50 ve Elit kromozom sayısı=19 (elit kromozom oranı=19/140=0.14).

4. SAYISAL ANALİZ

GA yaklaşımı, teknik yazındaki 93 problemlik bir küme kullanılarak LCBA yönteminin iteratif yöntemiyle karşılaştırılmıştır (Ulusoy ve Özdamar, 1995). Bu problemler en fazla 53 faaliyetli ve 5 yenilenebilir kaynaklı problemler olup, faaliyet başına en fazla 3 mod düşmektedir.

Algoritmalar bu problem kümesi ile çalıştırılmış ve hem en büyük NBD hem de en küçük proje süreleri (C_{maks}) değeri kaydedilmiştir. LCBA yönteminin iteratif çıktıları bir çözüm kümesi oluşturmaktadır. Bu çözümlerin, küme içindeki diğer çözümlere göre etkin olanları bir alt-küme oluşturmaktadır. LCBA, bu alt-kümeye yer alan sonuçlar arasından NBD en yüksek olanını çözüm olarak atamaktadır.

Bu çıktılar kullanılarak LCBA ve GA yaklaşımları iki analizle karşılaştırılmıştır: NBD'lerindeki ortalama iyileşme oranları ve ortalama C_{maks} değerlerinde ortalama iyileşme oranları. Bu oranlar t- testi ile sınanmıştır. Sonuçlar Tablo 3'te gösterilmektedir.

Sonuçlar, GA yaklaşımının LCBA ile karşılaştırıldığında NBD'lerinde ortalama %18.37 iyileşme sağladığını göstermektedir. Bu sonuç 0.0005 anlamlılık düzeyinde önemli bir iyileşmedir. C_{maks} değerlerinde GA ortalama % 0.97 iyileşme sağlamaktadır ve bu değer 0.01 düzeyinde anlamlıdır. GA yaklaşımında kaydedilen C_{maks} değerleri aslında GA yaklaşımının bulabileceği en iyi C_{maks} değerleri değildir. Bunun sebebi GA çalışırken en iyi C_{maks} değerlerinin kaydının tutulmaması ve en iyi NBD'ine sahip olan kromozomun proje süresinin C_{maks} değeri olarak alınmasıdır. GA yaklaşımının sadece NBD değerini değerlendirerek C_{maks} değerini enazlamak üzere herhangi bir çabası olmamasına karşın gözlenen bu ortalama %0.97 oranındaki iyileşme, proje süresini enküçükleme ve NBD'ni ençoklama kriterlerinin birbirini desteklemesinden ileri gelmektedir.

Doğal olarak, proje süresini enazlama amacı ve uygunluk işlevi ile bulunacak C_{maks} değerleri çok daha iyi olacaktır ve C_{maks} değerlerindeki ortalama iyileşme de en az %0.97 olacaktır.

Bunu test etmek için aynı problem kümesi ve GA parametreleri ile, fakat bu sefer kriter olarak proje süresini enazlama, uygunluk işlevi olarak da $f(x) = z_{maks}(P_t) - z(x)$ alınmıştır. Burada P_t , t. kuşağı ifade ederken, $z_{maks}(P_t)$, P_t kuşağında gözlenen en büyük proje süresi değeri ve $z(x)$ ise x kromozomunun proje süresidir ($z(x) = C_{maks}(x)$). Bu GA ile elde edilen sonuçlara göre C_{maks} değerlerinde ortalama % 5.35'lik bir iyileşme sağlanmıştır ve bu sonuç 0.0005 düzeyinde anlamlıdır. Sonuçlar Tablo 3'ün son satırında da verilmektedir.

TABLO 3. GA ile LCBA Karşılaştırması Sonuçları

Kriter	Ortalama İyileşme Yüzdesi	t-Testi
NBD karşılaştırılması*	18.37	6.17
C_{maks} değerlerinin karşılaştırılması*	0.97	2.37
C_{maks} değerlerinin karşılaştırılması**	5.35	7.51

(* GA'da amaç işlevinin NBD ençoklaması olduğu durum;

** GA'da amaç işlevinin C_{maks} enazlaması olduğu durum)

GA yaklaşımının birbirinden farklı iki kriter için de aynı parametrelerle daha iyi sonuçlar vermesi GA yaklaşımının her ortama kolaylıkla uygulanabileceğinin de bir göstergesidir.

133 Mhz. hıza ve 32 MB RAM'e sahip bir kişisel bilgisayarda C++ ile derlenmiş olan GA algoritmasının 1000 kromozom değerlendirmek için harcadığı zaman 0.479 CPU saniyesidir.

5. YENİLENEMEZ KAYNAKLARIN PROBLEME EKLENMESİ

Aynı çalışma, problem kümesindeki projelerin her birine yenilenemez kaynakların eklenmesinden sonra tekrarlanmıştır. Bu yeni çalışmada kromozomların temsili ve değerlendirilmesi aynı şekildedir. Fakat artık her faaliyete ilişkin nakit çıkışları hesaplanırken yenilenemez kaynakların da maliyeti aynı şekilde –kullanım miktarları ve birim maliyetlerinin çarpılıp toplanması ile- eklenmiştir. Bir önceki çalışmada kullanılan çizelgeleyici ve operatörler kullanılmış ve ilk kuşak yine aynı çözüm üretici ile oluşturulmuştur. Tek değişiklik, çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonucunda oluşan bir kromozomun yenilenemez kaynakların kısıtlarını ihlal etmesi durumunda herhangi bir düzeltme işlevi uygulanmadan bu kromozomun atılmasıdır.

5.1. Meta-seviye Genetik Algoritma

Bu çalışmada da bir meta-seviye GA uygulanmıştır. Bu meta-seviye GA'nın parametreleri de önceki uygulamada olduğu gibi Nüfus sayısı=51, Kuşak sayısı=60, Tekrar sayısı=1, Çaprazlama olasılığı=0.60, Mod mutasyonu olasılığı=0.125 ve Elit kromozom sayısı=5 olarak belirlenmiştir. Sadece mod mutasyonu parametresinin değerlerine 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 değerleri de eklenmiştir.

Sonuçta elde edilen ve GA'da kullanılacak olan parametreler şu şekilde olmuştur: Nüfus sayısı=140, Kuşak sayısı=240, Tekrar sayısı=22, Çaprazlama olasılığı=0.90, Mod mutasyonu olasılığı=0.02, Yer transferi mutasyonu olasılığı=0.05, Elit kromozom sayısı= 11.

5.2. Sayısal Analiz

Teknik yazındaki 93 problemlik kümedeki her bir probleme en az bir, en fazla iki yenilenemez kaynak eklenmiştir. İki tane yenilenemez kaynak eklenen problemler aynı yapıya (öncüllük ilişkilerine) sahip ve aynı sayıda yenilenebilir kaynak bulunan iki problemde biri

olarak seçilmiştir. Böylelikle 16 probleme iki tane yenilenemez kaynak eklenmiştir. Bu ekleme, her bir faaliyetin her bir modu en az bir birimlik yenilenemez kaynak kullanacak şekilde ve yenilenemez kaynakların toplam maliyeti yenilenebilir kaynaklardan oluşacak toplam maliyetle yaklaşık aynı ağırlıkta olacak şekilde kullanım miktarı ve birim maliyet belirlenmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Bunun amacı yenilenemez kaynakların, amaç ve uygunluk işlevinde etkili olmasını sağlamaktır. Her bir projenin en az ve en fazla toplam yenilenemez kaynak kullanımını hesaplanmış ve yenilenemez kaynakların limiti, bunların farkının % 60'ı minimum kullanıma eklenerek hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlarda NBD'inin çoğunlukla yaklaşık iki kat daha arttığı ve proje sürelerinin genelde arttığı gözlenmiştir. Önceki çalışmada ortalama proje süresi proje başına 73.688 iken bu çalışmada 76.452'ye yükselmiştir. 1000 kromozomum değerlendirilme süresi ise 0.479 CPU saniyesinden 0.528 CPU saniyesine yükselmiştir.

Teknik yazında daha önce yenilenemez kaynakların da yer aldığı İNAKKPÇP üzerinde bir çalışma olmadığı için sonuçların başka bir yöntemle karşılaştırılması yapılamamıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu makalede, kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi için bir GA yaklaşımı sunulmuştur. Burada kullanılan GA'nın uygunluk işlevinde küçük bir değişiklik yapılarak hem KKÇP hem de İNAKKPÇP için uygulanabileceği gösterilmiştir.

Burada kullanılan çok bileşenli, düzgün, sıralama temelli çaprazlama operatörüne (MCUOX) sahip GA'nın, KKÇP ve İNAKKPÇP'nde uygulanmış probleme özel en iyi sezgisel yaklaşımdan daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Buradaki problemlerde proje sonunda toplu olarak bir ödeme alındığı varsayılmıştır. İNAKKPÇP proje boyunca alınan ödemeler şeklinde geliştirilebilir. Bu tür ödemeler, ayrı bir seçim problemi olarak formüle edilmek suretiyle probleme katılacaksa, kromozom yapısına üçüncü bir boyut daha eklenmesi gerekecektir.

KAYNAKÇA

- Blazewicz, J., J.K. Lenstra ve A.H.G. Rinnooy Kan, "Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity", *Discrete Applied Mathematics*, **5**, 11-24, 1983.
- Elmaghraby, S.E. ve W.S. Herroelen, "The scheduling of activities to maximize the net present value of projects", *European Journal of Operational Research*, **49**, 35-40, 1990.
- Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- Grefenstette, J.J., "Optimization of control parameters for genetic algorithms", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **SMC-16**, 1, 122-128, 1986.
- Hartmann, S., "Project scheduling with multiple modes: A genetic algorithm", Technical Report 435, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, 1997.

- Hartmann, S., "A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling", *Naval Research Logistics*, **45**, pp. 733-750, 1998.
- Holland, J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- Lee, J.-K. ve Y.-D Kim, "Search heuristics for resource constrained project scheduling", *Journal of the Operational Research Society*, **47**, 678-689, 1996.
- Li, K.Y. ve R.J. Willis, "An iterative scheduling technique for resource-constrained project scheduling", *European Journal of Operational Research*, **56**, 370-379, 1992.
- Mori, M. ve Tseng, C.C., "A genetic algorithm for multi-mode resource constrained project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, **100**, 134-141, 1997.
- Özdamar, L., *Local Constraint Based Analysis in Resource-Constrained Project Scheduling*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 1991.
- Özdamar, L. ve G.Ulusoy, "A local constraint based analysis approach to project scheduling under general resource constraints", *European Journal of Operational Research*, **79**, 287-298, 1994.
- Özdamar, L. ve G.Ulusoy, "A survey on the resource-constrained project scheduling problem", *IIE Transactions*, **27**, 574-586, 1995.
- Özdamar, L., "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, 44-59, 1999.
- Shtub, A., J.F. Bard ve S. Globerson, *Project Management; Engineering, Technology and Implementation*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994.
- Sivrikaya-Şerifoğlu, F., *A New Uniform Order-Based Crossover Operator for Genetic Algorithm Applications to Multi-Component Combinatorial Optimization Problems*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 1997.
- Sivrikaya-Şerifoğlu, F. ve G. Ulusoy, "Parallel machine scheduling with earliness and tardiness penalties", *Computers and Operations Research*, **26**, 773-787, 1999.
- Smith-Daniels, D.E. ve N.J. Aquilano, "Using a late start resource constrained project schedule to improve project net present value", *Decision Sciences*, **18**, 617-630, 1987.
- Ulusoy, G. ve L. Özdamar, "A heuristic scheduling algorithm for improving the duration and net present value of a project", *International Journal of Operations & Production Management*, **15**, 89-98, 1995.
- Ulusoy, G., F. Sivrikaya-Şerifoğlu, Ü. Bilge, "A genetic algorithm approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles", *Computers and Operations Research*, **24**, 335 – 351, 1997.
- Ulusoy, G. ve S. Cebelli, "An equitable approach to the payment scheduling problem in project management", basılmak üzere kabul edildi, *European Journal of Operational Research*, 1999.