

# SINAV ÇİZELGESİ HAZIRLAMA PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜNDE BİR DOĞRUSAL OLMAYAN KARAR MODELİ ÖNERİSİ

**Servet Hasgöl**

Osmangazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26030, Bademlik, Eskişehir.

**Özgür Kakmacı**

Hv.K.K., Lojistik Plan Koordinasyon Daire Başkanlığı, 06100, Bakanlıklar, Ankara.

**Özet:** Eğitim kurumlarında uygun sınav çizelgesi hazırlama probleminin karmaşık yapısı giderek artmaktadır. Daha çok öğrencinin, artan ve çeşitlenen derslere kayıt yaptırması, kurumdan kuruma değişen özel kısıtların bulunması eğitim kurumlarının sınav çizelgesi hazırlanması işlemlerini güçleştirmektedir. Bu çalışmada Osmangazi Üniversitesinde karşılaşılan sınav çizelgesi hazırlama problemi tanıtılmış ve çözüm yöntemi olarak doğrusal olmayan bir karar modeli önerilmiştir. Üniversitelerdeki sınav çizelgesi hazırlama probleminin çözümü için uygun yordamların geliştirilmesi gerekmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Matematiksel programlama, karar modelleri, sınav çizelgeleme.

## A NONLINEAR DECISION MODEL SUGGESTION FOR EXAMINATION TIMETABLING PROBLEMS

**Abstract:** The complexity of developing feasible examination timetables for education institutions is increasing. Institutions are enrolling more students into a wider variety of courses including an increasing number of combined degree courses. Many constraints involved in exam scheduling vary from institution to institution. In this study the examination timetabling problem at the Osmangazi Üniversitesi is introduced, and a nonlinear decision model is developed. Appropriate algorithms are required to provide satisfactory examination timetables for universities.

**Keywords:** Mathematical programming, decision models, university timetabling.

### 1. Giriş

Eğitim kurumlarında karşılaşılan sınav çizelgesi hazırlama problemleri, öğrencileri aynı anda iki sınava girmek zorunda bırakmayacak ve bütün kaynak kısıtlarını sağlayacak biçimde, sınavları uygun zaman dilimlerine yerleştirme olarak tanımlanabilir. Sınav çizelgesi hazırlama problemlerinin çözülmesi, eğitim kurumlarının sınıf geçme sistemini bırakıp ders geçme sistemini benimsemeleri ile yeni bir boyut kazanmıştır. Öğrencinin alma hakkının olduğu ders çeşitlerinin artmasıyla sınavlarının çakışmaması gereken ders ikililerinin sayısı da fazlaşmıştır. Yüksek öğretim kurumlarında çift anadal ve yandal uygulamalarının eklenmesi bazı bölümlerin sınav programlarını etkileşimli hazırlamasını gerektirmekte, bu durum uygun çözümün bulunmasını güçleştirmektedir. Ayrıca sınav çizelgesi oluşturma problemlerinin karşımıza çıktığı eğitim kurumlarının her birinin kendine özgü kısıtları da vardır. Bu farklılaşma da, sınav çizelgesinin oluşturulmasında hedeflerin belirlenmesi konusunda, kurumların farklı bakış açılarına sahip olmasına neden olur.

Bu çalışmada geliştirilen bir doğrusal olmayan karar modeli ile, sınavları çakışan öğrenci sayısının azaltılması veya ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Karar modelinin çözüm yönlü performans değerlendirilmesi ve geliştirme önerileri ayrıca ele alınmakta ve alternatif çözüm yöntemleri de önerilmektedir.

## 2. Sınav Çizelgesi Hazırlama Problemi

Sınav çizelgesi hazırlama probleminde amaç, genellikle çakışma sayısını en küçükleme olarak tariflenir. Ancak birçok kurum genellikle ikincil amaç olarak probleme eklenen, bazı sınavların belirli zaman aralıklarında yer alması ve notlama için bol zaman yaratmak amacıyla büyük sınavların erken zaman dilimlerine atanması gibi koşulların gerçekleşmesini de şart koşabilmektedir (Thompson ve Dowsland, 1998).

Sınav çizelgesi oluşturma problemlerinin karşımıza çıktığı eğitim kurumlarının her birinin kendine özgü kısıt kümeleri vardır ve bunlar kurum politikalarına göre kurumdan kuruma farklılık gösterir. Bu farklılaşma da, sınav çizelgesinin kalitesi konusunda, kurumların farklı bakış açılarına sahip olmasına neden olur. Bu durumun sınav çizelgelerinin evrensel tanımını yapmayı zorlaştırmakta ve sadece sınırlı sayıdaki kısıt formlarının dikkate alınmasına neden olmaktadır (Merlot vd., 2002). Sözü edilen temel kısıt formlarını ise şöyle sıralabilir:

1. Çakışma: Hiç bir öğrencinin aynı oturumda iki sınavı olamaz.
2. Kapasite: Salonda, aynı oturumda sınava giren toplam öğrenci sayısı salon kapasitesini aşmamalıdır.
3. Toplam Kapasite: Aynı oturumda sınavlara giren öğrenci sayısı toplamı, oturumun toplam kapasitesinden küçük olmalıdır.
4. Sınav Kapasitesi: Aynı oturumdaki toplam sınav sayısı belli bir sayıdan küçük olmalıdır.
5. Sınav Uygunluğu: Bazı sınavlar önceden belirli otumlara atanmıştır veya sadece sınırlı sayıdaki oturuma atanabilmektedirler.
6. Salon Uygunluğu: Bazı salonlar sadece belli otumlarda uygundur.
7. Çiftli Sınav Kısıtları: Bazı sınav çiftleri çiftli çizelgeleme kısıtlarına uymak zorundadır. Örneğin birinin diğerinden önce çizelgelenmesi gerekebilir.
8. Sınav – Salon Uyumu: Bazı sınavlar özel salonlara ihtiyaç duyarlar.
9. Öğrenci Sınırlamaları: Öğrencilerin, bireysel sınav çizelgelerinde bazı sınırlamalar olabilir. Örneğin art arda gelen otumlarda bir öğrenciye iki sınav birden atanmamalıdır.
10. Büyük Sınavlar: Büyük sınavlar sınav devresinde erken bir konuma yerleştirilebilir. Örneğin 500 öğrenciden fazla katılımın olduğu sınavlar ilk 10 oturumda yapılmalıdır.

Dimopoulou ve Miliotis (2001), yukarıda sözü edilen kısıtlara ek olarak aşağıdaki kısıtların da sınav çizelgesi oluşturma problemlerinde göz önüne alınması gerektiğini belirtmişlerdir;

1. Her bir bölümde bir sınav gününde sadece bir zorunlu ders sınavı yapılmalıdır. Bu kısıt eğer sınav devresi buna izin verecek uzunlukta ise geçerlilik kazanacaktır.
2. Zorunlu derslerin sınavları sınav devresi boyunca dengeli olarak yayılmalıdır.
3. Sınav devreleri olabildiğince kısa tutulmalıdır.

Burke vd. (2000, 2002) esas problemin, birçok farklı üniversitede bulunan farklı tipteki problemlere uyacak şekilde büyük değişkenliklere sahip yüksek kalitede programlar üretmek olduğunu söylemektedirler. Geniş çapta kısıt tanımlama yeteneğine sahip otomatik programlama sistemlerine kullanıcılar tarafından eklenebilecek başlıca kısıtları ise şu şekilde sıralamıştır:

1. Hiç bir öğrenci komşu oturumlarda iki sınava girmemelidir.
2. Hiç bir öğrenci aynı günde iki sınava girmemelidir.
3. A ile B sınavı arasında en az belirli bir miktarda süre bulunmalıdır.
4. A sınavı B sınavıyla aynı veya benzer malzemeler gerektirdiğinden aynı oturumda yapılmalıdır.

Kurumlar, ilgili kısıtların bazılarını veya tümünü uygulamaya koyabilirken, bunlara kendi politikalarına göre ekler de yapabilirler. Merlot vd. (2002), çözümün kalite ölçütlerinin genellikle gevşek kısıtlardan ve sıklıkla da öğrenci sınırlamalarından türediğini söylemiş ve farklı kalite ölçütlerinin eş zamanlı olarak kullanılması durumunda, amacın, bu ölçütlerin doğrusal bileşimi biçiminde şekillenerek, göreceli ağırlıkların kalite ölçütlerinin görünen önemini yansıtacağını belirtmiştir. Örneğin, çakışma sayısı yani öğrencinin iki sınavının aynı oturuma atanması durumu, bir kurum için öğrencinin aynı gün içinde gireceği sınav sayısına göre daha öncelikli bir kalite ölçütü olabilir.

### 3. Doğrusal Olmayan Karar Modeli Önerisi

Yüksek öğretim kurumlarında kullanılan sınav çizelgelerini belirlemek amacıyla geliştirilen sınav çizelgesi oluşturma problemleri kurumların değişen kalite ölçütleri nedeniyle çeşitlilik göstermektedir. Belirli kalite ölçütleri ele alınarak sınav çizelgesi oluşturma amaçlandığı bu bölümde öncelikle geliştirilen modeller anlatılarak aralarındaki performans farklılıkları belirlenecek ve daha sonra da modellerin çözümü için tasarlanan bilgisayar programı tanıtılacaktır.

#### 3.1. Problemin Tanıtılması

Osmangazi Üniversitesi sınav çizelgesi oluşturmaya amaçlayan bu çalışmanın çıkış noktası, öğrenci sayılarının artması, çift anadal ve yandal programlarının uygulanmaya konması sonucunda sınav çakışmalarının artmasıdır. Sınav çakışmasına maruz kalan öğrencilerin daha sonra sınava girmeleri nedeniyle eşit değerlendirme yapılamamasının ortaya çıkardığı olumsuzluklar, öğretim üyelerinin tekrar sınav hazırlığı yapmaları ve ek sınav oturumlarının düzenlenmesi konularında ortaya çıkan sorunlar azaltılacaktır.

Üniversitelerde ders geçme sistemi uygulanması nedeniyle bölümler bazında oturtulması güçleşen sınav çizelgeleri, başarılı öğrencilerin teşvik edilmesi amacıyla uygulanmaya başlayan yandal ve çift anadal programlarıyla iyice içinden çıkılmaz bir boyut kazanmıştır.

Ders geçme sisteminde, bölümlerin ilk sınıflarının belirli dersleri vardır ve öğrenciler bu dersleri alarak eğitimlerine başlarlar. Aldıkları derslerden başarılı oldukları ölçüde bir üst sınıftan ders alma hakkını elde ederler ve bu nedenle hem dördüncü hem de birinci sınıf derslerini aynı anda alan öğrencilere rastlamak mümkündür. Öğrenciler alınması zorunlu dersleri başarıyla tamamlayınca mezun olurlar ve fakültemizde de sözü edilen bu sistem uygulanmaktadır. Her bir öğrencinin her bir dersi alma durumu olabildiğinden bu sistemde sınav çizelgesi oluşturmak sınıf geçme sistemine göre daha zordur.

Sınav çizelgesi oluşturma konusunda fakülte çapında yapılan çalışmalarda, ders çizelgesinin esas alınması önerisi sıklıkla getirilmiştir. Bazı derslerin haftalık ders çizelgesinde bölümlere ayrılması, bunu uygulanabilir bir seçenek olmaktan çıkarmıştır. Bir de ders işleme anında gereken kaynaklar ile o derse ait sınavın yapılması anında gereken kaynaklar farklılık

gösterebilir. Örneğin ders yapılırken uygulanan oturma düzeni ile sınav oturma düzeni farklılıklar gösterdiğinden, doğal olarak sınav yapılırken daha fazla salona ve sıraya ihtiyaç duyulacaktır.

Sınav çizelgesi oluşturma konusunda bazı üniversitelerde görülen uygulamalarda sınav devresi diye bir zaman diliminden söz edilmeyerek, sınav zamanının ders saati içerisinde olmak kaydıyla öğretim üyesi ve öğrencilerce kararlaştırılması önerilmektedir. Fakat öğrencinin sınav olduğu gün derse de girmek zorunda olması bu tür uygulamaların başlıca dezavantajı olarak göze çarpmaktadır.

### 3.2. Karar Değişkeni ve Parametreler

Karar modelinin bileşenlerine ilişkin olarak yapılacak açıklamalara geçmeden önce, modelde kullanılan dizin kümelerinin tariflenmesi yerinde olacaktır. İlgili modelde kullanılacak olan dizin kümeleri aşağıda belirtilmiştir:

$$\begin{aligned}
 I &= \{ i \mid i = 1, 2, \dots, m \} \text{ ve } J = \{ j \mid j = 1, 2, \dots, n \} \text{ dersler dizini} \\
 K &= \{ k \mid k = 1, 2, \dots, 24 \} \text{ oturumlar dizini} \\
 L &= \{ l \mid l = 1, 2, \dots, t \} \text{ bölümler dizini} \\
 U &= \{ u \mid u = 1, 2, \dots, 4 \} \text{ sınıflar dizini} \\
 V &= \{ v \mid v = 1, 2, \dots, 6 \} \text{ günler dizini}
 \end{aligned}$$

Oturumlara ait dizin kümesinde yer alan her bir elemanın hangi günün hangi zaman dilimini gösterdiği Tablo 1’de açıklanmıştır.

Tablo 1. Günlerin zaman dilimlerini simgeleyen dizinlerin gösterimi

Saat / Gün	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma	Cumartesi
09:00-11:00	1. Oturum	5. Oturum	9. Oturum	13. Oturum	17. Oturum	21. Oturum
11:00-13:00	2. Oturum	6. Oturum	10. Oturum	14. Oturum	18. Oturum	22. Oturum
14:00-16:00	3. Oturum	7. Oturum	11. Oturum	15. Oturum	19. Oturum	23. Oturum
16:00-18:00	4. Oturum	8. Oturum	12. Oturum	16. Oturum	20. Oturum	24. Oturum

Atama modeli yapısında geliştirilen modele ait karar değişkeni, söz konusu yapıya uygun olarak 0 veya 1 tamsayı değerini alacaktır. Karar değişkeninin gösterimi ve aldığı değere göre çıkarılacak anlam aşağıda verilmiştir:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1; & i.\text{inci dersin sınavı } k.\text{inci oturumda yapılacaktır.} \\ 0; & i.\text{inci dersin sınavı } k.\text{inci oturumda yapılmayacaktır.} \end{cases}$$

Karar değişkenleriyle kurdukları ilişkilerle, uyulması gereken kısıtların ve problemin amacının matematiksel gösteriminin yapılabilmesini sağlayan parametrelerin anlamları aşağıda açıklanmıştır;

$c_{ij}$  :  $i$  ve  $j$  derslerinin sınavlarının aynı oturuma atanması durumunda sınavları çıkışacak öğrenci sayısı ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ )

$a_l$  :  $l$ . bölümde aynı anda yapılabilecek sınav sayısı ( $l = 1, 2, \dots, t$ )

$b_{luv}$  :  $l$ . bölümün  $u$ . sınıfının  $v$ . gün girebileceği sınav sayısı ( $l = 1, 2, \dots, t; u = 1, 2, 3, 4; v = 1, 2, \dots, 6$ )

$d_{lu}$  :  $l$ . bölümün  $u$ . sınıfının sınava gireceği ders sayısı ( $l = 1, 2, \dots, t$ ;  $u = 1, 2, 3, 4$ )

$a_l$ : parametresinin değerleri, bölümün, salon, gözetmen vb. imkanları dahilinde, sınav devresi içinde tüm sınavların yapılmasına olanak sağlayacak bir biçimde belirlenmesi gerekirken,  $b_{luv}$  parametresinin değerleri ise sınıfların sınavlarını devre süresince dengeli bir şekilde yayacak biçimde olmalıdır.

### 3.3. Amaç Fonksiyonu

Amacı, aynı oturuma farklı sınavları atan öğrenci sayısını en küçükleme olan modelimizin amaç fonksiyonu, sınav çakışmasının iki kere dikkate alınmasını önlemek için  $i < j$  olmak üzere, matematiksel olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir. Söz konusu gösterimde amaç fonksiyonunun sadece,  $x_{ik}$  ve  $x_{jk}$  karar değişkenlerinin her ikisinin de bir değeri aldığında artmasını sağlamak için, bu değişkenlerin en küçüğünün seçilmesi gereği duyulmuştur. İlgili karar değişkeni ikililerinin diğer değerleri almaları durumunda hep  $c_{ij}$  parametresinin sıfırla çarpılması sağlanarak çakışma durumunun olmaması halinin amaç fonksiyonu değerine herhangi bir etki yapması engellenmiştir.

$$Enk \ z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=2}^n c_{ij} \times \sum_{k=1}^{24} Enk \{x_{ik}, x_{jk}\} \quad (1)$$

Sadece çakışma durumunun söz konusu olduğu durumlarda amaç fonksiyonunun artmasına neden olan matematiksel ifadenin taşıdığı anlam  $x_{ik}$  ve  $x_{jk}$  terimlerin çarpılmasıyla da verilebilir. Alternatif olarak gösterilebilecek olan bu amaç fonksiyonunun matematiksel olarak gösterimi aşağıda verilmiştir;

$$Enk \ z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=2}^n c_{ij} \times \sum_{k=1}^{24} x_{ik} \times x_{jk} \quad (2)$$

Amaç fonksiyonunun en küçüklemeye çalıştığı sınav çakışmaları, kısıt şekline dönüştürülerek tamamen önlenmeye çalışılabilir. Fakat problem böylece kısıtları sağlayacak bir çözüm bulmaya odaklanacağından çözümsüzlük durumuyla karşılaşılabilir. Ayrıca bu durumun model boyutlarının artmasına da yol açarak çözüm süresini olumsuz yönde etkileyeceği unutulmamalıdır.

### 3.4. Kısıtlar ve Karar Modeli

Modelde üç tip kısıt kümesinin kullanılmasına gerek duyulmuştur. Birinci tip kısıtlar her dersin sınavının bir oturuma atanmasını sağlamaya yöneliktir. İkinci tip kısıtlar, her bölümde bir oturumda, en fazla belirlenen miktar kadar sınav yapılmasını sağlayarak gözetmen ve derslik yetersizliği gibi sorunları önlemeyi amaçlamaktadır. Üçüncü tip kısıtlar ise sınıf temelinde sınavları haftaya homojen olarak yayarak öğrencilere yeterli çalışma süresi sağlamayı öngörmektedir. Bu amaçla her sınıfın günde en fazla belirlenen sayıda sınava girmesi sağlanmaya çalışılacaktır.

İki ve üçüncü tip kısıtların gösteriminde  $G$  kümesinden yararlanmıştır. Küme elemanı  $g_p$ ,  $G$  kümesinin  $p$ . elemanını simgelesin. Kümenin ilk elemanı  $g_0=0$ , ikinci elemanı ise ele alınan ilk bölümün birinci sınıfının ders sayısıdır. Sonraki elemanlar oluşturulurken kümenin bir önceki elemanına diğer bir sınıfın ders sayısı eklenecektir. Sınıflar bitinceye kadar devam edecek bu işlem sonrasında kümede  $4t+1$  (sınıf sayısı  $\times$  bölüm sayısı + 1) eleman oluşacaktır. Aşağıda verilen, bu kümenin elemanlarının nasıl oluşturulduğuna dair matematiksel formülasyonla, elemanların oluşumu daha kolay anlaşılacaktır;

$$G = \{0, d_{11}, g_1 + d_{12}, g_2 + d_{13}, g_3 + d_{14}, \dots, g_{4*t-2} + d_{t3}, g_{4*t-1} + d_{t4}\}$$

Tüm bu tanımlamalardan sonra, kullanacağımız üç tip kısıtın matematiksel gösterimini aşağıda gibi yapabiliriz;

1) Her sınav bir oturuma yapılmak üzere atanmalıdır;

$$\sum_{k=1}^{24} x_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

2) Bir bölümde bir oturumda belirlenen sayıdan fazla sınav yapılamaz;

$$\sum_{i=1+g_{4(l-1)}}^{g_{4 \times l}} x_{ik} \leq a_l \quad k = 1, 2, \dots, 24; l = 1, 2, \dots, t$$

3) Her sınıfın bir günde en fazla belirlenen sayıda sınavı olabilir;

$$\sum_{i=1+g_{4(l-1)+u-1}}^{g_{4(l-1)+u}} \sum_{k=4(v-1)+1}^{4v} x_{ik} \leq b_{luv} \quad u = 1, 2, \dots, 4; l = 1, 2, \dots, t; v = 1, 2, \dots, 6$$

Yukarıda açıklanan tanımlamalar ışığında sınav çizelgesi hazırlama problemi için önerilen doğrusal olmayan karar modelinin genel hali, sırasıyla, kısıtları, karar değişkenlerinin alabileceği değerlerin sınırlandırılmasını ve amaç fonksiyonunu içerecek biçimde aşağıda verilmiştir;

Doğrusal olmayan karar modeli:

$$\sum_{k=1}^{24} x_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1+g_{4(l-1)}}^{g_{4 \times l}} x_{ik} \leq a_l \quad k = 1, 2, \dots, 24; l = 1, 2, \dots, t$$

$$\sum_{i=1+g_{4(l-1)+u-1}}^{g_{4(l-1)+u}} \sum_{k=4(v-1)+1}^{4v} x_{ik} \leq b_{luv} \quad u = 1, 2, \dots, 4; l = 1, 2, \dots, t; v = 1, 2, \dots, 6$$

$$x_{ik}, x_{jk} = 0 \text{ veya } 1 \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 2, 3, \dots, n; k = 1, 2, \dots, 24$$

kısıtları altında,

$$Enk \ z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=2}^n c_{ij} \times \sum_{k=1}^{24} Enk \ \{x_{ik}, x_{jk}\}$$

Yukarıda açıklanan modelin doğrusal olarak ele alınamamasının nedeni amaç fonksiyonun yapısından kaynaklanmaktadır. Amaç fonksiyonunda her iki dersin de aynı oturuma atanması durumunda sıfır-bir tamsayı değerini alan bir terim bulunmaktadır. Söz konusu ifadenin doğrusal bir yapıya çevrilmesiyle model isnenirse doğrusallaştırılabilir. Ancak bu durumda problemin boyutu hızla artmakta ve çözüm performansı olumsuz etkilenmektedir.

#### 4. Sonuç

Geliştirilen sınav çizelgesi oluşturma yaklaşımıyla, sınavları çakışan öğrenci sayısı azaltılarak veya ortadan kaldırılarak, öğretim üyeleri ile bölümlerin yeniden sınav hazırlığı yapmalarının önüne olabildiğince geçilmiş ve her bir öğrencinin eşit değerlendirme süzgecinden geçirilmesine çalışılmıştır.

Sınav çizelgesi oluşturma probleminin çözümünde bütünsel en iyi sonucu vermesine rağmen, doğrusal karar modelinin boyutları çok hızlı büyümektedir. Model boyutlarının hızlı büyümesi karar değişkeni ve kısıt sayılarının hızlı artması anlamına gelir ki bu da modelin çözümü için gereken süreyi olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle yerel eniyi çözüme kısa sürede ulaşan doğrusal olmayan karar modeli tercih edilmelidir. Karar modelinin çözümünde hangi amaç fonksiyonunun daha etkin olduğunun ve çakışma matrisinin yoğunluğunun çözüm süresine anlamlı bir etkisinin olup olmadığının incelenmesi ayrı çalışma konularıdır.

### **Kaynakça**

**Burke E.K., and Petrovic S.,** Recent research directions in automated timetabling, *European Journal of Operational Research*, 2002.

**Burke E.K., MacCarthy B., Petrovic S., and Qu R.,** Structured cases in case-based reasoning-reusing and adapting cases for timetabling problems, *Knowledge Based Systems* 13, 159-165, 2000.

**Dimopoulou M., and Miliotis P.,** Implementation of a university course and examination timetabling system, *European Journal of Operational Research*, 130, 202-213, 2001.

**Merlot L.T.G., Boland N., Hughes B.D., and Stuckey P.J.,** A hybrid algorithm for the examination timetabling problem, *The University of Melbourne*, Working paper, 2002.

**Thompson J.M., and Dowsland K.A.,** A robust simulated annealing based examination timetabling system, *Computers and Operations Research*, Vol. 25, No. 7/8, 637-648, 1998.