

## Sabit iş çizelgeleme problemleri: Literatür araştırması ve meta sezgisel yöntemler ile çözüm önerisi

Serkan KAYA<sup>1</sup>, Orhan ENGİN<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

<sup>2</sup>Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya

### Özet

*Sabit iş çizelgeleme; sabit bir başlangıç ve bitiş zamanında, tamamlanması gereken işlerin ve belirli sayıda makinelerin bulunduğu bir vardiyada, işlerin çizelgelenmesi olarak tanımlanmaktadır. Sabit iş çizelgeleme, amaç fonksiyonuna göre iki temel alt problemden oluşmaktadır. Bunlar; sabit geliş ve teslim zamanına sahip işlerin, özdeş paralel makinelerde işlem görmek üzere, her işin  $w_j$  ile ağırlıklandırılması sonucunda, toplam kâr maksimizasyonu amaçlı olan, Operasyonel sabit iş çizelgeleme ve sabit geliş ve teslim zamanlı işlerin  $c_k$  sabit maliyetli paralel özdeş makineler üzerinde çizelgelenmesi ile maliyet minimizasyonu amaçlı olan, taktiksel sabit iş çizelgeleme problemleridir (Eliyi, Azizoğlu, 2006). Havalimanında uçak bakım sürecinden, araç tamir/kiralama sistemlerine kadar geniş kullanım alanı bulunan sabit iş çizelgeleme probleminin, pratik önemine rağmen, literatürde çok az çalışma yapıldığı bilinmektedir. Bu çalışmada, sabit iş çizelgeleme problemi üzerine son yirmi yılda literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca meta sezgisel yöntemlerde olan, Genetik Algoritma (GA) ile Tavlama Benzetiminin (TB) Operasyonel sabit iş çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanımı üzerine öneride bulunulmuştur. Bouzina ve Emmons (1996) tarafından geliştirilen algoritma (klasik yöntem) ile meta sezgisel yöntemlerden olan Genetik algoritmalar ve Tavlama benzetiminin, Operasyonel sabit iş çizelgeleme problemleri üzerindeki çözüm performansı, bir örnek üzerinde karşılaştırılmıştır. Araştırmada, meta sezgisel yöntemlerin daha iyi sonuçlar verebileceği belirlenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Sabit iş çizelgeleme, genetik algoritma, tavlama benzetimi.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Orhan ENGİN. orhanengin@yahoo.com; Tel: (332) 223 20 39.

Makale metni 27.04.2007 tarihinde dergiye ulaşmış, 28.05.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Fixed job scheduling: a literature survey and a solution proposition through meta heuristic methods

### Extended abstract

Fixed Job Scheduling (FJS) is defined as the arrangement of the works, which have fixed ready times and deadlines in a shift with particular number of machines. In fixed job scheduling problems, the objective is to select a set of jobs for processing so as to maximize the total weight. This problem is known to be NP-hard. The Fixed job scheduling problem has two variants based on objective functions (Eliiyi, Azizoğlu, 2006). The first variant is the Operational Fixed Job Scheduling (OFS), where each job  $j$  has a weight  $w_j$  that represents its value or relative importance, and the concern is maximizing the total weight of the processed jobs with a given number of processors. The second variant is the tactical fixed job scheduling problem, which considers the minimization of the total cost or the number of the machines needed to process all jobs (Eliiyi, Azizoğlu, 2006).

FJS has been studied extensively in recent years. Arkin and Silvenberg (1987) analyzed the jobs scheduling problems with fixed start and end times. They proposed an algorithm which maximizes the value of jobs completed by  $k$  identical machines. They also showed that the problem is NP-Complete. Kolen and Kron (1992) investigated FJS problem which appears in the aircraft maintenance process at an airport. They show that the polynomially solvable cases of these problems can be solved by a combination of linear programming and network flow algorithms. Dondeti and Emmons (1992) study fixed job scheduling problem that involves two types of processors but three types of jobs. They present a polynomial algorithm for finding the minimal cost combination of the two types of processors required to complete all jobs. Fischetti et al. (1992) introduce several polynomial-time approximation algorithms for fixed job schedule problems. Some of the algorithms they present make use of a simple procedure for assigning to processors, in a greedy way. A later study by Kolen and Kroon (1994) addresses the fixed job schedule problem which appears in the aircraft maintenance process at an airport. They present an analysis of the problem of finding the minimum total number of engineers required for carrying out all jobs. In their study the engineers are

addressed as machines. Another study of Kroon et al. (1995) is exact and approximation algorithms for the operational fixed interval scheduling problem. They discuss the occurrence of the fixed interval scheduling problems in practice and develop exact and approximation algorithms for solving OFS problem. Bouzina and Emmons (1996) present a polynomial solution to several interval scheduling problems. The objective of their algorithm is maximizes the number of processed jobs. A later study of Kroon et al. (1997) is exact and approximation algorithms for the tactical fixed interval scheduling problem. They present exact and approximation algorithms for solving the tactical fixed interval scheduling problem. In the first study on interval scheduling problems to solve by a Meta heuristic method has been proposed by Santos and Zhong (2001). They developed a Genetic algorithm (GA) and reinforcement learning for the tactical fixed interval scheduling problem. A graph based heuristic is described to solve the operational fixed job scheduling problem by Garcia et al. (2005). They compared their solution with other heuristic from literature. Eliiyi and Azizoğlu (2006) propose a branch and bound algorithm for solving operational fixed job scheduling problem.

Despite its practical importance and broad range of usage area from the maintenance process of planes at the airports to the car repair /rental services, there are very few studies in literature on the subject of fixed job scheduling problem.

In this study, a literature survey on fixed job scheduling problems has been done for the last twenty years and also two meta heuristic methods such as Genetic algorithm(GA) and Simulated annealing(SA) are proposed for solving the operational fixed job shop scheduling problems. To show the performance of Genetic algorithm and simulated annealing, an example is presented in the study. A random test problem for the operational fixed job scheduling on identical parallel machine is solved with Bouzina and Emmons (1996) algorithm, and proposed GA and SA algorithms. The computational results indicate that the proposed metaheuristic methods are effective for operational fixed job scheduling problems.

**Keywords:** Fixed job scheduling, Genetic algorithm, Simulated annealing.

## Giriş

Genel olarak  $m$  adet paralel makine üzerinde işlem görmek üzere  $n$  adet işin olduğu bir çizelgeleme problemi dikkate alındığında, makine üzerinde  $i$ . işinin zaman penceresi; geliş zamanı,  $r_i$  ile son teslim zamanı,  $d_i$  arasındaki süre olarak tanımlanır. Eğer makinenin zaman penceresi, proses zamanından büyükse, yani; iş makine üzerinde geliş zamanı ile teslim zamanı arasındaki farktan daha uzun süre kalıyorsa, problem; değişken iş çizelgeleme olarak tanımlanır. Fakat iş, makine üzerinde kesintisiz işleme tabi tutuluyor, geciktirilmiyor, diğer bir ifadeyle, zaman penceresi işlem süresine eşit ise problem; sabit iş çizelgeleme olarak isimlendirilir. Sabit iş çizelgelemede prosese girecek bir iş,  $r_i$ 'de başlar ve  $d_i$ 'de biter. Değişken iş çizelgeleme de ise, işin başlama zamanı;  $r_i$  ile  $(d_i-r_i)$  zamanları arasındaki bir süredir (Eliyi ve Azizoğlu, 2004).

## Sabit iş çizelgeleme problemi

Sabit iş çizelgeleme problemi; belirli sayıda işlerin, sabit bir başlama ve bitiş zamanı arasında, paralel özdeş makineler üzerinde, öne alımsız ve aralıksız çizelgelenmesi olarak tanımlanmaktadır. Sabit iş çizelgeleme probleminde, aşağıdaki varsayımlar kabul edilir;

- Bir iş tüm makineler tahsis edilebilir,
- İşler için gerekli işlem süresi, makineye bağlı değildir,
- Tüm makineler özdeştir,
- İşlerin öne alımına ve bölünmesine izin verilmez,
- Makine kapasitesi üzerinde kısıtlama yoktur ve
- Tüm makineler her zaman kullanılabilir durumdadır.

Sabit iş çizelgeleme problemleri, amaç fonksiyonuna göre iki grupta sınıflandırılabilir (Eliyi ve Azizoğlu, 2004). Birinci grup, operasyonel sabit iş çizelgeleme problemi olarak isimlendirilir. Bu grupta her bir işe,  $w_j$  gibi bir ağırlık değeri atanır, amaç; makinelerde işlem görecektir iş sayısı ile işlerin toplam ağırlığını maksimize etmektir. İkinci grup, taktiksel sabit iş çizelgeleme problemi olarak bilinir. Bu çizelgeleme probleminde her bir makineye  $c_k$  gibi sabit bir

maliyet değeri atanır, amaç; işlem görecektir tüm işlerin toplam maliyetini minimize etmektir.

Operasyonel sabit iş çizelgeleme problemi ile ilgili ilk uygulamayı, Kolen ve Kroon (1991) yapmışlardır. Çalışmalarında, bir hava limanına gelen uçağın inişi ile bakım hizmeti görüp limanı terk etmesi sürecini incelemişlerdir. Amaç, uçağın gecikmesini önleyecek sabit aralıklı bakım sürecini planlamaktır. Araştırmada, uçaklar işi temsil etmekte ve bakım sürecinde makinede işlerin operasyona tabi tutulması olarak kabul edilmiştir. Operasyonel sabit iş çizelgeleme problemi ile ilgili bir diğer çalışmada, Wolfe ve Sorenson (2000) tarafından yapılmıştır. Yazarlar, dünya uydularının çizelgelenmesini, operasyonel sabit iş çizelgeleme problemi olarak kabul etmişlerdir. Amaç, yeryüzünden uydulara verilerin gönderilip tekrar cevap alınması sürecinde, çakışmaları önleyip, uydulardan maksimum verimi elde etmektir.

Taktiksel sabit iş çizelgeleme problemi ile ilgili Fischetti ve diğerleri (1987) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Yazarlar, otobüs sürücüsü çizelgeleme prosesini, taktiksel sabit iş çizelgeleme problemi olarak ele alıp, minimum maliyetli çizelgeyi belirlemeyi amaçlamışlardır.

Sabit iş çizelgeleme problemleri; dört farklı kısıta göre sınıflandırılmaktadır (Eliyi ve Azizoğlu, 2004). Bunlar;

- Çalışma zamanı kısıtlı,
- Yaygınlık zamanı kısıtlı,
- İşleyebilirlik kısıtlı ve
- Kullanılabilirlik kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemleridir.

## Çalışma zamanı kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemi

Çalışma zamanı kısıtlı çizelgeleme, makinenin çalıştığı süre ile sınırlandırılmış bir sabit iş çizelgeleme problemidir. Diğer bir ifade ile hiçbir makinenin, müsaade edilen toplam çalışma süresinden daha fazla çalışamayacağı kabul edilir. Sonuç olarak bir makinenin çalışma süresi, o makineye atanan işlerin toplam işlem süresi olarak ifade edilir. Çalışma zamanı kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemleri, boş zamanları içer-

mez. Çalışma zamanı kısıtları, farklı makineler için aynı veya farklı olabilir.

### **Yaygınlık zamanı kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemi**

Bir makine üzerine, işlemlerin toplam başlama ve bitiş zamanları arasındaki farkın maksimum değerleri yerleştirildiğinde ortaya çıkan çizelgelemeye, yaygınlık zamanı kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemi denilir. Bir makinenin yaygınlık zamanı, makine üzerinde yapılan işler arasında en erken geliş zamanı ve en son teslim zamanı arasında ki fark olarak tanımlanır. Makinenin bu iki zamanı arasında boş süreler olabilir, yaygınlık zamanı boş süreleri de kapsar.

### **İşleyebilirlik kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemi**

Her bir makinenin, işlerin tamamı yerine bir grubunu yapmaya elverişli olduğu durumda, problem, işleyebilirlik kısıtlı sabit iş çizelgeleme olarak isimlendirilir. Bu durumda benzerliklerine dayalı iş ve makine sınıfları oluşturulur. İşlerin makinelere atanması, bu sınıflandırma tabanlı olarak yapılır. Uçak ve sınıf çizelgeleme problemleri, işleyebilirlik kısıtlı sabit iş çizelgeleme kapsamında çözümlendirilebilir.

### **Kullanılabilirlik kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemi**

Sürekli kullanılabilirlikten daha ziyade sadece belirli zaman aralığı için kullanılabilir herhangi bir makine mevcut ise, problem, kullanılabilirlik kısıtlı sabit iş çizelgeleme olarak isimlendirilir. Kullanılabilirlik kısıtları genellikle makinelerin alt kümelerinin veya her makine için ardışık zamanların kaydırılması şeklinde görülür. Uçak bakım problemleri, bu kapsamda yer alan çizelgeleme problemleridir.

### **Sabit iş çizelgeleme problemleri konusunda literatürde yapılan çalışmalar**

Taktiksel ve operasyonel sabit iş çizelgeleme problemleri üzerine literatürde birçok pratik uygulamalar bulunmaktadır. Tablo 1’de sabit iş çizelgeleme konusunda son yirmi yılda yapılan çalışmalar sunulmuştur.

Eliyi ve Azizoğlu (2006) Operasyonel sabit iş çizelgelemede yaygınlık zamanı kısıtları üzerine

bir çalışma yapmışlardır. Problemlerin çözümü için bir dal sınır algoritması önermişlerdir.

Garcia ve diğerleri (2005) Operasyonel sabit iş çizelgeleme problemlerinin çözümünde graf tabanlı sezgisel yöntem önermişlerdir. Elde ettikleri çözümleri, literatürdeki diğer yöntemlerle kıyaslamışlardır.

Eliyi ve Azizoğlu (2004) sabit iş çizelgeleme problemi üzerine literatürde yer alan araştırmaları, çalışma zamanı, yaygınlık zamanı ve işleyebilirlik kısıtları altında sınıflandırmışlar ve karşılaştırmalı değerlendirmeler yapmışlardır.

Ayrıca Eliyi (2004) tarafından yapılan tez çalışmasında da, özdeş paralel makinelerde operasyonel sabit iş çizelgeleme problemi incelenmiştir. Yazar problemi, geliş ve teslim zamanları sabit işler kümesi içinden, proses edilecek iş kümesinin toplam ağırlığı maksimize edilecek şekilde tanımlamıştır. Problem, çalışma zamanı kısıtları, yaygınlık zamanı kısıtları ve makine bağımlı iş ağırlıkları olmak üzere üç ayrı ortamda ele alınmıştır. Araştırmada tüm problemlerin NP-zor olduğu gösterilmiş ve her bir problem için polinom zamanda çözülebilir özel durumlar belirlenmiştir. Tüm problemler için, problem boyutunu azaltma mekanizmalarından ve verimli alt ve üst sınır algoritmalarından yararlanan Dal ve Sınır tekniği geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlar algoritmaların, 100 işe kadar olan problemlerin makul zamanlarda en iyi çözümleri verdiğini göstermiştir.

Garcia ve Lozano (2004), müşteri mahaline anında dağıtım için hazır karma üretim tesisince gerçekleştirilecek siparişlerin seçimi ve çizelgenmesi problemi ile ilgilenmişlerdir. Siparişlerin sabit bir teslim tarihi ve tek bir tesiste sınırlı kapasiteyle hazırlanması kısıtları ile servisi yapılan siparişlerin toplam değerini maksimum edecek amaç fonksiyonu üzerinde çalışmışlardır. Bir grafik temelli metod ve bir deneysel dal-sınır esaslı algoritma tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, optimal yaklaşımın büyük problemler için uygulanabilir olmadığını ve önerilen deneysel yaklaşımın kısa işlem süresinde yüksek kalitede sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Tablo 1. Sabit iş çizelgeleme problemi literatür araştırması

Sıra No	Yazarlar	Araştırma Konuları
1	Elliyi D.T., Azizoğlu M. (2006)	Operasyonel sabit iş çizelgelemede yaygınlık zamanı kısıtları
2	Garcia J. M., Benitez R.R., Eguia I., Canca D., (2005)	Operasyonel sabit iş çizelgeleme problemlerinin çözümünde grafik tabanlı sezgisel yöntem.
3	Elliyi D.T., Azizoğlu M. (2004)	Sabit iş çizelgeleme problemi: literatür değerlendirmesi
4	Elliyi D.T., (2004)	Operasyonel sabit iş çizelgeleme problemi
5	Garcia J.M., Lozano S. (2004)	Hazır ve karışık operasyonlar için üretim ve araç çizelgeleme
6	Bekki Ö.B. (2003)	Özdeş paralel makinelerde sabit iş çizelgeleme
7	Huang Q., Lloyd E. (2003)	Maliyet kısıtlı sabit iş çizelgeleme
8	Santos E.J., Zhong X. (2001)	Taktiksel sabit aralık çizelgeleme problemi için takviyeli öğrenme ve genetik algoritmalar
9	Wolfe W.J., Sorensen S.E. (2000)	Yeryüzü gözlem sistemleri için üç çizelgeleme algoritması uygulaması
10	Kroon L.G., Salomon M. Wassenhove L. N. (1997)	Taktiksel sabit aralık çizelgeleme problemi için kesin ve yaklaşık çözüm veren algoritmalar
11	Bouzina K.I., Emmons H. (1996)	Özdeş makinelerde aralık çizelgeleme
12	Kron L.G., Salomon M., Van Wassenhove L. N.(1995)	Taktiksel sabit aralıklı çizelgeleme problemi için kesin ve yaklaşık çözüm veren algoritmalar
13	Kolen A.W.J.,Kroon L.G. (1994)	Uçak bakım sürecinde sabit iş çizelgeleme problemi
14	Kolen A.W.J.,Kroon L.G. (1992)	Lisans sınıf tasarımı: karmaşıklığı ve algoritması
15	Fischetti M., Martello S., Toth P., (1992)	Sabit iş çizelgeleme problemleri için yaklaşık algoritmalar
16	Dondeti V.R., Emmons H. (1992)	İki işlemcili sabit iş çizelgeleme
17	Kolen A.W.J.,Kroon L.G. (1991)	Maksimum sınıf (tür) çizelgelemenin hesaplama zorluğu
18	Fischetti M., Martello S., Toth P., (1989)	Çalışma zamanı kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemi
19	Fischetti M., Martello S., Toth P., (1987)	Yaygınlık zamanı kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemi
20	Arkin E.M., Silverberg E.B (1987)	Sabit başlama ve bitiş zamanlı atölye çizelgeleme

Bekki (2003) özdeş paralel makineler üzerinde, sabit iş çizelgeleme probleminin operasyonel versiyonunu çalışmıştır. Yazar, problemin NP-zor olduğunu göstermiştir. Bir  $O(m \log n)$  algoritması bütün hazırlık zamanlarının eşit olduğu özel durumlar için sağlamıştır. Ayrıca hızlı makine üzerindeki bütün işlerin işlem zamanlarının birine eşit olduğu özel durumlar için bir polinomial zaman algoritması geliştirmiştir. Genel problem için, öncelik ilişkilerini kullanan ve güçlü alt - üst sınır prosedürleri olan dal-sınır algoritması önermiştir.

Huang ve Lloyd (2003), maliyet kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Başla-

ma zamanı ve önealimsız bitirme zamanı olan  $n$  adet iş ele alınmış ve herhangi bir işin herhangi bir işlemcide yapılabilir olduğu kabul edilmiştir. Yazarlar; iki tür işlemci bulunduğu şebeke akışına dayalı algoritmaya, maliyet kısıtlı sabit iş çizelgeleme probleminin çözülebileceğini göstermişlerdir.

Santos ve Zhong (2001), işleyebilirlik kısıtlı ve minimum toplam maliyet hedefli taktiksel sabit iş çizelgeleme problemi için takviyeli öğrenme sistemini kullanan bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Önerdikleri algoritma, minimum maliyetli amaç fonksiyonu için en iyi değerlere ulaşmıştır.

Operasyonel sabit iş çizelgeleme problemi, dünya uydularının çizelgelenmesi olarak, Wolfe ve Sorensen (2000) tarafından uygulanmıştır. Yüzlerce uydu yörüngesi dünyadan gözlenmiş ve proses olarak yerden daha uzaklara verilerin gönderilmesi çizelgelenmiştir. Bir uydunun pozisyonları boyunca zeminden veri iletimi için bağlantı ihtiyacı duyduğunu ve özel bilgileri gönderdiğini, bununla beraber uyduda az sayıda iletişim cihazı olduğunu ve bağlantı için yeterli kapasite olmadığını kabul etmişlerdir. Uydu çatışmalarını çözmeye yardım etmek ve önceden inceleme yapmak için öncelikler sunmuşlardır.

Kroon ve diğerleri (1997) karmaşıklık bağlamında uygunluk kısıtlaması ile taktiksel sabit iş çizelgeleme problemi için karmaşık bir sınıflandırma sunmuşlardır. Makine sınıfı sayısı  $F \geq 4$  olduğunda, taktiksel hiyerarşik sınıf çizelgeleme için fizibilite probleminin NP-karmaşık olduğunu göstermişlerdir. Yazarlar problem için dal ve sınır algoritması geliştirmişlerdir. Algoritmanın, orta ölçekli problemler için etkili sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

Bouzina ve Emmons (1996), çalışma zamanı kısıtlı Operasyonel sabit iş çizelgeleme problemi üzerine çalışmışlardır. Yazarlar problemin işlem gören iş sayısını artırma hedefli, önealimli versiyonu ile ilgilenmişler, bir minimum maliyet ağ akış problemini en iyi şekilde çözecek çok değerlikli zaman algoritmasını önermişlerdir.

Kroon ve diğerleri (1995) özdeş durumlar için varyantlı operasyonel sabit iş çizelgelemede, bakım mühendisleri için, uçak bakım sürecinde kullanılmak üzere öncelikler tanımlamışlardır. Çalışmada, operasyonel sabit aralık çizelgeleme problemi; her biri sabit başlama zamanı, sabit bitirme zamanı, öncelik indeksi ve iş sınıfı olan birkaç işin çizelgelendirilmesi olarak karakterize edilmiştir. Çalışmada; pratikte gerçekleşen problemler tartışılmış ve operasyonel sabit aralık çizelgeleme probleminin çözümü için son zamanlarda geliştirilen kesin ve yaklaşılmış algoritmalar sunulmuştur.

Kolen ve Kroon (1994); havalimanlarında uçak bakım sürecinde ortaya çıkan sabit iş çizelgele-

me problemlerinin bir genellemesini yapmışlardır. Belirli sayıda işin, sabit bir başlangıç ve bitiş zamanında tamamlanması gerektiği ve bu işlerin belirli sayıda makinelerin bulunduğu özel bir vardiyada kesintisiz bir şekilde yapılması kısıtları altında problemi incelemişlerdir. Problem; her bir vardiyada işlerin tamamlanabilmesi ve makinelerin toplam maliyeti ile toplam makine sayısının minimum edilmesi için belirli sayıda makine seçimini zorunlu kılmıştır. Araştırmada, problemlerin hesaplama karmaşıklığının analizi yapılmıştır.

Kolen ve Kroon (1992) yaptıkları çalışmalarında, bir hava alanında, uçak bakımı sürecinde ortaya çıkan iş çizelgeleme problemini analiz etmişlerdir. Problem; belirli başlama ve bitirme zamanı ile belirli uçak türü olan belirli sayıda işin, yeterli sayıda mühendis tarafından yapılması olarak tanımlanmıştır. Özel işin yapılması için sadece uçak tipine uygun lisansı olan bir mühendise müsaade edilmesi göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca, “işler öne alınmaz bir şekilde gerçekleştirilmeli” ve “bir mühendis aynı zamanda en çok bir işi yapabilir”, kısıtları göz önünde bulundurulmuştur. Bütün işleri gerçekleştirmek için gereken minimum mühendis sayısını veya daha genel olarak mühendis kiralamak için minimum toplam maliyet, amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. Çalışmada problemlerin, lineer programlama ve şebeke akış algoritmalarının kombinasyonu ile çözülebilir olduğu gösterilmiştir.

Fischetti ve diğerleri (1992), sabit iş çizelgeleme probleminin çalışma zamanı ve yaygınlık zamanı kısıtları altında çok değerlikli zaman yaklaştırma algoritması önermişlerdir. Problem, NP-zor olduğunu belirlemişlerdir. Yazarlar, birkaç yaklaşılmış polinomial zaman algoritmaları için etkin uygulamalar ve bunların karmaşık ve en kötü durum performans analizini sunmuşlardır. Bütün algoritmaları, işlem zamanı ve çözüm kalitelerine göre karşılaştırmışlardır.

Dondeti ve Emmons (1992) iki işlemcili fakat üç tip işten oluşan sabit iş çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Bütün işlerin iki farklı işlemcide tamamlanması için minimal maliyet karışımı polinomial bir algoritma sunmuşlardır.

Kolen ve Kroon (1991), bir hava limanında uçak bakımında normal olarak ortaya çıkan sabit iş çizelgeleme probleminin birkaç genellemesini incelemişlerdir. Her iş grubundaki bir işin, herhangi bir makineye atanmasına müsaade edilmiştir. Bundan başka işlerin öne alımsız ve bir makinenin en çok bir iş yapacak şekilde çizelgenmesini planlamışlardır.

Fischetti ve diğerleri (1989), çalışma zamanı kısıtlı sabit iş çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Araştırmada, bir firmanın günlük servis ihtiyacını karşılayacak minimum, sürücü sayısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yazarlar, sabit iş çizelgeleme probleminin taktiksel versiyonunu, otobüs sürücüsü çizelgeleme problemine uygulamışlar ve problemi, çalışma zamanı kısıtlı sabit iş çizelgeleme olarak tanımlamışlardır. Problemin öne alımlı versiyonunu çözen bir  $O(n^2)$  algoritma sunmuşlardır. Aynı zamanda en iyi amaç fonksiyonu değerinin,  $O(n \log n)$ , bulunabileceğini ispatlamışlardır.

Sabit iş çizelgeleme probleminde literatürde yaygınlık zamanı kısıtlaması üzerine bir diğer çalışmada, Fischetti ve diğerleri (1987) yapmışlardır. Yazarlar, sürücülerin yayılma zamanı kısıtlı otobüs sürücüsü çizelgeleme konusuyula ilgilenmişlerdir. Otobüs sürücüsü çizelgeleme problemini; minimum maliyetle çizelgeyi yerine getirecek şoför grubunun belirlenmesi şeklinde ifade etmişlerdir. Problemin öne alımlı versiyonunu en iyi şekilde çözen bir  $O(n \log n)$  algoritması sunmuşlardır. Dal sınır algoritması, problemin çözümü için tanımlanmış ve iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Arkin ve Silverberg (1987) Sabit başlama ve bitiş zamanlı atölye çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Özdeş  $k$  adet makinede tamamlanan iş sayısını maksimize edecek bir algoritma önermişlerdir. Ayrıca problemin NP-Karmaşık olduğunu göstermişlerdir.

### **Sabit iş çizelgeleme problemlerinin meta sezgisel yöntemler ile çözümü**

Sabit iş çizelgeleme problemleri, NP-zor kapsamında yer almakta olup henüz optimum çözümleri bulunamamıştır. Bu tip problemlerde

optimum çözüme ulaşabilmek için birçok sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, klasik ve meta sezgisel olmak üzere sınıflandırılabilir. Meta sezgisel yöntemlerin, sabit iş çizelgeleme problemlerinde çok sınırlı kullanıldığı bilinmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde, operasyonel sabit iş çizelgeleme problemlerinin, meta sezgisel yöntemlerden olan genetik algoritmalar ve tavlama benzetimi ile çözümü için bir model önerilmiştir. Örnek bir problem, Genetik algoritma ve tavlama benzetimi ile çözümlenmiş, elde edilen sonuçlar, literatürde bilinen Bouzina ve Emmons (1996) algoritması ile karşılaştırılmıştır.

#### **Genetik algoritma**

Genetik algoritmalar, doğal seçim ilkelerine dayanan bir arama ve optimizasyon yöntemi olarak ifade edilmektedir. Temel ilkeleri John Holland tarafından ortaya atılmış olan genetik algoritmalar hakkında birçok bilimsel çalışma yayınlanmıştır. Genetik algoritmaların, fonksiyon optimizasyonu, çizelgeleme, mekanik öğrenme, tasarım, hücresel üretim gibi alanlarda başarılı uygulamaları bulunmaktadır. Geleneksel optimizasyon yöntemlerine göre farklılıkları olan genetik algoritmalar, parametre kümesini değil kodlanmış biçimlerini kullanırlar. Olasılık kurallarına göre çalışan genetik algoritmalar, yalnızca amaç fonksiyonuna gereksinim duyar. Çözüm uzayının tamamını değil belirli bir kısmını tararlar. Böylece, etkin arama yaparak çok daha kısa bir sürede çözüme ulaşırlar (Goldberg, 1989). Diğer bir önemli üstünlükleri ise çözümlerden oluşan popülasyonu, eş zamanlı incelemeleri ve böylelikle yerel en iyi çözümlere takılmamalarıdır.

Genetik Algoritmalarda kullanılan operatörler, var olan popülasyon üzerine uygulanan işlemler olarak tanımlanabilir. Bu işlemlerin amacı daha iyi özelliklere sahip yeni nesiller üretmek ve aranan en iyi çözüm alanını genişletmektir. Farklı uygulamalarda farklı operatörler kullanılmakla birlikte genelde üç standart operatör kullanılmaktadır. Bu operatörler:

1. Üreme Operatörü
2. Çaprazlama Operatörü

### 3. Mutasyon Operatörü

Birçok alanda uygulama imkânı ve uygulamaları olan genetik algoritmaların işlem adımları aşağıdaki gibi açıklanabilir (Engin, 2001).

- Arama uzayındaki tüm mümkün çözümler dizi olarak kodlanır.
- Genellikle rastsal bir çözüm kümesi seçilir ve başlangıç popülasyonu olarak kabul edilir.
- Her bir dizi için bir uygunluk değeri hesaplanır, bulunan uygunluk değerleri dizilerin çözüm kalitesini gösterir.
- Bir grup dizi belirli bir olasılık değerine göre rastsal olarak seçilip çoğalma işlemi gerçekleştirilir.
- Yeni bireylerin uygunluk değerleri hesaplanarak, çaprazlama ve mutasyon işlemlerine tabi tutulur.
- Önceden belirlenen kuşak sayısı boyunca yukarıdaki işlemler devam ettirilir.
- İterasyon, belirlenen kuşak sayısına ulaşıncaya kadar işlem sona erdirilir.
- Amaç fonksiyonuna göre en uygun olan dizi seçilir.

#### Tavlama benzetimi

Tavlama, katı metalin eritilmesi ve takip eden soğutma işlemi neticesinde uygun kristalleşme sonucunda en iyi kafes yapısını elde etmeyi amaçlayan fiziksel bir işlemdir. Bu işlem süresince katı metalin serbest enerjisi azaltılmaya çalışılır (Aarts ve Jan, 1989). Tavlama benzetimi, 1980'li yılların başında çıkmış; iterasyon geliştirmeye dayalı ve katı hal fiziğinin istatistikî teknikler ile doğal bir analogi oluşturmasıyla çıkartılmış sezgisel bir optimizasyon tekniğidir (Ogbu ve Smith, 1990). Tavlama benzetiminin temeli, 1953 yılında Metropolis tarafından geliştirilen, metalin bir ısıtma banyosundaki soğutma işlemi simülasyonuna dayanmaktadır. Otuz yıl sonra, Kirkpatrick bu simülasyonun, optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılabileceğini belirlemiştir.

Tavlama algoritması çalışma prensibi olarak, Lokal arama metoduna benzer. Lokal arama metodunun en büyük dezavantajı, global opti-

num yerine lokal optimum bulmasıdır. Tavlama benzetimi, bu olumsuzluğu ortadan kaldırır. Kontrol parametrelerine (sıcaklık) bağlı olarak, komşuluk değerlerindeki maliyet fonksiyonu değişimini kabul eder.

Algoritma adımları (Anonim, 2000):

ADIM1: Rastsal olarak yada seçilmiş bir çözüm kümesini, başlangıç çözümü olarak kabul et,  $S_0$  ;

ADIM2: Başlangıç çözümüne en iyi çözüm olarak,  $S$  ata,  $S^* = S$ ,

ADIM3: Başlangıç Çözümünün maliyet fonksiyonunu hesapla,  $S: C(S)$  ;

ADIM4: Başlangıç sıcaklığı,  $T_0$  belirle,

ADIM5: Başlangıç sıcaklığını,  $T$  değerine ata,  $T = T_0$  ;

ADIM6: Durma kriteri gerçekleşmedi ise, aşağıdaki işlemleri gerçekleştir,

a) Markov zinciri uzunluğunu belirle,

i. Mevcut  $S$ , çizelgesinde rastsal bir komşuluk aralığı,  $S'$  belirle, ( $S' \subset NS$ )

ii.  $S'$  için  $C(S')$  maliyet fonksiyonunu hesapla,

iii. Bir önceki çizelge ile mevcut çizelgenin maliyet fonksiyonlarının farkını al,

$$\Delta(C) = C(S') - C(S),$$

iv. Eğer  $\Delta(C) \leq 0$  ise, b.) adıma geri dön,  $S=S'$  kabul et,

$$C(S) < C(S^*) \text{ dan } S^*=S \text{ ata}$$

v.  $\Delta(C) > 0$  ise, adım 6.a)'ya geri dön ve  $x$  gibi (0,1) Aralığında bir rastsal sayı üret, eğer

$$X < e^{-\frac{\Delta(C)}{T}} \text{ ise } S=S' \text{ ata}$$

b)  $T$  sıcaklığını azalt Adım 6'a dön

ADIM7: En iyi çizelge,  $S^*$ , oluştur ve dur.

Teorik olarak, tavlama benzetiminin çalışma prensibi, markov zincirlerinin modellenmesi ile elde edilir. Mevcut bir durumdan, başka bir duruma hareket olasılığı, matris formları ile ve  $i$ . çözümden,  $j$ . çözüme, sıcaklık sabitine bağlı olarak  $P_{ij}$  homojen markov zinciri olarak bilinir. Tavlama benzetiminde, sıcaklık sabit değildir, belirli bir iterasyona göre azaltılır. Sıcaklık pa-



rametresinin azaltılması, çözüme ulaşılmada önemli bir parametredir.

**Örnek problem:**

15 adet işin 3 özdeş paralel makinede çizelgenmesi ile ilgili problemin sabit geliş ve sabit teslim zamanları ile iş ağırlıkları Tablo 2’de verilmiştir.

Örnek problem, öncelikle literatürde bilinen Bouzina ve Emmons (BE) (1996) algoritması yardımıyla çözülmüştür. Daha sonra aynı örnek Genetik Algoritma (GA) ve Tavlama Benzetimi (TB) yardımıyla çözümlenerek elde edilen her üç sonuç karşılaştırılmıştır. Problemin GA, TB ve BE ile çözümü için, delphi programlama dilinde yazılım gerçekleştirilmiştir. Örnek problem her üç yöntem için, Intel Pentium IV, 1.7 işlemcili 128mb Ddram özellikli bilgisayar yardımıyla çözülmüştür.

**Bouzina ve Emmons algoritması**

Algoritmanın işlem adımları aşağıda sunulmuştur (Bouzina ve Emmons, 1996).

Adım1.  $S=\emptyset$

Adım2. İşleri, geliş zamanlarına göre kronolojik olarak sırala,

Adım3. Sıralı işleri hesaba al. Her hazırlık zamanında  $S$  kümesine işi ilave et. Eğer, işin hazırlık zamanında hiçbir makine kullanılabilir değilse,  $S$  kümesinden en son teslim tarihli işi kaldır.

Problem, BE algoritması’na göre çözüldüğü takdirde; çizelgelenecek işler kümesinin  $S=\{1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 13, 15\}$ , Toplam Ağırlık  $\sum w_j=64$  ve (maksimum tamamlanma zamanı)  $C_{max}= 40$  olduğu görülür. Şekil 1, örnek problemin Bouzina ve Emmons Algoritması (1996) ile çözümünün Gantt diyagramını göstermektedir.

**Genetik algoritma**

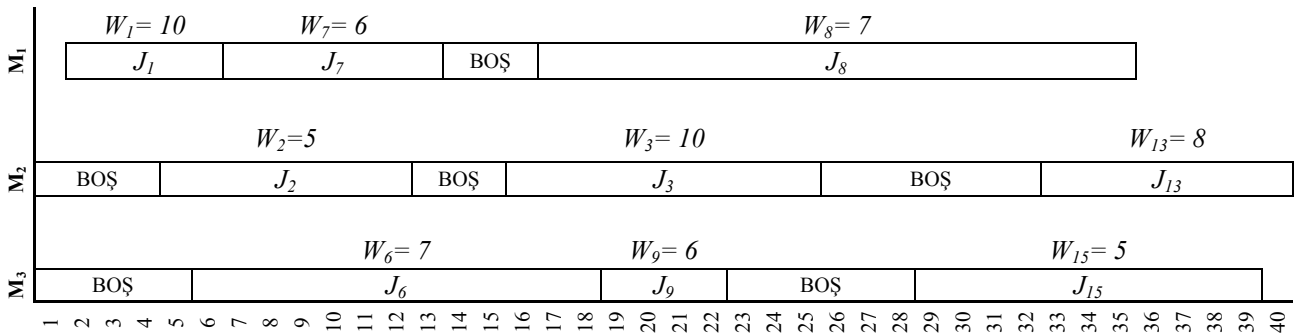
Aynı problem, genetik algoritma ile çözülmüştür. Bu çözüme göre; çizelgelenecek işler kümesinin  $S=\{1, 3, 4, 7, 10, 12, 13, 14, 15\}$ , Toplam Ağırlık  $\sum w_j=72$  ve (maksimum tamamlanma zamanı)  $C_{max}=40$  olduğu görülür. Şekil 2’de örnek problemin genetik algoritma ile çözümünün Gantt diyagramı sunulmuştur.

**Tavlama benzetimi algoritması**

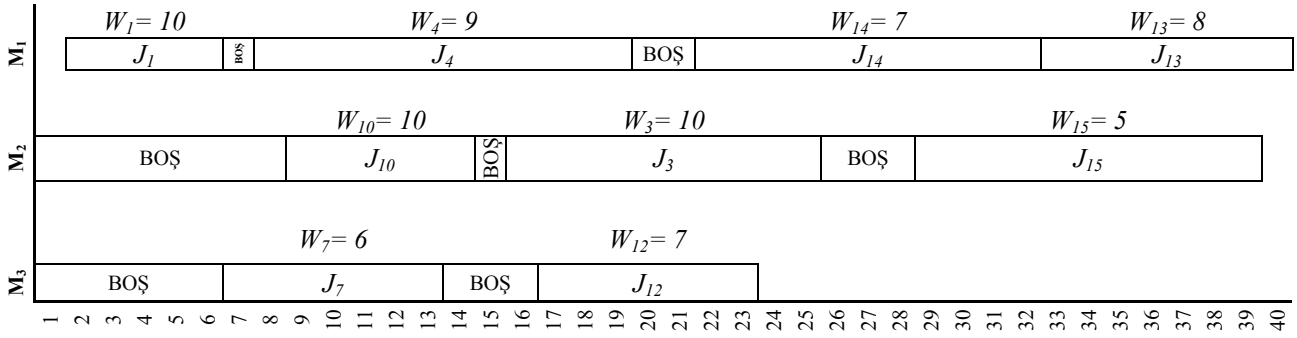
Örnek problem, tavlama benzetimi ile çözüldüğünde çizelgelenecek işler kümesinin,  $S=\{1, 3, 6, 7, 8, 10, 13, 14, 15\}$ , Toplam Ağırlık  $\sum w_j=70$  ve (maksimum tamamlanma zamanı)  $C_{max}= 40$  olduğu Şekil 3’te gösterilmiştir.

Tablo 2. Örnek problem verileri

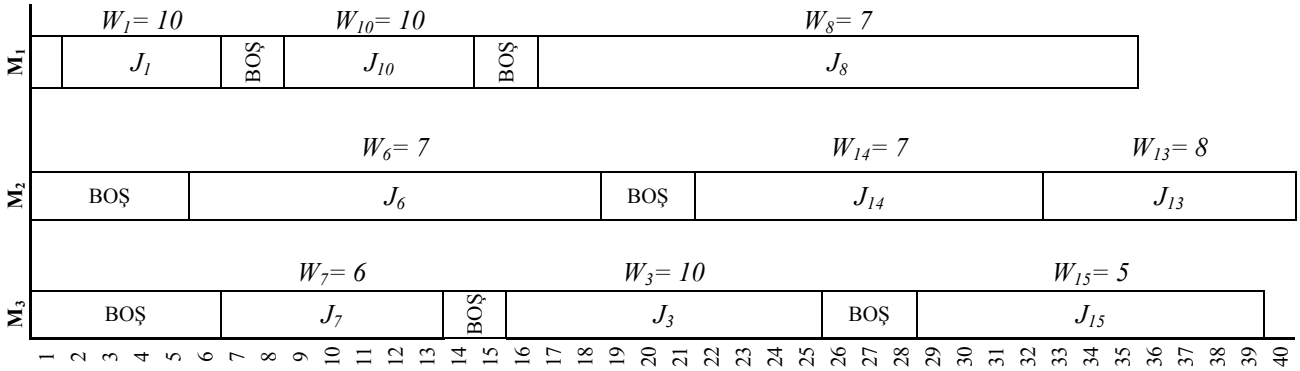
İşler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Geliş Zamanı ( $r_i$ )	1	4	15	7	11	5	6	16	18	8	7	16	32	21	28
Teslim Zamanı ( $d_i$ )	6	12	25	19	30	18	13	35	22	14	25	23	40	32	39
İş Ağırlıkları ( $w_j$ )	10	5	10	9	8	7	6	7	6	10	8	7	8	7	5



Şekil 1. Örnek problemin BEA ile çözümünün gantt diyagramında gösterimi



Şekil 2. Örnek problemin genetik algoritma ile çözümünün gantt diyagramında gösterimi



Şekil 3. Örnek problemin tavlama benzetimi ile çözümünün gantt diyagramında gösterimi

Operasyonel sabit iş çizelgeleme problemlerinin, GA, TB meta sezgisel yöntemleri yardımıyla çözümünde elde edilen sonuçlar yukarıda sunulmuştur. Öncelikle, örnek problem, literatürde bilinen, BE algoritması ile çözülmüştür. Her üç yöntem için elde edilen sonuçlar aşağıda Tablo 3’de özetlenmiştir.

Tablo 3 Meta sezgisel yöntemlerin kıyaslanması

Yöntemler	Toplam Ağırlık	$C_{max}$
GA	72	40
TB	70	40
BE	64	40

Tablo 3’de görüleceği gibi, operasyonel sabit iş çizelgeleme problemlerinde, toplam ağırlık değerleri, literatürde performans kriteri olarak kabul edildiğinde, önerilen her iki meta sezgisel (GA ve TB) metodun, klasik yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

## Sonuçlar

Sabit iş çizelgeleme probleminde; belirli sayıda işler, sabit bir başlama ve bitiş zamanı arasında, paralel özdeş makineler üzerinde, öne alımsız ve aralıksız işlem görmesi gerekir.

Literatürdeki çalışmalarda sabit iş çizelgeleme problemi, amaç fonksiyonuna göre iki grupta sınıflandırılmaktadır. Birinci grup, operasyonel sabit iş çizelgeleme problemi olarak isimlendirilir. İkinci grup, taktiksel sabit iş çizelgeleme problemi olarak bilinir.

Hizmet ve üretim ortamlarında sık kullanım alanları bulan sabit iş çizelgeleme problemi, rezervasyon sistemleri ve bazı gerçek yaşam uygulamaları için tipik bir örnek olup, sınıf atama, taşıma sistemleri ve kaydırma çizelgeleme gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Araştırmacılar, sabit iş çizelgeleme problemlerinin genelde taktiksel versiyonu üzerinde çalışma yapmışlardır. Pratik önemine rağmen, operasyonel sabit iş çizelgeleme problemi üzerinde yapılan çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır.

Sabit iş çizelgeleme problemleri NP kapsamında yer almakta olup henüz optimum veya optimuma yakın çözümleri bulunamamıştır. Bu tip problemlerde optimum çözüme ulaşabilmek için bir çok sezgisel yöntemler kullanılabilir. Bu tür problemlerin çözümü için genetik algoritma ve tavlama benzetimi gibi meta sezgisel yöntemlerin kullanılmasıyla optimum ve/veya optimuma yakın çözümler elde edilebileceği belirlenmiştir.

Sabit iş çizelgeleme problemlerinin pratik önemine rağmen literatür de yeteri kadar çalışma yapılmadığı görülmüştür. Sabit iş çizelgeleme ve optimuma yakın çözümlerin bulunması ile ilgili çalışma yapılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- Aarts, E., Jan, K.,(1989). Simulated annealing and boltzman machines, *John Wiley Sons pres*, England.
- Arkin, E.M., Silverberg, E.B., (1987). Scheduling jobs with fixed start and end times, *Discrete Applied Mathematics*, **18**, 1- 8.
- Anonim, Simulated Annealing Techniques, (2000). Available from:<http://informatics.org>.
- Bekki Ö.B., (2003). Fixed job scheduling on uniform parallel machines, *Ms Thesis*, Department of Industrial Engineering, Metu, Ankara.
- Bouzina K.I., Emmons H., (1996). Interval scheduling on identical machines, *Journal of Global Optimization*, **9**, 379-393.
- Dondeti, V.R., Emmons, H., (1992). Fixed job scheduling with two types of processors, *Operations Research*, **63**, 432- 444.
- Eliyi D T., (2004). Operational fixed job scheduling problem, *A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University*, Ankara.
- Eliyi D.T., Azizoğlu M., (2004). Sabit iş çizelgeleme problemi literatür değerlendirmesi, *YA/EM'2004 - Yöneyem Araştırması/Endüstri Mühendisliği - XXIV Ulusal Kongresi*, Gaziantep.
- Eliyi D.T., Azizoğlu M., (2006). Spread time considerations in operational fixed job scheduling, *International Journal of Production Research*, **44**, 20, 4343-4365.
- Engin O., (2001). Akış tipi çizelgeleme problemlerinin genetik algoritma ile çözüm performansının arttırılmasında parametre optimizasyonu, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yayınlanmamış Doktora Tezi*.
- Fischetti M., Martello S., Toth P., (1992). Approximation algorithms for fixed job schedule problems, *Operations Research Society of America*, **40**, 96-108.
- Fischetti M., Martello S., Toth P., (1987). The fixed job schedule problem with spread-time constraints, *Operations Research*, **35**, 849-858.
- Fischetti M., Martello S., Toth P., (1989). The fixed job schedule problem with working -time constraints, *Operations Research*, **37**, 395-403.
- Garcia J. M., Benitez R.R., Eguial I., Canca D., (2005). Graph-based heuristic for solving the operational fixed job scheduling problem, *35th International Conference on Computers And Industrial Engineering*.
- Garcia J.M., Lozano S., (2004). Production and vehicle scheduling for ready-mix operations, *Computers & Industrial Engineering*, **46**, 803-816.
- Goldberg D.E., (1989). Genetic algorithms in search, *Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, USA.
- Huang Q., Lloyd E., (2003). Cost constrained fixed job scheduling, *Utstarcom Inc. 33 Wood Ave. South, Iselin, Nj, U.S.A*, 111-124.
- Kolen A.J.W., Kroon L.G., (1994). An analysis of shift class design problems, *European Journal of Operational Research*, **79**, 417-430.
- Kolen A.J.W., Kroon L.G., (1992). License class design: Complexity and algorithms, *European Journal of Operational Research*, **63**, 432-444.
- Kolen A.J.W., Kroon L.G., (1991). On the computational complexity of (maximum) class scheduling, *European Journal of Operational Research*, **54**, 23-38.
- Kroon L.G., Salomon M., Van Wassenhove L.N., (1995). Exact and approximation algorithms for the operational fixed interval scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, **82**, 190-205.
- Kroon L.G., Salomon M., Van Wassenhove L.N., (1997). Exact and approximation algorithms for the tactical fixed interval scheduling problem, *Operations Research*, **45**, 624-638.
- Ogbu,F.A.,Smith,D.K.,(1990). The application of simulated annealing algorithm to the solution of the n/m/cmax flow-shop problem, *Computers Operations Research*, **17**, 3, 243-253, Great Britain.
- Santos E.J., Zhong X., (2001).Genetic algorithms and reinforcement learning for the tactical fixed interval scheduling problem, *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, **10**, 23-38.
- Wolfe W.J., Sorensen S.E., (2000). Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain, *Management Science*, **46**, 148-168.