

TUSAŞ-TÜRK HAVACILIK VE UZAY SANAYİİ A.Ş'DE PARALEL MAKİNALARDA ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

F. Nergis AKGÜL, M. Çağrı DÜZCE, Ozan ERDEM, Aslı KERİMOĞLU, Menekşe KOÇAK,
İsmail KARAOĞLAN, Fulya ALTIPARMAK*
*fulyaal@gazi.edu.tr

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, ANKARA

ÖZET

Bu projede, TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.'nin CNC Profil ve Parça İmalat Merkezi'ndeki sıra bağımlı hazırlık zamanının söz konusu olduğu paralel makinelerde çizelgeleme problemi dikkate alınmıştır. Problem için öncelikle karışık tamsayı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Dikkate alınan çizelgeleme probleminin bir NP-zor problem olması ve çizelgenecek iş gruplarının en az 50 ya da daha fazla işten oluşması nedeniyle CPLEX gibi bilinen çözücüler ile eniyi çözüme ulaşmak mümkün değildir. Bu nedenle, makul zaman dilimleri içerisinde eniyi ya da eniyiye yakın iş çizelgelerini elde edebilmek için tavlama benzetimi (TB) algoritmasına dayalı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın performansı, çözüm kalitesi açısından çok başlangıçlı yerel arama algoritması ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Küçük boyutlu test problemlerinde her iki algoritma aynı performansa sahipken, büyük boyutlu test problemlerinde TB algoritmasının daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Ayrıca, geliştirilen sezgisel algoritma ile bütünlük çalışan bir arayüz tasarlanmıştır. Bu arayüz ile firma veri tabanından çizelgenecek iş listelerinin çekilmesine dayalı olarak istasyon bazında iş çizelgelerinin oluşturulması sağlanmıştır.

Anahtar sözcükler: Paralel makinelerde çizelgeleme, sıra bağımlı hazırlık zamanı, karışık tamsayı doğrusal programlama, tavlama benzetimi, çok başlangıçlı yerel arama algoritması

A SOLUTION APPROACH FOR PARALLEL MACHINE SCHEDULING PROBLEM IN TAI-TURKISH AEROSPACE INDUSTRIES INC.

ABSTRACT

In this project, a parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times in the CNC Profile and Part Manufacturing Center of Turkish Aerospace Industries, Inc. has been considered. Firstly, a mixed integer linear programming model is developed for the problem. Since the problem is an NP-hard problem and the job groups to be scheduled consist of 50 or more jobs, it is not possible to obtain optimal solution with well known solvers such as CPLEX for the problem. Therefore, in order to obtain optimal or near optimal schedules in an acceptable time period, a heuristic algorithm based on simulated annealing (SA) algorithm is developed. The performance of the developed algorithm is comparatively investigated using multi start local search algorithm in terms of solution quality. While both algorithms have same performance for small-size problems, SA algorithm exhibits better performance than multi start local search algorithm for large-size problems. Moreover, an interface integrated with the developed heuristic algorithm is designed. By means of the interface, schedules for the jobs drawn from the database of firm for each station are obtained.

Keywords: Parallel machine scheduling, sequence dependent setup times, mixed integer linear programming, simulated annealing, multi start local search algorithm

* İletişim yazarı

Galatasaray Üniversitesi tarafından düzenlenen 28. Yöneyem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresinde Öğrenci Proje Yarışması düzenlenmiştir. Bu yarışmada üçüncülük ödülü kazanan çalışmayı ilgili öğretim üyesinin de katkılarıyla düzenlenmiş haliyle yayın politikası doğrultusunda yayınlıyoruz.

1. GİRİŞ

Çizelgeleme, üretim ve hizmet sistemlerinde oldukça önemli rol oynayan bir karar verme yaklaşımıdır. Günümüzde gittikçe gücünü daha çok hissettiren rekabetçi koşullar, firmalar için kaynaklarını etkin bir biçimde kullanma zorunluluğunu da beraberinde getirmiştir. Dolayısıyla, firmalar pazardaki varlıklarını sürdürebilmek için faaliyetlerini planlamak, üretim ve hizmet organizasyonlarında etkin çizelgeleri oluşturmak zorundadırlar.

Dünyadaki son teknolojik gelişmeleri yakından izleyerek havacılık alanında öncü kuruluşlar arasında yer almaya kararlı olan TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., Türkiye’de insanlı ve insansız hava platformlarının tasarımı, geliştirilmesi, modernizasyonu, imalatı, entegrasyonu ve satış sonrası hizmetleri alanlarında faaliyet göstermektedir. 15 Mayıs 1984 tarihinde kurulan TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., 186.000 metrekaresi kapalı olmak üzere toplam 500.0000 metrekarelik bir alanda faaliyet göstermektedir. Şirketin Akıncı-Ankara’da bulunan yüksek teknoloji ürünü makine ve teçhizatla donatılmış modern uçak üretim tesisi, parça imalatından uçak montajı, uçuş testleri ve teslimine kadar son derece geniş üretim kabiliyetlerine sahiptir. Firmanın hedeflerine ulaşabilmesinde, faaliyetlerinin etkin bir biçimde planlanması önemli rol oynamaktadır.

Bu projede, TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.’nin Sayısal Kontrollü (NC) Talaşlı İmalat Atölyesi’nde yer alan CNC Profil ve Parça İmalat Merkezi’ndeki sıra bağımlı hazırlık zamanlı paralel makinelerde çizelgeleme problemi dikkate alınmıştır. Problem için sistemin özelliklerini de dikkate alan bir karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Dikkate alınan çizelgeleme problemi NP-zor problemler sınıfında yer aldığı için, makul zamanlarda eniyi ya da eniyiye yakın çözümleri elde edebilmek amacıyla tavlama benzetimine dayalı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca, geliştirilen sezgisel algoritma ile bütünleşik çalışan bir arayüz tasarlanmıştır.

Makalenin ikinci bölümünde problemin belirlenmesi ve literatür araştırması, üçüncü bölümünde problem için geliştirilen matematiksel model, dördüncü bölümünde problemin çözümü için tavlama benzetimi algoritmasına dayalı olarak geliştirilen sezgisel algoritma yer almaktadır. Beşinci bölümünde, geliştirilen algoritmanın performansının değerlendirilmesi amacıyla yapılan deneysel çalışma, altıncı bölümde tasarlanan arayüz verilmektedir. Yedinci bölümde ise sonuç ve değerlendirme yer almaktadır.

2. PROBLEMİN BELİRLENMESİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, mevcut sistem incelenerek problemin belirlenmesi ve bu problemin çözümüne yönelik literatür araştırması yer almaktadır.

2.1. Mevcut Sistemin İncelenmesi ve Problemin Belirlenmesi

Bu proje, TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.’deki Sayısal Kontrollü (NC) Talaşlı İmalat Atölyesi’nde yer alan CNC Profil ve Parça İmalat Merkezi’nde yürütülmüştür. Sistemdeki CNC tezgâhları, farklı özelliklerdeki profillerden kenar kesme ve delme işlemleri ile uçak yapısal parçalarının imalatı için kullanılmaktadır.

İlgili merkezde, “ekstrüzyon işleme” için 4 adet yüksek hızlı CNC tezgâh bulunmaktadır. Tüm tezgâhlar, merkeze gelen herhangi bir parçayı işleyebilme kabiliyetine sahiptir. Ancak işlenecek parçalar teknoloji kısıtları nedeniyle farklıdır. Bu nedenle sistemdeki dört tezgâh kendi içlerinde özdeş, tek aşamalı ve paralel olan iki farklı istasyon hâline dönüşmüştür.

Sistemde uygulanan hazırlık faaliyetleri, kesici takım değişimi ve çene değişimi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bir tezgâhta kesici takım değişimi nadir olarak yapılırken, işten işe çene değişimi söz konusu olabilmektedir. Ayrıca, ilgili tezgâhta çene değişim zamanı, her bir iş bazında kendisinden önce işlenen işin profil tipinden etkilenmektedir. Dolayısıyla,

sistemde sıra bağımlı hazırlık zamanı söz konusudur. Sistemde 538 tip profilin işlendiği dikkate alındığında, çene değişimi oldukça sık karşılaşılan bir hazırlık işlemidir. İlgili sistemde dikkate alınması gereken bir diğer durum ise iş gruplarıdır. Sistemde, hurdaların en azlanması amacıyla önceden yapılan çalışmalar doğrultusunda işler için çeşitli gruplar oluşturulmuştur ve bu gruplara ait işlerin ardışık olarak üretilmesi istenmektedir.

Mevcut sistemde, iş çizelgeleri ilgili çalışan tarafından sezgisel olarak oluşturulmaktadır. Bir iş çizelgesinin elde edilmesinde ilgili işler, A, X ve 1-2 gibi öncelik kriterleri ile işlerin teslim tarihine kalan gün sayıları ve atölyede bekleme zamanları göz önünde bulundurularak sistemdeki veri tabanından çekilmektedir. Bu şekilde oluşturulan iş çizelgesinde, hurdaların en azlanması amacıyla yapılan gruplar dikkate alınmamaktadır.

İşlerin çizelgenmesi aşamasında iş gruplarının göz önüne alınmaması, beklentileri istenilen düzeyde karşılayan bir çizelgenin elde edilememesine problemine ve operatörlerin inisiyatifinde gelişen iş sıralarının uygulanmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla, bu projede amacımız, firmanın isteklerini karşılamakta yetersiz kalan iş çizelgeleri yerine sistemdeki tüm faktörler göz önüne alınarak ilgili iş istasyonları için günlük iş çizelgelerini oluşturmaktır.

2.2. Literatür Araştırması

Çizelgeleme problemleri ile üretim ve hizmet sistemlerinin her alanında karşılaşılmaktadır (Pinedo, 2004). Üretim sistemlerindeki çizelgeleme problemleri literatürde, taleplerin oluş biçimi, çizelgeleme kriterleri, parametrelerin belirginlik düzeyi ve çizelgeleme ortamına göre sınıflandırılmaktadır. Çizelgeleme problemlerine ilişkin geliştirilen çözüm yöntemleri, analitik yaklaşımlar ve sezgisel yaklaşımlar olmak üzere iki farklı sınıf altında toplanmaktadır. Sezgisel yaklaşımlar ise probleme özgü sezgisel yaklaşımlar ve genel amaçlı sezgisel yaklaşımlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Çizelgeleme problemleri, NP-zor problemler sınıfında yer almaktadır (Pinedo, 2004). Bu tür problemlerin çözümünde ise son yıllarda tavlama benzetimi, genetik algoritmalar, tabu arama, karınca kolonileri eniyilemesi, yapay sinir ağları, vb. genel amaçlı sezgisel yaklaşımlardan yararlanıldığı görülmektedir.

Tablo 1’de, sıra bağımlı hazırlık zamanlı paralel makinelerde çizelgeleme problemi için literatürdeki çalışmalar özetlenmiştir. Tablo incelendiğinde, çoğu çalışmada genel amaçlı sezgisel yaklaşımlara dayalı algoritmaların geliştirildiği görülmektedir.

3. PROBLEMİN MATEMATİKSEL MODELİ

Bu projede dikkate alınan problem, sıra bağımlı hazırlık zamanının söz konusu olduğu paralel makineli çizelgeleme problemidir. Performans ölçüsü olarak işlerin enbüyük tamamlanma zamanının (C_{max}) enazlanması dikkate alınmıştır.

Ele alınan çizelgeleme probleminde üretimin statik ortamda yapıldığı varsayılmaktadır. Statik ortamda makine sayısı, iş sayısı, işlem zamanları, teslim zamanları ve hazırlık zamanları önceden biliniyor ve sabittir. Tek aşamalı, özdeş iki paralel makine ve iki adet istasyon söz konusudur. Her bir istasyonda her biri tek işlem gerektiren $|N|$ tane iş çizelgeneyecektir. İşler, tek makine üzerinde kesintisiz olarak işlem görmekte olup, her makinede herhangi bir anda sadece tek bir işin işlemi yapılabilmektedir. Her bir istasyon bazındaki paralel makinelerde her i parçası için işlem zamanı aynıdır. Her bir işin işlem zamanı sıralamadan bağımsızdır. Makine hazırlık zamanları önceden bilinmektedir. Sistemde hurdanın enazlanmasını sağlamak amacıyla oluşturulmuş olan iş grupları bozulmamaktadır. Makinelerin çalışmaya başladıktan sonra arıza yapmadığı ve makinelere ilişkin teknoloji kısıtlarının bilindiği varsayılmaktadır. Bütün işler çizelgeleme dönemi başında hazırdır.

Tablo 1. Sıra Bağımlı Paralel Makineli Çizelgeleme Problemine İlişkin Literatür Taraması

YAZAR	PROBLEM	PERFORMANS ÖLÇÜSÜ	YÖNTEM
(Lee vd., 1995)	-Özdeş Paralel Makineler	$\Sigma(\alpha T_j)$	Üç Aşamalı Sezgisel Yöntem
(Sivrikaya vd., 1998)	-Özdeş Paralel Makineler	$w_E \Sigma E_j + w_T \Sigma T_j$	Genetik Algoritma
(Weng vd., 2001)	-Bağımsız Paralel Makineler	$\Sigma \alpha C$	Yedi farklı Sezgisel Algoritma
(Kim vd., 2002)	-Bağımsız Paralel Makineler	T_{max}	Tavlama Benzetimi
(Tamaki vd., 2003)	-Özdeş Paralel Makineler	$\Sigma(E_j + T_j)$	Tavlama Benzetimine Dayalı Melez bir Algoritma
(Ferretti, Esquivel, 2005)	-Özdeş Paralel	T_{max}, T_{ort}	Genetik Algoritma
(Nessah vd., 2006)	-Özdeş Paralel Makineler	$\Sigma w_i C_i$	Sezgisel Yöntem ve Dal Sınır Algoritması
(Nessah vd., 2005)	-Özdeş Paralel Makineler	ΣC_j	Sezgisel Yaklaşım ve Dal Sınır Algoritması
(Tahar vd., 2005)	-Özdeş Paralel Makineler	C_{max}	Sezgisel Algoritma
(Anghinolfi vd., 2006)	-Düzgün Paralel Makineler	ΣT_j	Tabu Arama ve Tavlama Benzetimine Dayalı Melez Bir Algoritma
(Omar, Teo, 2006)	-Özdeş Paralel Makineler	$\Sigma(E_j + e_j + T_j + r_j)$	Karışık Tam Sayılı Matematiksel Model
(Kim vd., 2006)	-Özdeş Paralel Makineler	ΣT_j	Tabu Arama Algoritması
(Logendran, vd., 2006)	-Özdeş Paralel Makineler	$\Sigma(\alpha T_j)$	Tabu Arama Algoritması
(Rabadi vd., 2006)	-Bağımsız Paralel Makineler	C_{max}	Rassallaştırılmış Öncelikli Arama Sezgiseli
(Rocha vd., 2006)	-Bağımsız Paralel Makineler	$R \lfloor S_{ijm} \rfloor C_{max} + \Sigma(w_i p_i)$	GRASP ve Dal Sınır Algoritması

3.1. Geliştirilen Matematiksel Model

Probleme ilişkin karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli, Rocha vd. (2006) tarafından önerilen matematiksel model dikkate alınarak geliştirilmiştir.

Notasyonlar:

- N , işlerin kümesi

- M , makinelerin kümesi
- R , işlerin atanabileceği pozisyonlar kümesi
- P_i , i . işin işlem zamanı
- S_{ij} , i işinden j işine geçişteki hazırlık zamanı
- d_i , i . işin teslim tarihi
- $F_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ işi ile } j \text{ işinin ardışık olarak işlenmesi gerekiyorsa} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$
- G , çok büyük bir sayı

Modele ilişkin karar değişkenleri:

- $X_{imr} = \begin{cases} 1, & i \text{ işi } m \text{ makinesinde } r. \text{ sırada işlenirse} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$
- $B_{ijmr} = \begin{cases} 1, & m \text{ makinesinde } i \text{ işi } r. \text{ sırada, } j \text{ işi } (r+1). \text{ sırada işlenirse} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$
- t_{mr} , m makinesinde r . pozisyondaki işin başlama zamanı
- V , en büyük tamlanma zamanı

Karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli:

Geliştirilen modelde amaç fonksiyonu (1), en büyük tamamlanma zamanını (C_{max}) en azlamaktadır. Kısıt (2), her işin bir makinede sadece bir pozisyona atanabilmesini sağlamaktadır. Kısıt (3), bir makinede bir pozisyona en fazla bir işin atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (4), i işi $(r-1)$. pozisyonda, j işi ise r . pozisyonda ve aynı makinede işlem görüyorsa, i işinden j işine geçişte hazırlık zamanının oluşmasını sağlamaktadır. Kısıt (5), m makinesinde r . pozisyondaki işin başlama zamanının belirlenmesini sağlamaktadır. Kısıt (6), her makine ve her pozisyon için r . pozisyonda iş varsa

Amaç fonksiyonu

$$Z_{\min} = V \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{m \in M} \sum_{r \in R} X_{imr} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} X_{imr} \leq 1 \quad \forall m \in M, \forall r \in R \quad (3)$$

$$B_{ijmr} \geq 1 - (2 - X_{imr} - X_{jm(r+1)})G \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall m \in M, \forall r \in R \quad (4)$$

$$t_{mr} \geq t_{m(r-1)} + \sum_{i \in N} X_{im(r-1)}P_i + \sum_{\substack{i \in N \\ j \in N \\ (i \neq j)}} B_{ijm(r-1)}S_{ij} \quad \forall m \in M, r = 2, \dots, |R| \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} X_{imr} \leq \sum_{i \in N} X_{im(r-1)} \quad \forall m \in M, r = 2, \dots, |R| \quad (6)$$

$$t_{mr} + P_i - G(1 - X_{imr}) \leq d_i \quad \forall i \in N, \forall m \in M, \forall r \in R \quad (7)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{r \in R} B_{ijmr} = 1 \quad \{\forall i, j \in N \mid F_{ij} = 1\} \quad (8)$$

$$X_{imr} = X_{jm(r+1)} \quad \{\forall i, j \in N \mid F_{ij} = 1\} \quad (9)$$

$$\forall m \in M, \forall r \in R$$

$$t_{mr} + \sum_{i \in N} X_{imr}P_i \leq V \quad \forall m \in M, \forall r \in R \quad (10)$$

$$X_{imr}, B_{ijmr} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall m \in M, \forall r \in R \quad (11)$$

$$t_{mr}, V \geq 0 \quad \forall m \in M, \forall r \in R \quad (12)$$

($r-1$). pozisyonunda iş olmasını sağlamaktadır. Kısıt (7), işlerin teslim tarihinden önce tamamlanmasını sağlamaktadır. Kısıt (8), $F_{ij} = 1$ ise i ve j işlerinin ardışık olarak işlenmesine ilişkin karar değişkeninin 1 değerini almasını sağlamaktadır. Kısıt (9), $F_{ij} = 1$ ise i ve j işlerinin aynı makineye ve ardışık olarak atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (10), tamamlanma zamanının, her makinede son pozisyondaki işin başlama zamanı ile o pozisyondaki işin işlem zamanının toplamından büyük ya da eşit olmasını sağlamaktadır. Kısıt (11) ve (12) ise işaret kısıtlarıdır.

3.2. Model Çözüm Sonuçları

Geliştirilen matematiksel modeli eniyi çözüme ulaşma zamanı açısından değerlendirmek amacıyla 7 ile 16 iş sayısına sahip 14 problem dikkate alınmıştır. Problemler, sistemin veri tabanındaki çizelgelenen iş listesi kullanılarak rassal olarak üretilmiştir. Problemlerin çözümünde, GAMS paket programındaki CPLEX 10.0 çözücü ve Pentium IV, 2.6 GHz özelliklerine sahip bilgisayar kullanılmıştır. Her bir problemin çözümü için 2 saatlik zaman kısıtı dikkate alınmıştır. Tablo 2’de her bir problemdeki iş sayısı, grup sayısı ve eniyi çözümün elde edilme

Tablo 2. Küçük Boyutlu Problemlerde CPLEX ile Çözüm Zamanları

İş Sayısı	Grup Sayısı	Çözüm Zamanı (saniye)
7	1	4,5
8	1	22,5
9	2	39,8
10	3	70,6
11	3	125,4
12	4	3856,2
13	-	7200,4*
13	1	7200,5*
13	2	7200,7*
13	3	3293,9
13	4	2267,9
14	4	2807,6
15	4	7200,6*
16	4	7200,7*

zamanı verilmektedir. Çözüm zamanlarındaki * işareti, 2 saat içerisinde ilgili probleme eniyi çözümün bulunamadığını göstermektedir. Tablo incelendiğinde, problemdeki iş sayısı arttıkça çözüm zamanının arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, aynı iş sayısına sahip problemlerde grup sayısı azaldıkça çözüm zamanı artmaktadır. Dikkate alınan sistemde çizelgelenen iş sayısı en az 50 ya da daha fazladır. Dolayısıyla, bu büyüklükteki problemler için CPLEX gibi çözücüler ile eniyi çözümü bulmak mümkün değildir. Bu nedenle, proje kapsamında ele alınan problemin çözümü için genel amaçlı sezgisel yöntem olan tavlama benzetimine (TB) dayalı sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir.

4. GELİŞTİRİLEN TAVLAMA BENZETİMİ ALGORİTMASI

Tavlama Benzetimi (TB), kombinatoriyal eniyileme problemlerinin çözümü için kullanılan ve katıların fiziksel tavlama sürecini taklit eden stokastik bir arama yöntemidir. Fiziksel tavlama, bir katının düşük enerjili durumlarının elde edilmesi sürecidir. Eritilen katının ısısının çok yavaş düşürülmesi ile katının düşük enerjili durumuna ulaşması sağlanır. Kirkpatrick ve arkadaşları (1983) katıların tavlama benzetimi için Metropolis (1953) tarafından sunulan metodun eniyileme problemlerinin çözümünde nasıl kullanılabileceğini göstermişlerdir.

TB yöntemi, yerel arama yöntemlerinin yerel bir minimuma ulaştıktan sonra küresel eniyi için daha fazla arama yapmamasından kaynaklanan eksikliğini gidermeye çalışan bir yöntemdir. TB bir istisnası dışında yerel arama yöntemindeki aynı temel adımları kullanır: mevcut çözümden (S) kullanılan bir hareket mekanizması ile yeni bir çözüm (S') elde edildiğinde amaç fonksiyonları arasındaki fark ($\Delta = f(S') - f(S)$) hesaplanır. Enküçükleme problemi için $\Delta \leq 0$ olduğunda S' , mevcut çözüm olarak kabul edilir. $\Delta > 0$ ise S' , $e^{-\Delta/T}$ olasılığı ile mevcut çözüm olarak kabul edilir. T , fiziksel tavlama sıcaklığı gösterir. Genellikle arama işlemine yüksek sıcaklık ile başlanır ve arama işlemi sırasında yavaş yavaş düşürülür. Bu strateji ile aramanın başlangıç aşamalarında amaç fonksiyonunda büyük artışların olduğu yeni çözümler

kabul edilirken, aramanın sonuna doğru (sıcaklık sıfıra yaklaşırken) sadece amaç fonksiyonunda iyileşme sağlayan çözümler kabul edilir. Böylece TB, aramanın başlangıç aşamalarında kötü çözümleri de kabul ederek arama uzayının çeşitli bölgelerinde aramayı gerçekleştirmekte ve yerel eniyi çözüme takılmayı önlemektedir.

Söz konusu çizelgeleme probleminin çözümü için TB'ye dayalı geliştirilen algoritma pm_TB olarak adlandırılmıştır. Bu bölümde, pm_TB'de kullanılan çözüm gösterimi, başlangıç çözümünün elde edilmesi, komşuluk yapısı ve soğutma çizelgesi detaylı olarak incelenecektir.

4.1. Çözüm Gösterimi

pm_TB'de bir çözümün gösterimi için, problemin özelliklerini dikkate alan bir kodlama yapısı kullanılmıştır. Firmada geçmişte yapılmış olan çalışmalarda hurdaların azaltılması amacıyla aynı çeneleri kullanan işlerden oluşturulan iş gruplarının, teslim tarihi de dikkate alınarak ardışık olarak üretilmesi istenmektedir. Bu kapsamda çözüm aşamasında grup kodu olan ve aynı koda sahip olan

kodlama yapısı kullanılmaktadır. Üçüncü bölüm ise yalnızca bilgi amaçlı kullanılmakta ve iş gruplarının kullanacağı üst çene, yan çene ve sabit çene tiplerine ilişkin bilgileri yapısında bulundurmaktadır. 5 iş grubunun 2 paralel makinenin söz konusu olduğu bir problem için örnek kodlama Şekil 1'de verilmektedir. Bu kodlamanın birinci ve ikinci bölümü değerlendirildiğinde, 1. makinede sırasıyla 1, 3 ve 2 numaralı iş grupları, 2. makinede ise sırasıyla 4 ve 5 numaralı iş grupları işlenecektir. Üçüncü bölümde ise iş gruplarının kullandığı çene tiplerine ilişkin bilgiler yer almaktadır.

4.2. Başlangıç Çözümünün Elde Edilmesi

TB'de başlangıç çözümleri rassal olarak elde edilebileceği gibi sezgisel yöntemler yardımıyla da elde edilebilmektedir. pm_TB'de başlangıç çözümü, çizelgeleme literatüründe çok iyi bilinen dağıtım kurallarından birisi olan enbüyük işlem zamanı (longest processing time-LPT) sezgiseli ile elde edilmiştir. LPT, paralel makine çizelgeleme problemlerinde bölünemeyen işler söz konusu olduğunda en uzun işlem süreli iş grubunu boş süresi büyük olan makineye atayan bir sezgisel yöntemdir.

Gruplar	Makineler	Çeneler
[1 3 4 2 5]	[1 1 2 1 2]	[Ü1 Ü3 Ü4 Ü2 Ü5 Y1 Y3 Y4 Y2 Y5 S1 S3 S4 S2 S5]

Şekil 1. 5 işli 2 paralel makineli problem için çözüm gösterimi

işler, aynı iş grubuna dahil olmakta ve gruptaki işlerin işlem zamanları toplamı bu grubun işlem zamanını vermektedir. Grup kodu olmayan işler ise tek işli bir grup gibi düşünülmektedir. Bu özellik dikkate alınarak tanımlanan kodlama yapısı 3 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde permütasyon kodlama kullanılmıştır. Bu bölümde, ilgili iş gruplarının hangi makinede işlendiğine bakılmaksızın bir sırası verilmektedir. İkinci bölümde, söz konusu grupların hangi makinede işleneceğini gösteren tamsayı

4.3. Komşu Çözümlerin Üretilmesi

TB'nin bir problemin çözümünde kullanılabilmesi için öncelikle mevcut çözümden yeni çözümü üreten bir komşu üretim mekanizmasının tanımlanması gerekir. Bu çalışmada, permütasyon kodlamanın kullanıldığı birinci bölümünde literatürdeki komşu üretim mekanizmalardan ikili yer değiştirme (swap) ve yerleştirme (insert), tamsayı kodlamanın kullanıldığı ikinci bölümde ise rassal değiştirme ve ikili yer değiştirme mekanizmaları kullanılmıştır. Algoritmanın

her iterasyonunda, mevcut çözümden bu hareket mekanizmaları ile dört komşu üretilmektedir. Permütasyon kodlamanın kullanıldığı birinci bölümde komşuların üretilmesi aşamasında iş grupları yer değiştirirken ilgili işlerin çene bilgilerinin de aynı zamanda hareketi sağlanmaktadır. Algoritmada kullanılan dört hareket mekanizması kısaca aşağıda açıklanmaktadır:

Permütasyon Kodlamada Çiftli Yer Değiştirme Mekanizması

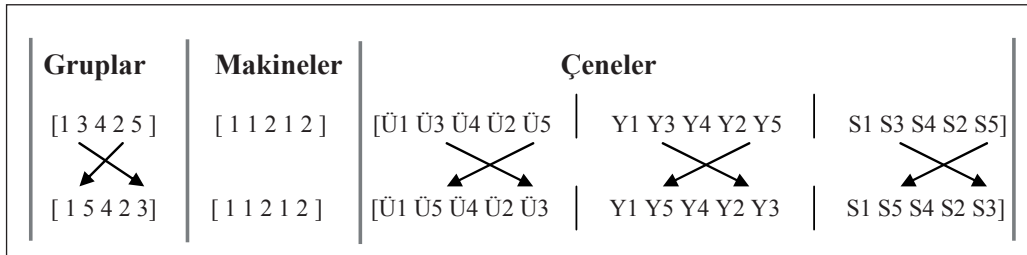
Bu mekanizmada, mevcut iş grupları çizelgesinden rassal seçilen iş grup çifti yer değiştirirken makineler çizelgesindeki pozisyonlarında bir değişiklik olmaz. Ancak, yer değiştiren iş grup çifti ile ilgili çene bilgilerinde de gerekli düzenleme yapılır. Bu mekanizmaya bir örnek Şekil 2’de verilmektedir.

Permütasyon Kodlamada Yerleştirme Mekanizması

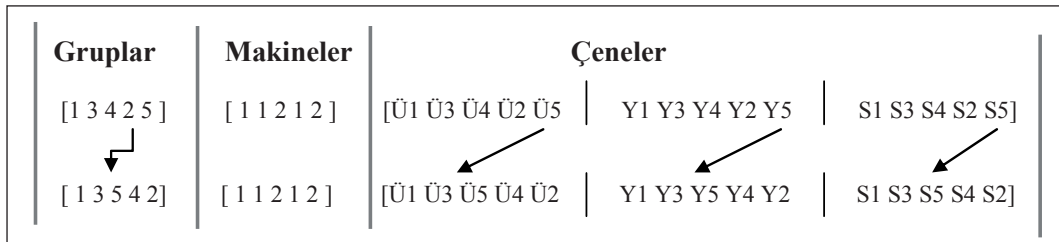
Bu mekanizmada gruplar çizelgesinden rassal seçilen bir grup, rassal seçilen bir pozisyona yerleştirilirken makineler çizelgesinde bir değişiklik yapılmaz. Bu mekanizma ile seçilen pozisyona yeni bir grup yerleştirileceğinden dolayı, bu ve sonraki pozisyonlardaki gruplar birer kaydırılır. Aynı zamanda çene bilgileri de düzenlenir. Hareket mekanizmasına bir örnek Şekil 3’de verilmektedir.

Tamsayılı Kodlamada Çiftli Yer Değiştirme Mekanizması

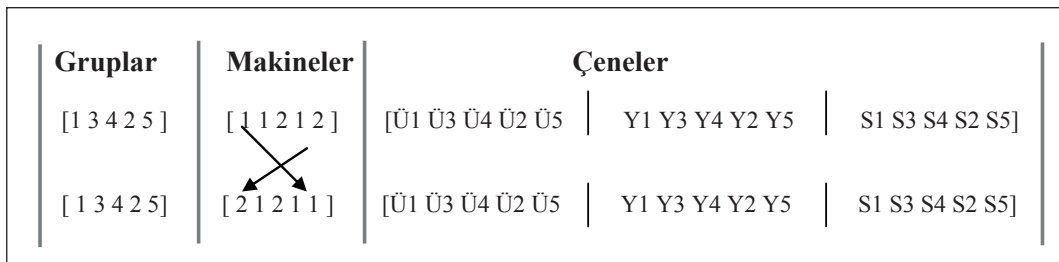
Bu mekanizmada, mevcut makineler çizelgesinden rassal olarak seçilen farklı tipte iki makine yer değiştirir ve iş grupları sıralamasında bir değişiklik



Şekil 2. Permütasyon kodlamada çiftli yer değiştirme mekanizması için bir örnek



Şekil 3. Yerleştirme mekanizması için bir örnek



Şekil 4. Tamsayılı kodlamada çiftli yer değiştirme mekanizması için bir örnek

olmaz. Şekil 4’de hareket mekanizmasına bir örnek verilmektedir.

Tamsayılı Kodlamada Rassal Değişirme Mekanizması

Bu mekanizmada iş grubunun atandığı makine rassal olarak değiştirilmekte, iş grupları sıralamasında değişiklik yapılmamaktadır. Bir iş grubunun atandığı makine rassal olarak değiştirilmek istendiğinde mevcut makineler setinden o makine haricindeki makinelerden biri rassal olarak atanır. Mevcut sistemde bir istasyonda iki adet makine olması nedeniyle, bir iş grubunun atanmış olduğu makine 1 numaralı makine ise rassal atama sonucu söz konusu iş grubunun atanacağı makine 2 numaralı makine olacaktır ve bu durumun tersi de doğrudur. Hareket mekanizmasına bir örnek Şekil 5’de verilmektedir.

Gruplar	Makineler	Çeneler
[1 3 4 2 5]	[1 1 2 1 2]	[Ü1 Ü3 Ü4 Ü2 Ü5 Y1 Y3 Y4 Y2 Y5 S1 S3 S4 S2 S5]
[1 3 4 2 5]	[1 1 2 2 2]	[Ü1 Ü3 Ü4 Ü2 Ü5 Y1 Y3 Y4 Y2 Y5 S1 S3 S4 S2 S5]

Şekil 5. Tamsayılı kodlamada rassal değişirme mekanizması için bir örnek

4.4. Soğutma Çizelgesi ve Durdurma Koşulu

TB’de verilmesi gereken diğer kararlar ise soğutma çizelgesi ve durdurma koşulu ile ilgilidir. Soğutma çizelgesi, başlangıç sıcaklığı (T_0) ve son sıcaklık (T_f), soğutma fonksiyonu ve her sıcaklıkta aranacak komşu sayısından oluşmaktadır. pm_TB’de başlangıç sıcaklığı, mevcut çözümden %70 daha kötü bir çözümü 0,90 olasılıkla kabul edecek şekilde belirlenmiş ve 665 olarak alınmıştır. Son sıcaklık ise, mevcut çözümden %0,1 kötü bir çözümü %1 olasılıkla kabul edecek şekilde belirlenmiş ve 0,15 olarak alınmıştır. Soğutma fonksiyonu, mevcut iterasyon sıcaklığına bağlı olarak bir sonraki iterasyonun sıcaklığını belirler. pm_TB’de kullanılan soğutma fonksiyonu eşitlik (13)’de verilmektedir.

$$T_k = \frac{T_{k-1}}{(1 + \alpha \sqrt{T_{k-1}})} \quad (13)$$

Bu eşitlikte, α değeri 0,005 olarak alınmıştır. Her sıcaklıkta mevcut çözümden dört farklı hareket mekanizması ile dört çözüm üretilmekte ve bu çözümler arasından amaç fonksiyonu değeri en küçük olan çözüm yeni çözüm olarak dikkate alınmaktadır. Sıcaklık, son sıcaklığa ulaştığında pm_TB sonlanmaktadır.

4.5. Geliştirilen Algoritma

Geliştirilen pm_TB algoritmasının adımları aşağıda verilmektedir:

ADIM 0: Başlangıç parametrelerini belirle;

$$T_0 \leftarrow 665; \quad T_k \leftarrow T_0; \quad T_f \leftarrow 0.15; \quad \alpha \leftarrow 0.005; \\ k \leftarrow 0$$

ADIM 1: Başlangıç çözümünü LPT ile üret; S_0 , ve amaç fonksiyonu değerini $f(S_0)$ hesapla;

Başlangıç çözümünü mevcut çözüm olarak al; $S_m \leftarrow S_0$

Başlangıç çözümünü en iyi çözüm olarak al; $S_{eniye} \leftarrow S_0$, $f(S_{eniye}) \leftarrow f(S_0)$

ADIM 2: Dört hareket mekanizmasına göre rassal olarak komşuları üret ve amaç fonksiyonu değeri en küçük olan komşuyu yeni çözüm $f(S_{yeni})$ olarak al.

ADIM 3: Eğer $f(S_{yeni}) \leq f(S_m)$ ise $S_m \leftarrow S_{yeni}$ ve ADIM 4’e git, değilse

$$\Delta = \frac{f(S_{yeni}) - f(S_m)}{f(S_m)} \cdot 100 \text{ hesapla ve } (0,1)$$

aralığında düzgün dağılımdan bir

rassal sayı üret, $u \sim U(0,1)$. Eğer $u \leq e^{-\Delta T}$ ise $S_m \leftarrow S_{yeni}$ ve ADIM 5'e git

ADIM 4: Eğer $f(S_m) < f(S_{eniyi})$ ise $S_{eniyi} \leftarrow S_m$, $f(S_{eniyi}) \leftarrow f(S_m)$

ADIM 5: $k \leftarrow k + 1$; $T_k = T_{k-1} / (1 + \alpha \sqrt{T_{k-1}})$

Eğer $T_k \geq T_f$ ise ADIM 2'ye git, değilse ADIM 6'ya git.

ADIM 6: Problem için bulunan sezgisel çözümü S_{eniyi} ve amaç fonksiyonu değerini $f(S_{eniyi})$ raporla.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Geliştirilen pm_TB'nin performansını çözüm kalitesi açısından değerlendirmek için çok başlangıçlı yerel arama algoritması (çb_YA) kullanılmıştır. çb_YA, bir başlangıç çözümü ile başlar ve yerel eniyi bir çözüme ulaşınca kadar arama yapar. Yerel eniyi çözüme ulaştığında yeni bir başlangıç

pm_TB ve çb_YA, C++ dilinde kodlanmış ve algoritma koşulları Pentium IV, 2,6 GHz özelliklerine sahip bilgisayarda yapılmıştır. Her iki algoritma her problem için 10 kez denenmiştir. çb_YA'nın durdurma koşulu olarak çözüm zamanı kullanılmıştır. Her problem için çb_YA'da kullanılacak çözüm zamanının belirlenmesi amacıyla öncelikle pm_TB çalıştırılmıştır. pm_TB'de elde edilen çözüm zamanları çb_YA'da durdurma koşulu olarak kullanılmıştır.

5.1. Küçük Boyutlu Test Problemlerinde pm_TB ile çb_YA'nın Karşılaştırılması

Tablo 3'de küçük boyutlu test problemleri için pm_TB ve çb_YA ile elde edilen sonuçlar verilmektedir. Küçük boyutlu test problemleri için eniyi çözümler bilindiğinden dolayı algoritmaların karşılaştırılmasında eniyi çözümden yüzde sapma değerleri kullanılmıştır. Yüzde sapma değerinin hesaplanmasında eşitlik (14) kullanılmıştır.

Tablo 3. Küçük Boyutlu Problemlerde Yüzde Sapma Değerleri

İş Sayısı	pm_TB			çb_YA		
	Enkucuk YS	Ortlama YS	Enbuyuk YS	Enkucuk YS	Ortlama YS	Enbuyuk YS
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0,411	0,411	0,411	0,411	0,411	0,411
11	0	0	0	0	0	0
Ortalama	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082

çözümünü seçer ve aramaya devam eder. Bu işlem durdurma koşulu sağlanıncaya kadar tekrarlanır. Algoritma sonlandığında bulunan eniyi çözüm, problemin çözümü olarak dikkate alınır. Performans değerlendirilmesinde, küçük ve büyük boyutlu iki farklı test problem seti kullanılmıştır. Küçük boyutlu problem setinde iş sayısı 7 ile 11 arasında değişen 5 problem, büyük boyutlu problem setinde ise iş sayısı 60 ile 100 arasında değişen 5 problem vardır. Heriki problem setindeki test problemleri, sistemin veri tabanındaki çizelgenecek iş listesinden rassal olarak üretilmiştir. Küçük boyutlu problemler için eniyi çözümler, geliştirilen karışık tamsayı matematiksel model kullanılarak elde edilmiştir.

$$YS = \left(\frac{f(S_{sezgisel}) - f(S_{eniyi})}{f(S_{eniyi})} \right) \cdot 100 \quad (14)$$

Eşitlikte, YS; yüzde sapma değerini, $f(S_{sezgisel})$; sezgisel algoritma ile elde edilen çözümün amaç fonksiyonu değerini, $f(S_{eniyi})$; eniyi çözümün amaç fonksiyonu değerini göstermektedir. Tablo incelendiğinde, her iki algoritmanında 10 işli test problemi haricinde diğer problemler için eniyi çözüme ulaştığı görülmektedir. 10 işli test probleminde ise ortalama yüzde sapma değeri %0,41'dir.

5.2. Büyük Boyutlu Test Problemlerinde pm_TB ile çb_YA'nın Karşılaştırılması

Büyük boyutlu test problemleri için pm_TB ve çb_YA ile elde edilen sonuçlar Tablo 4'de özetlenmiştir.

Büyük boyutlu test problemleri için eniyi çözümler bilinmediğinden performans ölçütü olarak eşitlik (14)'te verilen yüzde sapma değerinin kullanılması mümkün değildir. Bu nedenle, bu test problemlerinin öncelikle LPT ile çözümü elde edilmiştir. Her problem için LPT ile elde edilen çözümün amaç fonksiyon değeri problemin üst sınırı olarak dikkate alınmıştır. Böylece, pm_TB ve çb_YA üst sınır değerini iyileştirme açısından karşılaştırılmıştır. Üst sınıra göre yüzde iyileştirme değerini hesaplamak amacıyla eşitlik (15) kullanılmıştır.

$$YI = \left(\frac{f(S_{LPT}) - f(S_{sezgisel})}{f(S_{LPT})} \right) \cdot 100 \quad (15)$$

Tablo 4. Büyük Boyutlu Problemlerde Yüzde İyileştirme

İş Sayısı	pm_TB			çb_YA		
	Enkucuk YI	Ortlama YI	Enbuyuk YI	Enkucuk YI	Ortlama YI	Enbuyuk YI
60	3,689	4,306	4,964	0,000	3,107	4,854
70	2,982	3,191	3,473	2,217	2,459	2,812
80	1,044	1,391	1,588	0,747	0,966	1,319
90	1,576	1,845	2,304	0,559	1,168	1,592
100	0,707	0,873	1,048	0,076	0,356	0,480
Ortalama	1,999	2,321	2,675	0,719	1,611	2,211

Tablo 4 incelendiğinde, pm_TB'de enküçük yüzde iyileştirmenin %0,707 ve %3,689 arasında, enbüyük yüzde iyileştirmenin ise %1,048 ile %4,964 arasında olduğu görülmektedir. çb_YA'da ise enküçük yüzde iyileştirme enfazla %2,217 iken enbüyük yüzde iyileştirme ise %0,480 ile %4,854 arasındadır. Ortalama yüzde iyileştirme değeri ise pm_TB'de %2,321 iken çb_YA'da %1,611'dir. Bu sonuçlar, pm_TB'nin çb_YA'ya göre daha iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir.

5.3. pm_TB'nin Mevcut Sisteme Uygulanması

Daha önce de belirtildiği gibi mevcut durumda iş çizelgeleri ilgili istasyondaki işçiler tarafından sezgisel olarak hazırlanmaktadır. Sistemde iş çizelgelerinin oluşturulmasında pm_TB kullanıldığında yapılan çene değişimi sayısında ve performans ölçüsünde (C_{max}) elde edilebilecek iyileşmeyi görmek amacıyla,

firmadan ilgili istasyon için hazırlanan 90 ışık iş listesi alınmıştır. İşçilerin insiyatifinde belirlenen çizelgeleme sonucunda listedeki 90 iş, ikişer vardiya halinde çalışılmış ve bir haftada tamamlanmıştır. Aynı liste için pm_TB 10 kez çalıştırıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir: Çene değişimi sayısında, enküçük 16, enbüyük 24 ve ortalama 20,6 adetlik azalma söz konusudur. C_{max} degerinde ise enküçük 80 dakika, en büyük 120 dakika ve ortalama 103 dakikalık bir iyileştirme elde edilmiştir. Bu sonuçlar, pm_TB ile firma için daha etkin çizelgelerin hazırlanabileceğini desteklemektedir.

6. ARAYÜZ TASARIMI

Firmanın isteği doğrultusunda pm_TB algoritması ile bütünlük çalışan bir arayüz tasarlanmıştır. Tasarlanan arayüz Şekil 6'da verilmektedir. Arayüz tasarımında, ilgili istasyonların iş çizelgesini oluşturan mühendis ve yöneticinin talepleri göz önünde bulundurulmuş ve gerçek sistemde ilgili personelin programı etkin bir biçimde kullanımı amaçlanmıştır.

Arayüzde, firma tarafından belirlenmiş olan kriterler doğrultusunda veri tabanından işlerin çekilmesi aşamasında, çizelgenin oluşturulduğu gün ve çizelgenin istenen parçaların teslim tarihine kalan gün sayısı, sistemin tarih birimi olan Mday cinsinden girilmekte ve çizelgenin işlerin sistemden çekilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Teslim tarihi kriterine göre çekilen iş listesinde, hurda enazlanması amacıyla oluşturulan gruptaki bazı işler iş listesinde mevcut ise, onlar ile aynı iş grubuna dahil olan ve teslim tarihi girilen teslim tarihinden daha geç olan işlerin de

Şekil 6. Tasarlanan Arayüz

iş listesine dahil edilebilmesi amacı ile çekme işlemi aşamasında girilen tarihin üzerine ilave edilecek ek zaman sayesinde grupların mümkün olduğunca bozulmaması sağlanmaktadır. Bu nedenle arayüzde gruplar için ilave gün sayısının girilebileceği bir alana yer verilmiştir.

Belirtilen listeleme kriterlerinin arayüz vasıtasıyla sisteme girilmesinin ardından, firmadan gelen diğer bir talep olan iş çıkarma işlemi dikkate alınmıştır. İstasyon bazında veritabanından çekilerek oluşturulan iş listelerinde, çeşitli nedenlerle üretimi istenmeyen parçaların çizelgenecek iş listesinden çıkarılması sağlanmıştır.

Gün başında ilk iş grubunun işlenmesinden önce hazırlık yapma işleminin olup olmaması durumunun makinelerde takılı olan çenelere bağlı olması nedeniyle, arayüzde istasyon bazında makinelerde gün başlangıcında takılı olan çene tiplerinin girileceği alanlar tasarlanmıştır. Firmanın istekleri doğrultusunda istasyonlara verilecek iş listelerinin oluşturulmasında, farklı vardiya sayısı alternatiflerinin oluşturulan iş listesine etkisinin gözlemlenebilmesi amacı ile arayüze vardiya seçenekleri eklenmiştir. Arayüzde gerekli tüm işlemlerin yapılmasının ardından söz konusu istasyonlar için iş çizelgeleri pm_TB ile oluşturulmaktadır.

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş'de belirlenen iş istasyonları için günlük iş çizelgelerinin oluşturulması amacıyla yürütülen çalışmada ilgilenilen problem için öncelikle karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile sadece küçük boyutlu problemler için eniyi çözümler elde edilebilmektedir. Çalışmada incelenen her bir istasyonda ise en az 50 işin çizelgelenmesi söz konusudur. Bu nedenle makul zaman dilimi içerisinde eniyi ya da eniyiye yakın iş çizelgesini elde edebilmek için tavlama benzetimi algoritmasına dayalı bir sezgisel algoritma, pm_TB, geliştirilmiştir. pm_TB'nin performansı çok başlangıçlı yerel arama algoritması (çb_YA) ile karşılaştırmalı olarak incelendiğinde aynı çözüm zamanı içerisinde pm_TB'nin daha iyi çözümlere ulaştığı görülmüştür.

Geliştirilen algoritma ile firma için etkin iş listelerinin oluşturulması amacına ulaşılmış, firma tarafından oluşturulan iş gruplarının korunması sağlanmıştır. Bununla birlikte, geliştirilen algoritma ile bütünlük çalışan bir arayüz tasarlanmıştır. Dolayısıyla, firma beklentilerini karşılayan iş listelerinin kısa sürelerde oluşmasını sağlayan etkin olarak kullanılacak bir program firmaya sunulmuştur.

KAYNAKÇA

1. Anghinolfi, D., Paolucci, M. 2006. "Parallel Machine Total Tardiness Scheduling with a New Hybrid Metaheuristic Approach", *Computers and Operations Research*, 34, 3471-3490.
2. Ferretti, E., Esquivel S. 2005. "An Efficient Approach of Simple and Multirecombined Genetic Algorithms for Parallel Machines Scheduling", *IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2005*. 1340-1347.
3. Kim, D. W., Kim, K. H., Jang, W., Chen, F.F. 2002. "Unrelated Parallel Machine Scheduling With Setup Times Using Simulated Annealing", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 18, 223-231.
4. Kim, S., Choi, H.S., Lee, D.H. 2006. "Tabu Search Heuristics For Parallel Machine Scheduling With Sequence-Dependent Setup And Ready Times", *LNCS* 3982, 728-737.
5. Kirkpatrick, S., Gelatt, Jr, C.D. ve Vecchi, M.P. 1983. "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, 220(4598), 671-680.
6. Lee, Y. H., Pinedo, M. 1995. "Scheduling Jobs On Parallel Machines With Sequence-Dependent Setup Times", *European Journal Of Operational Research*, 100, 464-474.
7. Logendran, R., McDonnell, B., Smucker, B. 2006. "Scheduling Unrelated Parallel Machines With Sequence-Dependent Setups", *Computers and Operations Research*, 34, 3420-3438.
8. Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., Teller, E. 1953. "Equation of State Calculation by Fast Computing Machines", *Journal of Chemical Physics*, 21, 1087-1092.
9. Nessah, R., Chu, C., Yalaoui, F. 2005. "An Exact Method For Pm/Sds, $R_i/\sum N_i = 1$ Ci Problem", *Computers and Operations Research*, 34, 2840 – 2848.
10. Nessah, R., Yalaoui, F., Chu, C. 2006. "A Branch-and-Bound Algorithm to Minimize Total Weighted Completion Time on Identical Parallel Machines with Job Release Dates", *Computers and Operations Research*, 35, 1176-1190.
11. Omar, M.K., Teo, S.C. 2006. "Minimizing The Sum of Earliness/Tardiness in Identical Parallel Machines Schedule with Incompatible Job Families: An Improved MIP Approach", *Applied Mathematics and Computation*, 181, 1008-1017.
12. Pinedo, M.,L. 2004. *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*, Springer, New York.
13. Rabadi, G., Moraga, R.J., Al-Salem, A. 2006. "Heuristics For The Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem with Setup Times", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17, 85-97.
14. Rocha, P.L., Ravetti, M.G., Mateus, G.R., Pardalos, P.M. 2006. "Exact Algorithms for a Scheduling Problem with Unrelated Parallel Machines and Sequence and Machine-Dependent Setup Times", *Computers and Operations Research*, 35, 1250-1264.
15. Sivrikaya, F., Ulusoy, G. 1998. "Parallel Machine Scheduling with Earliness and Tardiness Penalties", *Computers and Operations Research*, 26, 773-787.
16. Tahar, D. N., Yalaoui, F., Chu C., Amodeo, L. 2005. "A Linear Programming Approach for Identical Parallel Machine Scheduling with Job Splitting and Sequence-Dependent Setup Times", *International Journal of Production Economics*, 99, 63-73.
17. Tamaki, H., Murao, H., Kitamura, S. 2003. "A Heuristic-Based Hybrid Solution for Parallel Machine Scheduling Problems with Earliness and Tardiness Penalties", *IEEE Congress on Emerging Technologies and Factory Automation* 2, 239-344.
18. Weng, M. X., Lu, J., Ren H. 2001. "Unrelated Parallel Machine Scheduling with Setup Consideration and a Total Weighted Completion Time Objective", *International Journal of Production Economics*, 70, 215-226.