



A tabu search algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with machine availability constraint and sequence-dependent setup time

Ahad Furugi*

Industrial Engineering Department, Ondokuz Mayıs University, Samsun, 55139, Turkey

Highlights:

- Formulate the unrelated parallel machine scheduling problem
- Consideration of availability constraint and sequence-dependent setup time
- Propose a tabu search algorithm to solve the formulated model.

Keywords:

- Scheduling
- Unrelated Parallel Machines
- Meta-Heuristic Algorithms
- Tabu Search Algorithm

Article Info:

Research Article
Received: 12.10.2020
Accepted: 14.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.806641

Correspondence:

Author: Ahad Furugi
e-mail:
ahad.furugi@omu.edu.tr
phone: +90 362 312 1919

Graphical/Tabular Abstract

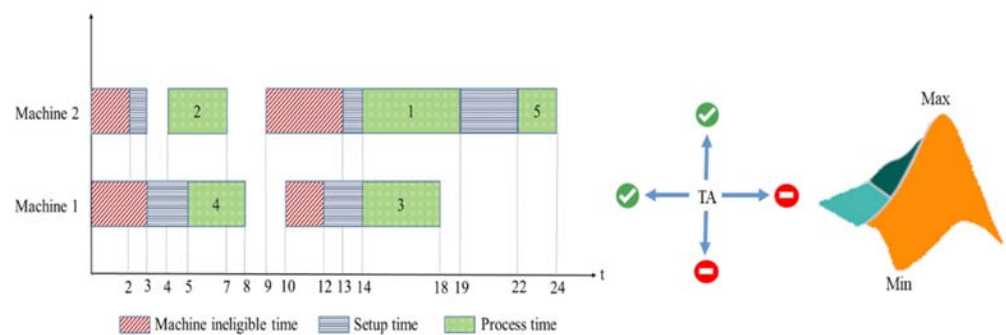


Figure A. Gantt chart for unrelated parallel machine scheduling problem

Purpose: The main purpose of this study is to formulate the unrelated parallel machine scheduling problem with machine eligibility restrictions and sequence-dependent setup time and propose the efficient meta-heuristic algorithm to solve the problem.

Theory and Methods:

Firstly a mix-integer mathematical model has been addressed for the unrelated parallel machine scheduling problem with following assumptions; machines are unavailable at certain time intervals for maintenance activities, machines have the ability to perform just a certain series of tasks and the setup time of the machines depends on the order of the jobs. Then, due to the complexity of the addressed problem, a Tabu Search (TS) algorithm is proposed to solve large-scale problems. In order to evaluate the performance of the proposed TS algorithm, various test problems with different sizes are generated randomly. Finally, the relative percentage deviation (RPD) is used to compare the results.

Results:

To evaluate the efficiency of the applied TS algorithm, 60 test problems are generated randomly and classified into three categories as small, medium and large scale problems. Due to the random nature of the tabu search algorithm, each of the generated problems are solved five times and the minimum, average and maximum values of the results are reported. According to the obtained results, 14 problems out of 60 are solved in a short time with the mathematical model and the optimum solution is obtained. In all solved problems, the optimum solution is also obtained at least once with the TS algorithm. For the other 46 problems, the feasible solution obtained from the mathematical model is compared with the results of the TS algorithm. According to the comparison results, it is seen that the proposed TS algorithm achieves better results in terms of both solution time and solution quality.

Conclusion:

In most studies that have addressed the parallel machine scheduling problem so far, it is assumed that the machines are available during the entire planning period. Although this assumption is true in some cases, it is not true in many practical situations. Therefore, it is important to formulate the scheduling of jobs considering the machine eligibility restrictions. In this study, in addition to the identified constraints, it is aimed to minimize total tardiness and earliness to close this gap in the literature. In addition, the suggested TS algorithm for solving the problem is shown a superior performance.



Makine uygunluk kısıtlaması ve sıra bağımlı kurulum süresi ile özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi için tabu arama algoritması

Ahad Furugi*

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 55139, Atakum, Samsun, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme probleminin modellenmesi
- Makine uygunluk kısıtlaması ve sıra bağımlı kurulum süresinin dikkate alınması
- Modellenen problemin çözümü için tabu arama algoritması önerisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.10.2020

Kabul: 14.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.806641

Anahtar Kelimeler:

Çizelgeleme,
özdeş olmayan paralel
makinelere,
meta sezgisel algoritmalar,
tabu arama algoritması

ÖZ

Paralel makine çizelgeleme problemlerinin birçok pratik ve endüstriyel uygulaması olup özellikle son yıllarda birçok araştırmacı tarafından araştırma konusu olmuştur. Bununla birlikte, bazen makineler, bakım işlemleri veya makine arızası gibi nedenlerden dolayı belirli bir süre devre dışı kalabilmekteler. Literatürde bu tip kısıtlamaları dikkate alan çalışmaların eksik olması bu çalışmanın motivasyon kaynağını oluşturmuştur. Bu çalışmada, özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi; makinelerin her zaman hazır olmayacağı ve bazı görevlerini yerine getiremeyeceği varsayımı altında ele alınmıştır. Ayrıca işler arası sıra bağımlı kurulum süreleri de dikkate alınmıştır. Çalışmanın amacı toplam gecikme ve erken teslim sürelerini minimize etmektir. Problem için sunulan karma tam sayılı matematiksel model, GUROBI 9.0 çözücü ile çözülmüştür. Ele alınan problemin çözümünde Np-zor yapısından dolayı tabu arama (TA) algoritması önerilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen TA algoritmanın iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir.

A tabu search algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with machine availability constraint and sequence-dependent setup time

H I G H L I G H T S

- Formulate the unrelated parallel machine scheduling problem
- Consideration of availability constraint and sequence-dependent setup time
- Propose a tabu search algorithm to solve the formulated model

Article Info

Research Article

Received: 12.10.2020

Accepted: 14.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.806641

Keywords:

Scheduling,
unrelated parallel machines,
meta-heuristic algorithms,
tabu search algorithm

ABSTRACT

Parallel machine scheduling problems have many practical and industrial applications and have recently been the subject of research by many researchers. However, sometimes machines can be unavailable for a period of time for reasons such as machine failure and maintenance operations. The lack of studies in the literature considering such restrictions has been the motivation for this study. In this study, the unrelated parallel machine scheduling problem is discussed with the assumption that the machines will not always be available and they will not be able to perform some tasks. In addition, sequence-dependent setup times between tasks were also taken into account. The objective function is to minimize total tardiness and earliness. A mixed integer mathematical model is presented for the problem and solved with the GUROBI 9.0 solver. Due to the NP-hard nature of the addressed problem, a tabu search (TS) algorithm is proposed. Experimental results show that the proposed TS algorithm has a good performance.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Aslında bir karar verme süreci olan sıralama ve çizelgeleme, üretim ve hizmet sektöründe verimliliğin artışı için önemli bir role sahiptir. Günümüz rekabet dünyasında, işletmelerin hayatta kalabilmesi için, gelen işlerin ve siparişlerin doğru bir şekilde sıralanması ve çizelgenmesi gerekmektedir. Çizelgeleme, sınırlı kaynakların (makine, işçi, donanım, alet v.b.) belirli bir amaç veya amaçlar doğrultusunda ve belirli kısıtlar altında işlere atanması ile ilgili karar verme sürecidir. Klasik çizelgeleme problemlerinde, makinelerin üretim çizelgesi boyunca sürekli olarak kullanılabilirliği varsayılmaktadır. Bu varsayım bazı durumlarda doğru kabul edilebilir olsa bile, çoğu zaman gerçek problemi yansıtmamaktadır. Bir makinenin çalışmasında, arıza veya önleyici bakım gibi çeşitli nedenlerle kesinti yaşanabilmesinden dolayı makinelerin belli aralıklarla kullanılamayacağı dikkate alınarak işlerin çizelgenmesi gerekmektedir. Öte yandan özellikle tam zamanında üretim (JIT-Just In Time) felsefesine uyum sağlayan işletmelerde önemli sorunlardan birisi, müşterilerin talep ettiği teslimat tarihlerini karşılamak için işlerin doğru şekilde çizelgenmesidir. JIT felsefesinin son yıllarda geniş kabul görmesi nedeniyle çizelgeleme problemleri, özellikle işlerin erken ve gecikmeli teslim sürelerini minimize edecek şekilde incelenmektedir. Paralel makine çizelgeleme problemi (PMÇP) uygulamada daha fazla karşılaşılan bir problem olmasına rağmen, bu tip çizelgeleme problemleri ile ilgili araştırmaların büyük kısmı tek makine ile ilgilidir. Klasik paralel makine çizelgeleme problemi; bir dizi özdeş makinede işlenecek birkaç bağımsız işin bölünmeksizin, sabit bir işlem süresi boyunca makinelerin birinde gerçekleştirilmesidir. Amaç ise, belirli performans ölçütünü optimize eden çizelgeye ulaşmaktır [1]. Paralel makine çizelgeleme problemi; işlem sürelerinin tüm makinelerde aynı olduğu özdeş makineler (P_m), her iş için birbirlerinden bağımsız ve farklı hızlara sahip makineler (Q_m), makinelerin farklı hızlarda çalışabileceği ve belirli bir makinenin farklı işleri farklı hızlarda işleyebileceği özdeş olmayan makineler (R_m) olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır [2].

Son yıllarda, birçok araştırmacı, çeşitli operasyonel kısıtlamaları dikkate alarak makine çizelgeleme problemini araştırmıştır [3, 4]. Paralel makine çizelgeleme problemi üzerine ilk çalışma McNaughton [3] tarafından 1950'li yılların sonunda yapılmıştır. Türker ve Sel [4] çalışmalarında, kurulum süresinin sıra bağımlı olduğu paralel makinelerde tamamlanma süresini en küçükleyecek sezgisel bir yaklaşım sunmuşlardır. Problemin çözümü için genetik algoritma ve tabu arama yaklaşımlarını birlikte kullanan bir yaklaşım önermişlerdir. Sun ve Li [5], her makinedeki bakım faaliyetinin belirli bir zaman aralığı içinde yapılması gerektiği kısıtı altında, paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Problem çözümünde, iki çizelgeleme modeli dikkate alınmıştır. İlk modelde, bakım faaliyetlerinin periyodik olarak gerçekleştirildiği kabulüyle maksimum tamamlama

zamanını (C_{max}) en aza indirmek amaçlanmıştır. İkinci modelde ise bakım faaliyetlerinin, işlerin çizelgenmesi ile birlikte belirlenerek işlerin toplam tamamlanma sürelerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Xu vd. [6], makinelerin periyodik olarak kullanılmadığı varsayımı altında maksimum tamamlanma zamanını en aza indirmek amacıyla paralel makine çizelgeleme problemini çözmüşlerdir. Zhao vd. [7], makinelerin belirli zaman diliminde müsait olmadığı varsayımı altında paralel makine çizelgeleme probleminin çözümü için yaklaşık çözüm sunmuşlardır. Çalışmalarında amaç, toplam ağırlıklı tamamlanma süresini minimize etmektir. Bektur ve Saraç [8], ortak sunuculu özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini toplam ağırlıklı gecikmeyi en aza indirecek şekilde ele almışlardır. İşler arası sıra bağımlı kurulum süreleri ve makine uygunluğu kısıtlamalarını da incelemişlerdir. Çalışmalarında problemin çözümü için karma tamsayı matematiksel modelin yanı sıra tabu arama ve tavlama benzetimi metasezgiselleri önerilmiştir. Lee ve Chen [9], herhangi bir zamanda sadece bir makinenin bakımının yapılabildiği ve makinelerde gerekirse aynı anda bakımın yapılabildiği iki durum üzerinde çalışmışlardır. Tüm işler aynı ağırlığa sahip olsa bile problemin NP-zor olduğunu göstererek, problemin çözümü için sütun oluşturma yaklaşımına dayalı dal-sınır algoritmasını önermişlerdir. Sheen vd. [10], makine uygunluk kısıtını dikkate alarak maksimum gecikmeyi en aza indirgeyen paralel makine çizelgeleme probleminin çözümünde dal-sınır algoritmasını önermişlerdir. Huo ve Zhao [11] tarafından paralel makine çizelgeleme probleminde toplam tamamlanma sürelerinin belirli bir limiti aşmaması kaydıyla en aza indirilmesi incelenmiştir. Bu çalışmada, her zaman diliminde en az 2 makinenin müsait olduğu ve yarım kalan bir işin, makine kullanılabilir hale geldikten sonra da devam ettirilebileceği varsayılmıştır. Ezugwu [12], işler arası sıra bağımlı kurulum süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi için Gelişmiş Simbiyotik Organizma Arama Algoritmasını önermiştir. Yin vd. [13], bazı makinelerde belirli bir zamanda, belirli bir olasılıkla belirli bir süre arıza meydana gelebileceği varsayımıyla paralel makine çizelgeleme problemini ele almışlardır. Chen ve Chen [14], özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini çözmek için, işlerin sıra bağımlı kurulum sürelerinin olduğunu da dikkate alarak melez bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Wang ve Pan [15], özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini, önleyici bakım ve işler arası sıra bağımlı kurulum süreleri varsayımı altında ele almışlardır. Çalışmada, maksimum tamamlanma süresi ve toplam gecikmenin aynı anda en aza indirilmesinde yeni Emperyalist Rekabetçi Algoritma önerilmiştir.

Paralel makine (özdeş veya özdeş olmayan) çizelgeleme problemini ele alan çoğu çalışmada, işler arası sıraya bağımlı kurulum süreleri ve uygunluk kısıtı dikkate alınmasına rağmen, makinelerin tüm planlama dönemi boyunca çalışır ve erişebilir vaziyette olduğunun varsayıldığı anlaşılmaktadır. Bu varsayım pratik durumda gerçeği yansıtmamaktadır. Önleyici bakımlar ve önceden planlanmış

işler gibi diğer nedenlerden dolayı bir makine devre dışı kalabilmektedir. Bu nedenle, makine erişim kısıtlamalarına bağlı olarak işlerin çizelgeleme modellerinin incelenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, belirtilen kısıtlar altında, JIT felsefesi doğrultusunda günümüzde çizelgeleme problemlerinde yaygın olarak kullanılan erken ve geç teslim sürelerinin minimize edilmesi amacı ele alınarak literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Makalenin diğer bölümleri aşağıdaki sıraya göre düzenlenmiştir. İkinci bölümde söz konusu problem tanımlanmış ve karma tam sayılı matematiksel model sunulmuştur. Üçüncü bölümde problemin çözümü için önerilen tabu arama algoritması verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel sonuçlar ve analizler yapılmıştır. Son bölümde ise elde edilen bulgulara ve gelecek çalışmalara ilişkin bilgilere yer verilmiştir.

2. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL (PROBLEM DEFINITION AND MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışmada, özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi aşağıdaki varsayımlar ile ele alınmıştır.

- N adet işin çizelgelemenin başlangıcında müsait olduğu varsayımıyla özdeş olmayan M adet paralel makine üzerinde çizelgenmesi gerekmektedir.
- İşler bağımsız ve aralarında herhangi öncelik kısıtlaması yoktur.
- Her iş herhangi bir bölünme ve kesinti olmaksızın yalnızca bir makinede işlenebilir.
- Her makine aynı anda birden fazla işi yapamaz.
- Bir makinenin kurulum süresi o makinede yapılan işlerin sırası ve makine tipine bağlıdır.
- Her iş yalnızca belirli makinelerde yapılabilir ve tüm makineler, tüm işleri gerçekleştiremez.
- Makinelerin çizelgeleme ufku boyunca, bir başlangıçta bir de ikinci bir zaman aralığında önceden planlanmış bakım faaliyetleri nedeniyle müsait olmadıkları varsayılmıştır.
- Makineler farklı hızlara sahiptirler.
- İşlerin birbirinden bağımsız olarak önceden belirlenen teslim zamanında tamamlanması gerekmektedir.

Yukarıdaki varsayımlara göre, görevlerin makinelere atanması ve her makineye atanan görevlerin çizelgenmesi, işlerin erken veya geç teslim sürelerinin toplamını en aza indirecek şekilde yapılmalıdır. Problemin matematiksel tamsayı doğrusal programlama modeli aşağıda sunulmuştur. Matematiksel modelde kullanılan indisler, notasyonlar, parametreler ve karar değişkenleri aşağıdaki gibidir:

İndisler:

j, k : iş indisleri $j, k = 1, 2, \dots, n$
 i : makine indisi $i = 1, 2, \dots, m$

Parametreler:

p_{ji} : j. işin i. makinede işlem süresi

1542

d_j : j. işin teslim tarihi
 S_{jki} : eğer i. Makinede k. İş j. İşten sonra yapılıyor ise, makinedeki hazırlık süresi
 S_{0ji} : eğer i. Makinede j. İş birinci sırada yapılıyor ise, ilgili makinedeki hazırlık süresi
 u_{ji} : eğer i. makine j. işi yapabiliyor ise 1. yapamıyorsa 0
 $[0, R_i]$: i. makinenin başlangıçta müsait olmadığı zaman aralığı
 $[SM_i, FM_i]$: i. makinenin müsait olmadığı zaman aralığı $FM_i > SM_i > R_i$
 $BigM$: büyük sayı

Karar değişkenleri:

x_j : j işinin başlayabileceği en erken zaman
 C_j : j. işin tamamlanma zamanı
 E_j : j. işin erken teslim süresi $E_j = \max \{0, d_j - C_j\}$
 T_j : j. işin gecikme süresi $T_j = \max \{0, C_j - d_j\}$
 A_{ji} : eğer i. makineye j. iş atanır ise 1. diğer durumda 0
 Z_{jki} : eğer i. makinede k. iş j. işten sonra yapılıyor ise 1, diğer durumda 0
 Z_{0ji} : eğer i. makinede j. iş birinci sırada yapılıyor ise 1, diğer durumda 0
 y_j : eğer j. iş herhangi makinenin ikinci müsait olmadığı zaman aralığından sonra işlem görüyor ise 1. diğer durumda 0

$$\min \sum_{j=1}^n (E_j + T_j)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^m u_{ji} A_{ji} = 1 \quad \forall j \quad (1)$$

$$A_{ji} \leq u_{ji} \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n Z_{jki} + Z_{0ki} = A_{ki} \quad \forall i, k \quad (3)$$

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n Z_{kji} \leq A_{ki} \quad \forall i, k \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n Z_{0ji} \leq 1 \quad \forall i \quad (5)$$

$$Z_{jki} \leq A_{ji} \quad \forall i, j, k; j \neq k \quad (6)$$

$$Z_{jki} \leq A_{ki} \quad \forall i, j, k; j \neq k \quad (7)$$

$$C_j \geq x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1, j \neq k}^n Z_{kji} S_{kji} + \sum_{i=1}^m Z_{0ji} S_{0ji} + \sum_{i=1}^m A_{ji} p_{ji} \quad \forall j \quad (8)$$

$$x_j \geq \sum_{i=1}^m A_{ji} R_i \quad \forall j \quad (9)$$

$$C_j \leq \sum_{i=1}^m A_{ji} SM_i + bigM * y_j \quad \forall j \quad (10)$$

$$x_j \geq \sum_{i=1}^m A_{ji} FM_i - bigM(1 - y_j) \quad \forall j \quad (11)$$

$$C_j \leq x_k + \text{bigM}(1 - \sum_{i=1}^m Z_{jki}) \quad \forall j, k; j \neq k \quad (12)$$

$$E_j \geq d_j - C_j \quad \forall j \quad (13)$$

$$T_j \geq C_j - d_j \quad \forall j \quad (14)$$

$$x_j, C_j, E_j, T_j \geq 0 \quad \forall j \quad (15)$$

$$A_{ji}, Z_{jki}, Z_{0ji}, y_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k; j \neq k \quad (16)$$

Modelin amacı, toplam erken teslim ve geç teslim sürelerini minimize etmektir. Kısıt (1), her işin yapılabileceği makineler arasından sadece bir makinede yapılmasını sağlamaktadır. Kısıt (2), herhangi bir makinenin yapamayacağı işlerin atanması engellemektedir. Kısıt (3), her bir işin atandığı makinede mutlaka bir öncülü olması gerektiğini sağlamaktadır. Her bir işin atandığı makinede en fazla bir ardılı olabileceğini kısıt (4) ve her bir makinede en fazla bir işin birinci sıradan yapılabileceğini kısıt (5) sağlamaktadır. (6-7) kısıtları $Z_{jki} \leq A_{ji} * A_{ki}$ kısıtını doğrusallaştırma kısıtlarıdır. Kısıt (8), her işin tamamlanma süresi, atandığı makinede işler arası sıraya bağımlı kurulum süresi ve işlem süresinin toplamından büyük olmasını garanti etmektedir. Her işin sadece makinelerin uygun olduğu zamanlarda başlayıp bitirilmesini (9-11) kısıtları sağlamaktadır. Kısıt (12), her makineye atanan işlerin sırasını belirlemektedir. İşlerin erken veya geç teslim tarihleri (13-14) kısıtlar tarafından hesaplanmaktadır. Kısıt (15-16) ise $\{0,1\}$ ve pozitif değişkenleri ifade temektir.

3. TABU ARAMA ALGORİTMASI (TABU SEARCH ALGORITHM)

Bu çalışmada ele alınan problem NP-zor olduğundan, büyük ve orta ölçekli problemleri çözmek için tabu arama algoritması kullanılmıştır. Fred Glover [16] tarafından tanımlanan ve geliştirilen TA algoritması, kombinatoriyal optimizasyon problemlerinde yerel arama tekniklerini kullanan etkili bir meta-sezgisel yöntemdir [17]. Özellikle üretim planlama alanında çok sayıda kombinatoriyal optimizasyon problemine başarıyla uygulanmıştır [18].

TA algoritması, başlangıç bir çözümle başlayıp her iterasyonda, mevcut çözüm üzerinde hareket mekanizması yardımı ile komşu çözümler üretir. Genellikle komşu çözümler arasından en iyi çözüm seçilerek bu çözüm yeni çözüm olarak ele alınır. Yeni çözümün elde edildiği hareket, tabu listesine alınır. Aynı çözüme tekrar ziyaretleri önlemek amacıyla belirli iterasyon sayıda, tabu listesinde bulunan hareketlerin tekrarlanması yasaklanır. Bir tabu hareketi ancak şu ana kadar bulunan en iyi çözümden daha iyi çözüm olduğunda yapılabilir ki bu duruma tabu yıkma ölçütü denir. Bu ölçütün kullanılması TA algoritmasının etkinliğini artırmaktadır. TA algoritması, bir veya birden fazla durdurma koşulunu sağlayıncaya kadar aramasını sürdürmektedir. Bu koşullardan bazıları aşağıda verilmiştir:

- Seçilen bir komşu çözümün komşusunun olmaması.
- Belirli bir iterasyon sayısına ulaşılması.

- Belirli bir çözüm değerine ulaşılması.
- Algoritmanın bir yerde tıkanması ve daha iyi sonuç üretmemesi.

3.1. Tabu Arama Algoritması Adımları (Steps of the Tabu Search Algorithm)

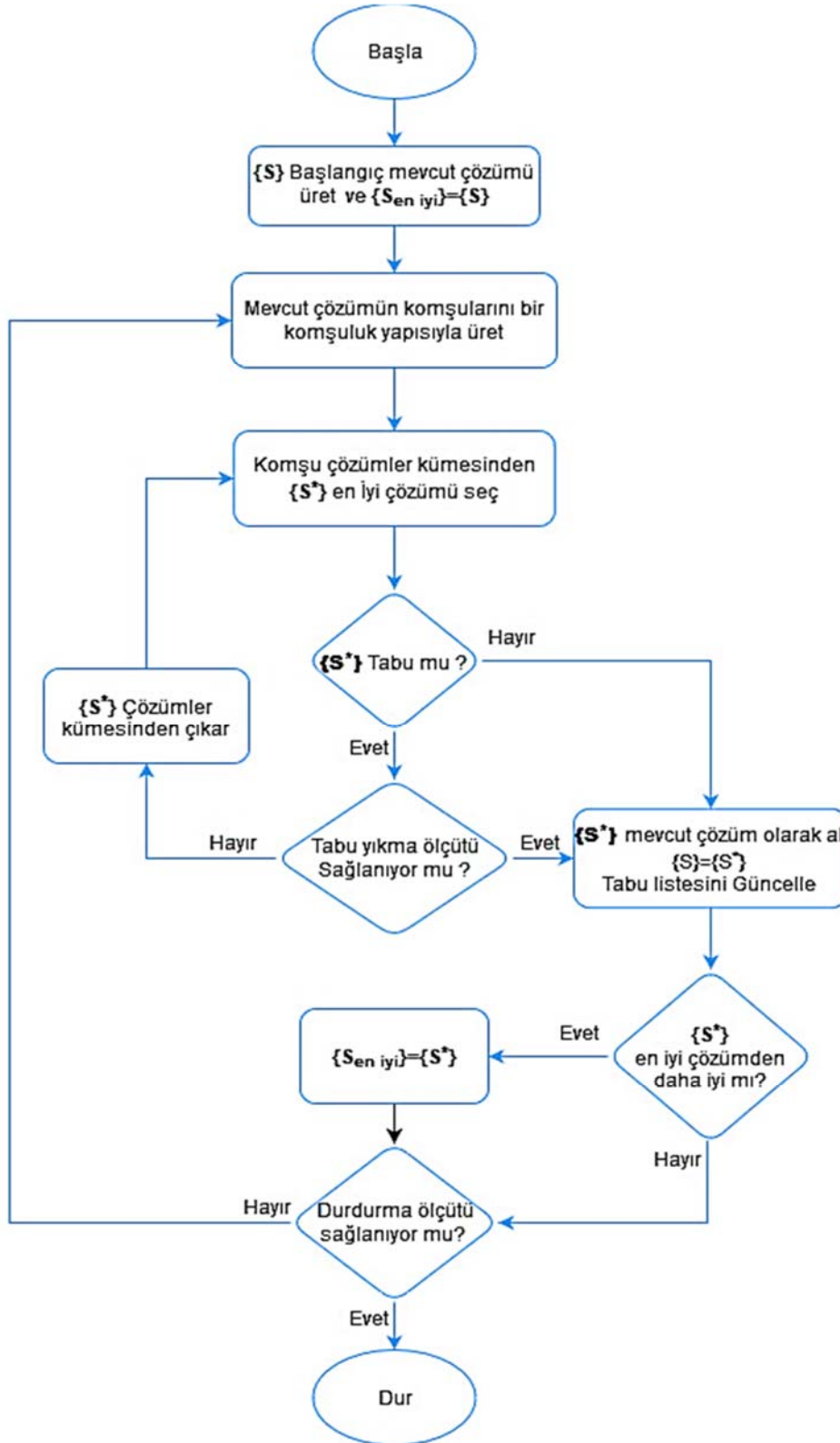
Önerilen TA algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir:

3.2. Çözüm Gösterimi (Solution Representation)

Meta-sezgisel algoritmaların performansı üzerinde büyük etkisi olan en önemli adımlarından biri çözüm gösterimidir. Çözüm gösterimi, problemin her bir çözümünü algoritma ortamında kodlamak ve daha sonra kodu çözmektir. Geliştirilen TA algoritmasında problemin çözüm gösterimi için permütasyon gösterim kullanılmaktadır. Bu yöntemde algoritma $n!$ adet cevap içeren bir çözüm alanında arama yapmaktadır. n iş sayısı olarak varsayılmıştır. Kullanılan çözüm gösterimi 5 iş için Şekil 2'de gösterilmiştir.

Bir cevabın amaç fonksiyon değerini hesaplamak için önce cevap kodu çözülmelidir. Başka bir deyişle permütasyon gösterimi, bir çizelgelemeye eşlenmelidir. Paralel makine çizelgeleme problemleriyle ilgili literatürde çeşitli ağgözlü kod çözüme yaklaşımları sunulmaktadır. Bu çalışmada, çözümün uygunluğunu da ihmal etmeyen ağgözlü bir kod çözüme yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım, permütasyon gösterimin solundan başlayarak her işi, onu işleyebilen makineler arasından işler arası kurulum süreleri ve makine uygunluk kısıtlamalarını göz önüne alarak mümkün olduğunca zamanında tamamlayabilecek (en az gecikmeye veya erken tamamlanmaya yol açan) bir makineye atamaktır. Bu süreç tüm işlerin çizelgelenmesine kadar devam etmektedir. Her permutasyona karşılık gelecek tek bir çizelgenin bulunması için, herhangi bir işi zamanında tamamlayan birden fazla makine olması durumunda, o iş atanabileceği sıradaki ilk makineye atanmaktadır. Kod çözüme yaklaşımını daha iyi göstermek için 5 görev ve 2 makine içeren bir örnek çözülmüştür. Örnek problemde 3. işin sadece birinci makinede ve diğer işlerin her iki makinede işlem görebileceği varsayılmıştır. İşlerin teslim süreleri sırasıyla 15, 7, 12, 8 ve 20 olarak ve makinelerin uygun olmadığı zaman aralıkları 1. makine için [0,3] ve [10,12], 2. makine için [0,2] ve [9,13] olarak varsayılmıştır. İşlerin işlem süreleri ve işler arası sıraya bağlı kurulum süreleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2 ayrıca S_{0ji} sürelerini de göstermektedir.

Şekil 2'de verilen çözüm gösterimini varsayalım. İlk olarak birinci sırada yer alan 4. iş, makineler aranızdan zamanında tamamlanabilecek makineye yani 1. makineye atanacaktır. Daha sonra 2. sırada yer alan iş yani 2. iş makineler arasından zamanında tamamlanacak şekilde 2. makineye atanacaktır. 3. sırada yer alan 3. iş ise sadece birinci makinede yapılabilir. Dolayısıyla birinci makineye atanacaktır. Diğer işler ise benzer prensiple Şekil 3'te gösterildiği gibi çizelgelenmiştir. Bu çizelgenin amaç fonksiyonu değeri ise 14 (4+0+6+0+4) olarak elde edilmiştir.



Şekil 1.Tabu arama algoritması akış diyagramı (The flowchart of tabu search algorithm)

4	2	3	1	5
---	---	---	---	---

Şekil 2. 5 iş için çözüm gösterimi
(Solution representation for 5 jobs)

Tablo 1. İşlem Süreleri (Processing Times)

İş	Makine	
	1	2
1	2	5
2	5	3
3	4	-
4	3	2
5	8	2

Tablo 2. İşler Arası Sıraya Bağlı Kurulum Süreleri
(Sequence-dependent setup times between jobs)

İş	1. Makine					2. Makine				
	1	2	3	4	5	1	2	4	5	
0	1	2	3	2	1	2	1	5	2	
1	-	2	3	1	1	-	1	3	1	
2	3	-	1	3	2	2	-	1	1	
3	1	1	-	2	2	-	-	-	-	
4	2	1	1	-	3	3	2	-	1	
5	3	1	4	1	-	3	1	3	-	

3.3. Komşuluk Yapısı (Neighborhood Structure)

Komşuluk yapısı, bir çözüm üzerinde küçük değişiklik uygulayarak yeni bir dizi komşu çözüm elde edebilen bir mekanizmadır. Bu çalışmada, En İyi Yerel Çiftli Yer Değiştirme (swap-greedy) mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizmada rassal seçilen bir iş, diğer pozisyonlardaki işlerle yer değiştirip (n-1) adet komşu çözüm üretmek amaç fonksiyonunu eniyileyen çözüm seçilir [19]. Mekanizmaya ilişkin örnek Tablo 3'te verilmiştir.

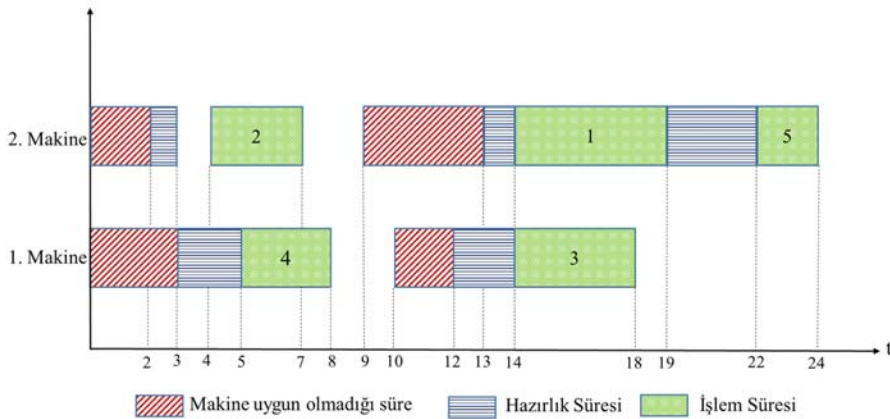
Tablo 3. En iyi Yerel Çiftli Yer Değiştirme Örneği
(An example of the swap-greedy mechanism)

Mevcut Çözüm	Rassal İş	Seçilen İş	Yer Değiştiren İş	Komşu Çözüm
			4	3-2-4-1-5
			2	4-3-2-1-5
4-2-3-1-5	3		1	4-2-1-3-5
			5	4-2-5-1-3

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Önerilen TA algoritması, Intel (R) Core (TM) i7 2.40GHz CPU ve 8GB ana bellek ile Visual Studio 2016 C # programlama dilinde kodlanmıştır. Ayrıca, sunulan matematiksel model, GUROBI 9.0 çözücü ile maksimum çözüm süresi 7200 saniye ile sınırlandırılarak çözülmektedir. Matematiksel modelden elde edilen alt sınır değerleri ve bu sürenin sonunda en iyi cevap kayıt edilmiştir. Sunulan matematiksel model ve TA algoritmasının performansını değerlendirmek için farklı ölçülerde sayısal problemler rastgele üretilmiştir. İşlem ve kurulum sürelerini oluşturmak için, sırasıyla [30,50] ve [1,7] parametreleri ile kesikli tekdüze (uniform) dağılım kullanılmıştır. İşlerin teslim süreleri ise Radhakrishnan ve Ventura [20] tarafından geliştirilen yöntem ile üretilmiştir. Ayrıca R_i ve SM_i değerleri sırasıyla [10,50] ve [80,200] parametreler ile kesikli tekdüze dağılım ile üretilmiştir. $FM_i - SM_i$ aralığının uzunluğu ise [10,40] parametreler ile kesikli tekdüze dağılım ile belirlenmiştir. Her bir problem boyutu için 5 farklı test problemi üretilmiştir. Toplam 60 test problemi küçük (A1-A6), orta (B1-B3) ve büyük (C1-C3) kategoride sınıflandırılmıştır.

Önerilen TA algoritmasının parametre değerlerini belirlemek için her problem kategorisinden birer problem seçilerek bu problemler üzerinde 2 faktör ve her faktörün üç seviyeyi temsil ettiği 9 test içeren Taguchi deney tasarımı yapılmıştır. Tablo 4'de faktör seviyeleri ve Tablo 5'de L9 deney planı verilmiştir.



Şekil 3. Örnek problem için çizelgeleme (Schedule for example problem)

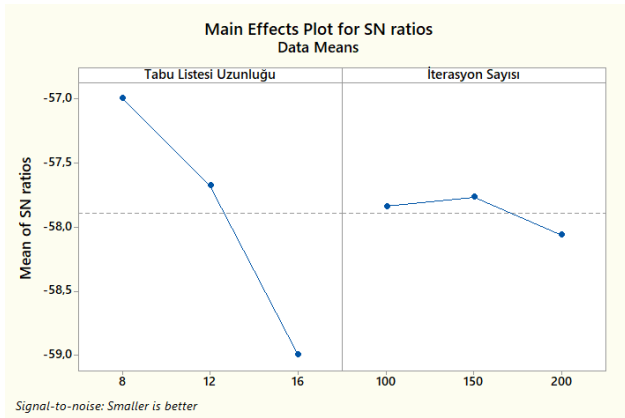
Tablo 4. Taguchi deney tasarımı için faktörler ve seviyeleri (Factors and levels for Taguchi experiment design)

Faktör	Düzye		
	1	2	3
Tabu Listesi Uzunluğu	8	12	16
İterasyon Sayısı	100	150	200

Tablo 5. Taguchi L9 deney planı (Experimental plans based on Taguchi orthogonal array (L9))

Deney No	Tabu Listesi Uzunluğu	İterasyon Sayısı
1	8	100
2	8	150
3	8	200
4	12	100
5	12	150
6	12	200
7	16	100
8	16	150
9	16	200

Taguchi deney tasarımının sonuçları ışığında, TA algoritması için en iyi liste uzunluğu 8 ve iterasyon sayısı 150 olarak dikkate alınmıştır (Şekil 4). Algoritmanın durdurma kriteri, iterasyon sayısı olarak belirlenmiştir.



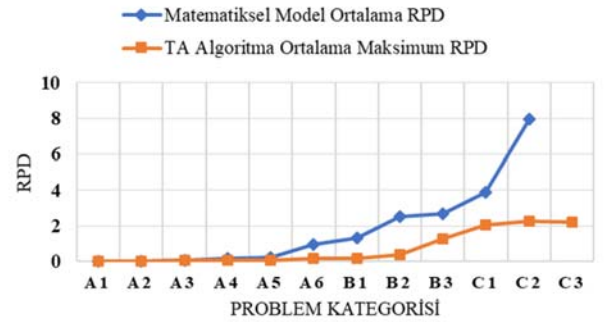
Şekil 4. Faktörlerin her seviyesi için ortalama S / N oranı (The mean S/N ratio plot for each level of the factors)

TA algoritmasının rastgele doğası gereği üretilen problemlerin her biri 5 defa çözülmüştür. Her bir problem için yapılan 5 denememin ortalama çözüm süresi ve minimum, ortalama ve maksimum görece yüzde sapma (Relative Percentage Deviation) değerleri rapor edilmiştir. Sonuçları karşılaştırmak için kullanılan görece yüzde sapma (RPD) Eş. 17 ile hesaplanır:

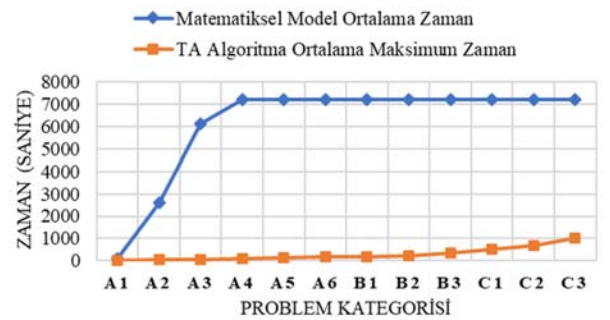
$$RPD = \frac{f(Current_{sol}) - f(Best_{sol})}{f(Best_{sol})} \times 100\% \quad (17)$$

Burada $f(Current_{sol})$ verilen bir test problemi için TA algoritması veya matematiksel model tarafından üretilen mevcut çözümdür. $f(Best_{sol})$ ise aynı test problemi için matematiksel model veya TA algoritması tarafından üretilen en iyi çözümdür. RPD'nin küçük olması çözümün kaliteli bir çözüm olduğu anlamına gelmektedir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6 ve Tablo 7' te verilmiştir.

Tablo 6 ve Tablo 7'den elde edilen sonuçlara göre küçük boyutlu problem kategorisinde (A1-A6) toplam 30 problemten 14 problem, matematiksel model ile kısa sürede çözümlenerek optimum çözüm elde edilmiştir. Çözülen 14 problemin hepsinde TA algoritması ile en az bir defa optimum çözüm elde edilmiştir. Diğer 16 problem ve orta (B1-B) ve büyük (C1-C) boyutlu problemler için önceden belirlenen maksimum çözüm süresi (7200 s) sonunda matematiksel modelden elde edilen geçerli (feasible) çözüm kayıtlı edilmiş ve önerilen TA algoritması sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre önerilen TA algoritması ile hem çözüm süresi hem çözüm kalitesi açısından daha iyi sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Karşılaştırma grafikleri Şekil 5 ve Şekil 6'te verilmiştir. C3 problem kategorisinde matematiksel model 7200 saniye içerisinde geçerli çözüm bulmakta yetersiz kalmaktadır (Tablo 7'te * ile gösterilmiştir) . Dolayısıyla önerilen TA algoritmasının özellikle orta ve büyük boyutlu problemler için daha iyi performansa sahip olmaktadır.



Şekil 5. Matematiksel Model ve TA Ortalama RPD karşılaştırması (Comparison of mean RPD in mathematical model and TA)



Şekil 6. Matematiksel Model ve TA Ortalama zaman karşılaştırması (Comparison of mean computational time in mathematical model and TA)

Tablo 6. Küçük boyutlu problemler için hesaplama sonuçları (Computational results for small-size problems)

Problem kategorisi	İş Sayısı	Makine Sayısı	Matematiksel Model				Tabu Arama Algoritması			
			Problem No	Alt Sınır Değeri	RPD	Süre (saniye)	Minimum	Ortalama	Maksimum	Süre (saniye)
A1	8	2	1	75	0	94	0	0	0	18
			2	54	0	83	0	0	0	17
			3	67	0	88	0	0	0	24
			4	81	0	105	0	0	0	18
			5	67	0	73	0	0	0	21
			Ortalama				0	88,6	0	0
A2	9	2	1	101	0	2521	0	0	0	36
			2	92	0	1802	0	0	0	43
			3	96	0	2606	0	0	0	48
			4	109	0	3457	0	0	0	53
			5	96	0	2724	0	0	0	35
			Ortalama				0	2622	0	0
A3	10	3	1	62	0	4865	0	0	0	81
			2	72	0	4456	0	0	0	75
			3	66	0,34	7200	0	0,05	0,14	84
			4	76	0	6854	0	0,05	0,09	74
			5	84	0	6250	0	0,03	0,08	68
			Ortalama				0,06	6115	0	0,02
A4	12	3	1	125	0,15	7200	0	0	0	109
			2	142	0,18	7200	0	0	0	106
			3	132	0,12	7200	0	0,13	0,16	112
			4	141	0,14	7200	0	0,11	0,14	106
			5	128	0,14	7200	0	0,08	0,11	104
			Ortalama				0,15	7200	0	0,06
A5	12	4	1	114	0,2	7200	0	0,09	0,12	148
			2	132	0,24	7200	0	0,05	0,09	124
			3	107	0,19	7200	0	0	0	156
			4	111	0,28	7200	0	0,1	0,14	160
			5	134	0,24	7200	0	0,09	0,1	139
			Ortalama				0,23	7200	0	0,06
A6	13	3	1	140	1,04	7200	0	0,13	0,17	168
			2	144	0,8	7200	0	0,15	0,2	152
			3	151	1,29	7200	0	0,12	0,18	160
			4	149	0,91	7200	0	0,14	0,16	174
			5	166	0,85	7200	0	0,1	0,12	165
			Ortalama				0,97	7200	0	0,12

Tablo 7. Orta ve büyük boyutlu problemler için hesaplama sonuçları (Computational results for medium and large-size problems)

Problem kategorisi	İş Sayısı	Makine Sayısı	Matematiksel Model				Tabu Arama Algoritması			
			Problem No	Alt Sınır Değeri	RPD	Süre (saniye)	Minimum	Ortalama	Maksimum	Süre (saniye)
B1	16	3	1	186	1,34	7200	0	0,13	0,16	188
			2	201	1,25	7200	0	0,15	0,2	178
			3	220	1,39	7200	0	0,11	0,21	196
			4	190	1,32	7200	0	0,16	0,19	184
			5	224	1,28	7200	0	0,1	0,12	195
			Ortalama			1,31	7200	0	0,13	0,17
B2	17	4	1	332	2,75	7200	0	0,23	0,36	209
			2	328	2,97	7200	0	0,21	0,44	216
			3	280	2,84	7200	0	0,23	0,36	212
			4	309	1,05	7200	0	0,31	0,54	217
			5	338	2,94	7200	0	0,18	0,31	221
			Ortalama			2,71	7200	0	0,23	0,4
B3	18	5	1	326	2,21	7200	0	0,9	1,22	343
			2	321	2,15	7200	0	1,05	1,39	322
			3	322	3,29	7200	0	0,6	0,9	356
			4	315	2,41	7200	0	1,12	1,44	330
			5	327	3,25	7200	0	0,84	1,36	339
			Ortalama			2,66	7200		0,9	1,26
C1	20	6	1	425	3,32	7200	0	1,43	2,16	523
			2	404	4,22	7200	0	1,55	1,92	568
			3	487	4,34	7200	0	1,41	1,9	516
			4	450	3,32	7200	0	1,56	2,29	524
			5	464	4,27	7200	0	1,61	2,12	505
			Ortalama			3,89	7200		1,51	2,07
C2	30	4	1	1050	7,2	7200	0	1,5	1,95	723
			2	987	8,1	7200	0	1,63	2,32	740
			3	1125	7,96	7200	0	1,52	1,94	658
			4	1234	7,38	7200	0	1,38	2,3	690
			5	1289	9,2	7200	0	1,6	2,8	714
			Ortalama			7,96	7200	0	1,52	2,26
C3	40	6	1	*	*	7200	0	1,17	2,14	991
			2	*	*	7200	0	1,13	2,02	1106
			3	*	*	7200	0	1,14	2,18	968
			4	*	*	7200	0	1,16	2,26	1064
			5	*	*	7200	0	1,61	2,42	1015
			Ortalama				7200	0	1,24	2,2

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, bakım faaliyetleri için belirli zaman aralıklarında makinelerin devre dışı kaldığı, makinelerin belirli bir dizi işi yapabilme özelliğine sahip olduğu ve işlerin sırasına bağlı kurulum süreleri olduğu varsayımları altında özdeş olmayan paralel makinelerin çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan çizelgeleme probleminde; işlerin uygun makinelere atanması, her bir işin atandığı makinede ne zaman yapılacağına belirlenmesi ve işlerin toplam gecikme ve erken teslim sürelerinin minimize edilmesi hedeflenmiştir. İlk olarak problem için karma tamsayı doğrusal matematiksel model sunulmuştur. Daha sonra

incelenen problemin karmaşıklığı nedeniyle, büyük ölçekli problemleri çözmek için TA algoritması önerilmiştir. Hesaplama sonuçlarına göre önerilen TA algoritmasının optimal ve optima yakın çözümleri bulmada iyi bir performansa sahip olduğunu görmektedir. Bu çalışmada toplam gecikme ve erken teslim sürelerinin minimize edilmesi amaç fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır. Üzerindeki çalışmalarda makinelerin boş zamanlarının, maksimum tamamlanma süresinin veya toplam ağırlıklı gecikme ve erken teslim maliyetlerinin minimize edilmesi dikkate alınabilir. Ayrıca bu çalışmanın devamında, çizelgeleme ufku boyunca makinenin uygun olmama sayısını stokastik varsayarak yeni çalışma yapılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Mokotoff E., An exact algorithm for the identical parallel machine scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 152 (3), 758-769, 2004.
2. Lin Y.K., Pfund M.E., Fowler J.W., Heuristics for minimizing regular performance measures in unrelated parallel machine scheduling problems, *Computers & Operations Research*, 38 (6), 901-916, 2011.
3. Mcnaughton R., Scheduling with deadlines and loss functions, *Management Science*, 6 (1), 1-12, 1959.
4. Türker A.K., Sel Ç., A hybrid approach on single server parallel machines scheduling problem with sequence dependent setup times, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 26 (4), 731-740, 2011.
5. Sun K., Li H., Scheduling problems with multiple maintenance activities and non-preemptive jobs on two identical parallel machines, *International Journal of Production Economics*, 124 (1), 151-158, 2010.
6. Xu D., Cheng Z., Yin Y., Li H., Makespan minimization for two parallel machines scheduling with a periodic availability constraint, *Computers & Operations Research*, 36 (6), 1809-1812, 2009.
7. Zhao C., Ji M., Tang H., Parallel-machine scheduling with an availability constraint, *Computers & Industrial Engineering*, 61 (3), 778-781, 2011.
8. Bektur G., Saraç T., A mathematical model and heuristic algorithms for an unrelated parallel machine scheduling problem with sequence-dependent setup times, machine eligibility restrictions and a common server, *Computers & Operations Research*, 103, 46-63, 2019.
9. Lee C.Y., Chen Z.L., Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines, *Naval Research Logistics (NRL)*, 47(2), 145-165, 2000.
10. Sheen G.-J., Liao L.-W., Lin C.-F., Optimal parallel machines scheduling with machine availability and eligibility constraints, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36 (1-2), 132-139, 2008.
11. Huo Y., Zhao H., Total completion time minimization on multiple machines subject to machine availability and makespan constraints, *European Journal of Operational Research*, 243 (2), 547-554, 2015.
12. Ezugwu A.E., Enhanced symbiotic organisms search algorithm for unrelated parallel machines manufacturing scheduling with setup times, *Knowledge-Based Systems*, 172, 15-32, 2019.
13. Yin Y., Wang Y., Cheng T.C.E., Liu W., Li J., Parallel-machine scheduling of deteriorating jobs with potential machine disruptions, *Omega*, 69, 17-28, 2017.
14. Chen C.-L., Chen C.-L., Hybrid metaheuristics for unrelated parallel machine scheduling with sequence-dependent setup times, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43 (1-2), 161, 2009.
15. Wang M., Pan G., A Novel Imperialist Competitive Algorithm With Multi-Elite Individuals Guidance for Multi-Object Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem, *IEEE Access*, 7, 121223-121235, 2019.
16. Glover F., Tabu search—part I, *ORSA Journal on computing*, 1(3), 190-206, 1989.
17. Solimanpur M., Elmi A., A tabu search approach for cell scheduling problem with makespan criterion, *International Journal of Production Economics*, 141 (2), 639-645, 2013.
18. Solimanpur M., Elmi A., A tabu search approach for group scheduling in buffer-constrained flow shop cells, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24 (3), 257-268, 2011.
19. Güner E., Altınparmak F., A heuristic approach for the secondary criterion scheduling problem on a single machine, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 18 (3), 27-42, 2003.
20. Radhakrishnan S., Ventura J.A., Simulated annealing for parallel machine scheduling with earliness-tardiness penalties and sequence-dependent set-up times, *International Journal of Production Research*, 38 (10), 2233-2252, 2000.

