



Parallel Machine Scheduling Problem with Unavailable Time Periods and Sequence Dependent Setup Times

Feriştah ÖZÇELİK^{1,*} Tuğba SARAÇ¹

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26040, Odunpazarı/ESKİŞEHİR

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 11.03.2022
Revision: 21.04.2022
Accepted: 19.06.2022

Highlights

- Unrelated parallel machine scheduling problem with unavailable time periods and sequence dependent setup times is considered.
- A mathematical model and a genetic algorithm have been developed for the considered problem.
- By taking into account the unavailable time periods, an average of 5.29% reduction is achieved in the makespan.

Keywords

Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem
Unavailable Time Periods
Sequence Dependent Setup Times
Genetic Algorithm

In this study, unrelated parallel machine scheduling problem with unavailable time periods and sequence dependent setup times is discussed. A mathematical model and a genetic algorithm have been developed for the considered problem.

Purpose: In many factories, the production process may be interrupted periodically due to planned maintenance, lunch and rest breaks. It is important to consider these unavailable time periods when scheduling machines. For that reason, unrelated parallel machine scheduling problem with unavailable time periods and sequence dependent setup times is discussed in this study.

Theory and Methods: A mathematical model and a genetic algorithm have been developed for the considered problem.

Results: The performance of the proposed solution methods is demonstrated using randomly generated test problems. As can be seen from Table A, the optimum solutions to all 10 job problems are obtained within the time limit with the proposed model. Feasible solutions to 20 and 30 job problems are obtained except for two problems within the time limit. With the developed GA, the optimal solutions of the problems that their optimum is known are reached, and the solutions to other problems are improved. The greatest improvement rate is 58.2%.

Table A. Test Results

problem	GAMS		GA		Improvement %
	Z _{IPM-KMZ}	t (s.)	Z _{GA}	t (s.)	
10-2-1-1	269	4395	269	1	0,00
10-2-1-2	321	3900	321	1	0,00
10-2-1-3	283	3670	283	1	0,00
10-2-2-1	323	2173	323	1	0,00
10-2-2-2	383	5636	383	1	0,00
10-2-2-3	271	1754	271	1	0,00
20-3-1-1	388	7200	372	1	4,12
20-3-1-2	340	7200	295	1	13,24
20-3-1-3	439	7200	416	1	5,24
20-3-2-1	538	7200	416	1	22,68
20-3-2-2	470	7200	424	1	9,79
20-3-2-3	412	7200	374	1	9,22
30-4-1-1	-	7200	386	1	-
30-4-1-2	760	7200	329	1	56,71
30-4-1-3	694	7200	361	1	47,98
30-4-2-1	-	7200	372	1	-
30-4-2-2	645	7200	418	2	35,19
30-4-2-3	933	7200	390	2	58,20

Conclusion: By taking into account the unavailable time periods, an average of 5.29% reduction is achieved in the makespan. In addition, 26% on average more successful results are obtained in shorter times with the developed genetic algorithm than GAMS/Cplex.



Parallel Machine Scheduling Problem with Unavailable Time Periods and Sequence Dependent Setup Times

Feriştah ÖZÇELİK^{1,*} Tuğba SARAÇ¹

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26040, Odunpazarı/ESKİŞEHİR

Abstract

In many factories, the production process may be interrupted periodically due to planned maintenance, lunch and rest breaks. It is important to consider these unavailable time periods when scheduling machines. For that reason, unrelated parallel machine scheduling problem with unavailable time periods and sequence dependent setup times is discussed in this study. A mathematical model and a genetic algorithm have been developed for the considered problem. The performance of the proposed solution methods is demonstrated using randomly generated test problems. By taking into account the unavailable time periods, an average of 5.29% reduction is achieved in the makespan. In addition, 26% on average more successful results are obtained in shorter times with the developed genetic algorithm than GAMS/Cplex.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11.03.2022
Düzeltilme: 21.04.2022
Kabul: 19.06.2022

Keywords

Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem
Unavailable Time Periods
Sequence Dependent Setup Times
Genetic Algorithm

Anahtar Kelimeler

İlişkısiz Paralel Makine Çizelgeleme Problemi
Kullanılmayan Zaman Dilimleri
Sıra Bağımlı Hazırlık Süreleri
Genetik Algoritma

Kullanılmayan Zaman Dilimlerinin ve Sıra Bağımlı Hazırlık Sürelerinin Olduğu Paralel Makina Çizelgeleme Problemi

Öz

Pek çok fabrikada üretim süreci, planlı bakım, öğle yemeği ve dinlenme molaları gibi nedenlerle periyodik olarak kesintiye uğrayabilmektedir. Makineleri çizelgelerken kullanılmayan zaman dilimlerinin göz önünde bulundurulması önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmada kullanılmayan zaman dilimlerinin ve sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problem için bir matematiksel model ve bir genetik algoritma geliştirilmiştir. Önerilen çözüm yöntemlerinin performansı rassal üretilen test problemleri kullanılarak gösterilmiştir. Kullanılmayan zaman dilimlerinin dikkate alınmasıyla son işin tamamlanma zamanında ortalama %5,29'luk bir azalma sağlanmıştır. Ayrıca, geliştirilen genetik algoritma ile GAMS/Cplex'den ortalama %26 daha başarılı çözümler daha kısa sürelerde elde edilmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çizelgeleme literatüründe çalışmaların önemli bir kısmında makinaların sürekli olarak kullanılabilir durumda olduğu varsayılır. Oysa, pek çok sektörde üretim planlı bakım, öğle yemeği ve dinlenme molaları gibi nedenlerle periyodik olarak kesintilere uğramaktadır. Çizelgeleme yapılırken periyodik kullanılmayan zaman dilimlerinin dikkate alınmaması, işlerin tamamlanma zamanlarını uzatabilir. Literatürde kullanılmayan zaman dilimlerini dikkate alan tek makine çizelgeleme konulu çalışmalardan erişilebilenler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'den de görülebileceği gibi en çok ele alınan amaç fonksiyonlarından birisi C_{enb} 'tür ([1]-[7]). Ve çözüm yöntemi olarak genellikle metasezgisel ya da sezgisel algoritmalar ([1]-[7], [9]-[10], [12], [15]-[17]) kullanılmıştır.

Tablo 1. Kullanılmayan zaman dilimlerinin dikkate alındığı tek makine çizelgeleme çalışmaları

Kaynak	SBHS Amaç	Çözüm Yöntemi
Low vd. [1]	C_{enb}	HA
Perez-Gonzalez ve Framinan [2]	C_{enb}	HA
Ji ve Cheng [3]	C_{enb}	PTA
Rapine vd. [4]	C_{enb}	PTA
Shabtay ve Zofi [5]	C_{enb}	PTA
Shabtay [6]	C_{enb} , toplam kaynak tüketim maliyeti	PTA
Mor ve Mosheiov [7]	C_{enb} , toplam tamamlanma zamanı ve geciken iş sayısı	HA
Kacem vd. [8]	ağırlıklı toplam tamamlanma zamanı	DP, B&B
Khoudi ve Berrichi [9]	toplam gecikme ve makinenin kullanılmadığı süre	GA, B&B
Laalaoui ve M'Hallah [10]	ağırlıklı toplam geciken iş sayısı	VNS
Low vd. [11]	toplam erkenlik ve gecikme	MIP, DP
Mashkani ve Moslehi [12]	toplam tamamlanma zamanı	HA, B&B
Mor ve Shapira [13]	ağırlıklı toplam tamamlanma zamanı	DP
Mosheiov vd. [14]	toplam iş gecikmesi	DP
Su ve Wang [15]	tamamlanma zamanlarının toplam mutlak sapması	HA
Yazdani vd. [16]	toplam erkenlik ve gecikme	VNS
Yin vd. [17]	toplam iş gecikmesi	DP, PTA
Bülbül vd. [18]	tamamlanma zamanlarının toplam sapması	DP

SBHS: Sıra Bağımlı Hazırlık Süreleri, GA: Genetik Algoritma, B&B: Dal-Sınır, PTA: Polinom Zamanlı Algoritma, DP: Dinamik Programlama, VNS: Değişken Komşuluk Arama, HA: Sezgisel Algoritma, MIP: Karma Tamsayılı Programlama

Tek makine çizelgeleme dışındaki paralel makine, akış tipi ve atölye tipi gibi farklı ortamlara sahip makine çizelgeleme problemleri incelendiğinde kullanılmayan zaman dilimini dikkate alan çalışmaların sadece paralel makine çizelgelemeyle sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu kapsamda erişilen çalışmalar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2’den de görülebileceği gibi çalışmaların önemli bir kısmında tüm makinaların aynı özelliklere sahip olduğunun varsayıldığı özdeş paralel makine çizelgeleme problemi ([19]-[25]) ele alınmıştır. Üstelik Al-Shayea vd. [19] problemin sadece iki makinenin olduğu basit versiyonunu incelemişlerdir. İlişkisiz paralel makinaları dikkate alan sadece bir çalışmaya [27] erişilmiştir. Ancak dikkat edileceği üzere, Tablo 1 ve Tablo 2’de yer alan çalışmaların hiçbirisinde sıra bağımlı hazırlık süreleri (SBHS) ele alınmamıştır. Oysa eğer hazırlık süreleri sıra bağımlı ise başarısız bir iş sırası C_{enb} değerinin kontrolsüzce artmasına yol açabilir. Bu tür hazırlık sürelerinin pek çok sektörde olduğu da göz önünde bulundurulduğunda SBHS’nin dikkate alınmasının önemi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada SBHS’lerin ve kullanılmayan zaman dilimlerinin olduğu ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi literatürde ilk kez ele alınmıştır.

İzleyen bölümde ele alınan problem tanımlanmış ve geliştirilen matematiksel model sunulmuştur. Üçüncü bölümde önerilen genetik algoritma açıklanmış, dördüncü bölümde deneysel sonuçlar verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar ve geleceğe dair öneriler tartışılmıştır.

Tablo 2. Kullanılmayan zaman dilimlerinin dikkate alındığı paralel makine çizelgeleme çalışmaları

Kaynak	MO	SBHS	Amaç	Çözüm Yöntemi
Al-Shayea vd. [19]	P_2		C_{enb}	GA
Berrichi ve Yalaoui [20]	P_m		toplam gecikme	AC
Dong [21]	P_m		toplam maliyet	CG, B&B
Fu vd. [22]	P_m		toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı	PTA
Huo [23]	P_m		C_{enb}	PTA
Moradi ve Zandieh [24]	P_m		C_{enb} , sistemin kullanılmadığı süre	GA
Nessah ve Chu [25]	P_m		toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı	LB
Kaabi ve Harrath [26]	Q_m		C_{enb}	PTA
Wang ve Liu [27]	R_m		C_{enb} , sistemin kullanılmadığı süre	NSGA-II
Bu çalışma	R_m	✓	C_{enb}	VNS

MO: Makine Ortamı, SBHS: Sıra Bağımlı Hazırlık Süreleri, P_m : m özdeş paralel makine, Q_m : m farklı hızlara sahip (uniform) paralel makine, R_m : m ilişkisiz paralel makine, GA: Genetik Algoritma, AC: Karınca Kolonisi, CG: Sütun Türetme, B&B: Dal-Sınır, PTA: Polinom Zamanlı Algoritma, LB: Alt Sınır, VNS: Değişken Komşuluk Arama

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

Ele alınan problemde, n iş, m paralel makinede işlem görmektedir. j işinin her makinedeki işlem süresi (p_{jl}) farklıdır. İşlerin hazırlık süreleri sıra ve makine bağımlıdır. İşler sıfır zamanında hazırır. Her makine aynı anda sadece bir iş gerçekleştirebilmektedir. Her makinada kullanılabilen ve kullanılmayan zaman dilimleri (KMZ) mevcuttur. Bir iş kullanılmayan zaman dilime atanamaz ve bölünemez. Bu nedenle ya kullanılmayan zaman diliminden önce tamamlanmalıdır ya da kullanılmayan zaman dilimden sonra başlamalıdır. Amaç fonksiyonu, son işin tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir.

Önerilen matematiksel model (İPM-KMZ) ve bu modele ait kümeler, indisler, parametreler, karar değişkenleri, kısıtlar ve amaç fonksiyonu aşağıda verilmiştir;

Kümeler ve Indisler:

N : iş kümesi, $N = \{1, 2, \dots, n\}$

M : makine kümesi, $M = \{1, 2, \dots, m\}$

$Q = \{1, 2, \dots, e_{nb} \delta_i\}$ KMZ kümesi. Burada δ_i makine i 'nin KMZ sayısı

$i, j \in N$ iş indisi

$k \in N$ sıra indisi

$l \in M$ makine indisi

$f \in Q$ KMZ indisi

Parametreler:

p_{jl} : j işin l makinedeki işlem süresi

h_{jl} : j işin l makinede ilk sıraya atanması durumunda hazırlık süresi

s_{ijl} : i işi j işinden önce l makinede çizelgelenmişse sıra ve makine bağımlı hazırlık süresi

θ : yeterince büyük bir pozitif sayı

b_l : makine l 'deki kullanılmayan zaman diliminin süresi

σ_l : makine l 'deki kullanılabilir zaman diliminin süresi

Karar Değişkenleri:

x_{jkl} : eğer j . iş l . makinenin k . sırasına atandıysa 1, diğer durumda 0

e_j : j işinin başlama zamanı

C_j : j işinin tamamlanma zamanı

C_{enb} : enbüyük tamamlanma zamanı $C_{enb} = \max \{C_j\}$

e_{fl}^{UP} : makine l 'deki f . KMZ'nin başlama zamanı

C_{fl}^{UP} : makine l 'deki f . KMZ'nin tamamlanma zamanı

w_{jfl} : çakışma kısıtları için kullanılan 0-1 değişken. (1, eğer $C_j \leq e_{fl}^{UP}$; 0, eğer $C_{fl}^{UP} \leq e_j$).

(İPM-KMZ)**Amaç fonksiyonu:**

$$\min z_{İPM-KMZ} = C_{enb} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_j x_{jkl} \leq 1 \quad \forall k, l \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_l x_{jkl} = 1 \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j x_{jkl} - \sum_i x_{i(k-1)l} \leq 0 \quad \forall k, l \quad k > 1 \quad (4)$$

$$C_j \geq h_{jl} + p_{jl} - M(1 - x_{jkl}) \quad \forall j, k, l \quad k = 1 \quad (5)$$

$$C_j \geq C_i + p_{jl} + s_{ijl} - M(2 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l}) \quad \forall i, j, k, l \quad i \neq j, k > 1 \quad (6)$$

$$e_j \geq -M(1 - x_{jkl}) \quad \forall j, k, l \quad k = 1 \quad (7)$$

$$e_j \leq M(1 - x_{jkl}) \quad \forall j, k, l \quad k = 1 \quad (8)$$

$$e_j \geq C_j - p_{jl} - s_{ijl} - M(2 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l}) \quad \forall i, j, k, l \quad i \neq j, k > 1 \quad (9)$$

$$e_j \leq C_j - p_{jl} - s_{ijl} + M(2 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l}) \quad \forall i, j, k, l \quad i \neq j, k > 1 \quad (10)$$

$$C_{enb} \geq C_j \quad \forall j \quad (11)$$

$$e_{fl}^{UP} = \sigma_l \quad f = 1, \forall l \in M \quad (12)$$

$$C_{fl}^{UP} = C_{f-1,l}^{UP} + b_l + \sigma_l \quad f > 1, \forall l \in M \quad (13)$$

$$e_{fl}^{UP} = C_{fl}^{UP} - b_l \quad \forall f \in Q, \forall l \in M \quad (14)$$

$$C_{fl}^{UP} \leq e_j + \theta \left(1 - \sum_k x_{jkl} \right) + \theta w_{jff} \quad \forall j \in N, \forall f \in Q, \forall l \in M \quad (15)$$

$$C_j \leq e_{fl}^{UP} + \theta \left(2 - \sum_k x_{jkl} - w_{jff} \right) \quad \forall j \in N, \forall f \in Q, \forall l \in M \quad (16)$$

$$x_{jkl} \in \{0,1\} \quad \forall j, k \in N, \forall l \in M \quad (17)$$

$$e_j, C_j \geq 0 \quad \forall j \in N \quad (18)$$

$$C_{enb} \geq 0 \quad (19)$$

$$e_{fl}^{UP}, C_{fl}^{UP} \geq 0 \quad \forall f \in Q, \forall l \in M \quad (20)$$

$$w_{jf} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N, \forall f \in Q \quad (21)$$

Amaç (1) son işin tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir. Denklem (2) her makinanın her sırasına en fazla bir işin atanmasını sağlamaktadır. Denklem (3) her işin mutlaka bir makinanın bir sırasına atanmasını garanti etmektedir. Denklem (4) işlerin sıra atlamadan işlenmesini sağlamaktadır. Denklem (5) ve (6) işlerin tamamlanma zamanını hesaplama kısıtlarıdır. Denklem (7)-(8) ilk sıradaki, Denklem (9)-(10) sonraki sıralardaki işlerin başlama zamanlarını hesaplayan kısıtlardır. Denklem (11) son işin tamamlanma zamanını belirlemektedir. Denklem (12)-(14) kullanılmayan zaman dilimlerinin başlama ve bitiş zamanlarını hesaplamaktadır. Denklem (15) ve (16) her makinede işler ile kullanılmayan zamanların çakışmalarını önleyen kısıtlardır. Denklem (17)-(21) karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır.

3. ÖNERİLEN GENETİK ALGORİTMA (THE PROPOSED GENETIC ALGORITHM)

Genetik algoritma (GA), evrim teorisinden gelen ilkelere dayanan güçlü ve geniş çapta uygulanabilir stokastik arama ve eniyileme tekniğidir [28]. GA'da, her çözüm kromozom adı verilen bir sembol dizisi ile ifade edilir. Birden çok kromozomdan oluşan ve popülasyon adı verilen yapı kullanılarak aynı anda çok noktada eşzamanlı arama yapılır. GA, her nesil için seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerini kullanarak daha başarılı çözümleri araştırır. Geliştirilen genetik algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1: Rastgele bir başlangıç popülasyonu oluştur.

Adım 2: Mevcut popülasyondaki her kromozom için uyum değerini hesapla.

Adım 3: Mevcut nesile *ikili turnuva* seçim, *OX* çaprazlama ve *rastgele taşı*, *ikili yer değiştirme*, *tek makinada ikili yer değiştirme* mutasyon operatörlerinden rassal seçilen birisini uygulayarak yeni nesili türet.

Adım 4: Durdurma kriteri sağlandıysa DUR, sağlanmadıysa *Adım 2*'ye git.

Bu çalışmada çözümlerin gösteriminde permütasyon kodlama yapısı kullanılmıştır. Kromozom $(n + m - 1)$ adet genden oluşmaktadır. Kromozomun $(m - 1)$ geni '*'dır ve farklı bir makinarya geçildiğini gösterir. Üç paralel makinede çizelgelenen on iş için örnek bir kromozom Şekil 1'de verilmiştir.

2	7	3	*	9	1	6	10	*	5	4	8
---	---	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---

Şekil 1: Örnek bir kromozom

Şekil 1'deki örnek kromozomun karşı geldiği çözümde; 2, 7 ve 3 numaralı işler 1. makinarya, 9, 1, 6 ve 10 numaralı işler 2. makinarya ve 5, 4 ve 8 numaralı işler 3. makinarya verilen sırada atanmıştır.

Çaprazlama operatörü olarak ise OX kullanılmıştır. Bu operatörün çalışma mekanizması Şekil 2'de gösterilmiştir.

Ebeveyn 1	2	7	3	*	9	1	6	10	*	5	4	8
Ebeveyn 2	10	3	7	9	*	4	6	8	5	*	1	2
Çocuk	3	7	9	*	4	1	6	10	8	5	*	2

Şekil 2: OX çaprazlama operatörü

Şekil 2’de rassal olarak seçilen iki ebeveyn kromozomun ilkinden rassal bir parça seçilir. Şekilde seçilen parça gri ile işaretlenmiştir. Bu parça konumu korunarak doğrudan çocuk kromozoma aktarılır. İkinci ebeveyn kromozomdan mavi ile işaretli genler silinir ve kalan genler çocuk kromozomun boş genlerine sırası korunarak aktarılır.

Bu çalışmada üç farklı mutasyon operatörü kullanılmıştır. Bu operatörler; *rastgele taşı, ikili yer değiştirme, tek makinada ikili yer değiştirmedir*. *Rastgele taşı* operatöründe rassal olarak seçilen bir gen kromozomun rassal olarak seçilen bir noktasına taşınmaktadır. *İkili yer değiştirme* operatöründe kromozomun rassal olarak seçilen iki geni karşılıklı yer değiştirmektedir. *Tek makinada ikili yer değiştirme* operatöründe ise karşılıklı yer değiştirecek genler aynı makinadan seçilmektedir. Bu çalışmada *rastgele taşı, ikili yer değiştirme, tek makinada ikili yer değiştirme* mutasyon operatörleri sırasıyla %20, %40 ve %40 olasılıkla rassal seçilerek uygulanmıştır.

Geliştirilen GA’nın uyum fonksiyonu, önerilen matematiksel modelin amaç fonksiyonudur. Seçim operatörü olarak ikili turnuva kullanılmıştır. GA, 10000 nesil boyunca çözümü iyileştirememişse sonlandırılır. Popülasyon büyüklüğü 50, çaprazlama oranı 0,75 ve mutasyon oranı 0,01 olarak alınmıştır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR (COMPUTATIONAL RESULTS)

Tüm testler Intel (R) Core (TM) i7- 5700HQ CPU@2.70 GHz işlemcisi, 8 GB belleği ve Windows 10 işletim sistemine sahip bir bilgisayarda çözülmüştür. Önerilen matematiksel modelin çözümünde GAMS 24.0.2 Cplex çözücüsü kullanılmıştır. Geliştirilen GA ise Delphi’de kodlanmıştır. Bölüm 4.1’de, test problemlerinin türetilme mekanizması, bölüm 4.2’de örnek problem ve bölüm 4.3’de ise elde edilen test sonuçları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

4.1. Test Problemleri (Test Problems)

Önerilen yöntemlerin performansını test etmek için rassal olarak türetilen test problemleri kullanılmıştır. Türetilen test problemlerinin özellikleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Test Problemlerinin Özellikleri

$n-m$	10-2, 20-3, 30-4, 100-5, 150-6, 200-7
p_{jl}	$U[20,100]$
h_{jl}, s_{jkl}	$U[5,20]$
b_l	$U[20,30]$
σ_l	$\delta \frac{n}{m} \Delta$ burada $\delta \sim U[120,150]$, $\Delta \in \left\{ \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \right\}$

Altı adet iş-makina ($n-m$) kombinasyonu ve iki tip Δ değerine sahip olmak üzere 12 problem tipi oluşturulmuştur. Her bir problem tipi için üçer örnek olacak şekilde toplamda 36 adet test problemi türetilmiştir. Test problemleri $n-m-\Delta$ *tipi-örnek no* şeklinde isimlendirilmiştir. Δ *tipi* 1 ya da 2 değerini almaktadır. 1, Δ ’nın $\frac{1}{3}$, 2 ise Δ ’nın $\frac{1}{4}$ olduğu durumu temsil etmektedir.

4.2. Örnek Problem (Sample Problem)

Örnek problem 10 iş, 2 makine içermektedir. İşlerin makine bazlı üretim süreleri ve ilk hazırlık süreleri Tablo 4’te, sıra bağımlı hazırlık süreleri Tablo 5’te, kullanılabilir ve kullanılmayan zaman dilimlerinin süreleri ise Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 4. p_{jl} ve h_{jl} parametreleri

p_{jl}			h_{jl}		
j/l	1	2	j/l	1	2
1	92	57	1	14	13
2	66	41	2	12	15
3	84	46	3	11	8
4	57	45	4	5	13
5	76	76	5	11	14
6	48	95	6	6	13
7	42	90	7	10	10
8	51	56	8	8	16
9	32	44	9	9	19
10	40	69	10	13	13

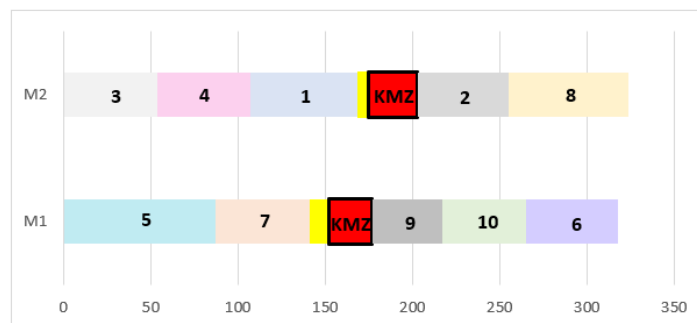
Tablo 5. s_{jkl} parametresi

$l=1$											$l=2$										
i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	13	9	14	17	13	8	9	14	6	1	0	11	5	15	17	9	16	17	6	13
2	11	0	18	15	19	16	6	8	11	17	2	17	0	10	19	9	13	13	13	19	9
3	11	8	0	6	7	15	9	18	10	7	3	14	18	0	8	7	20	15	13	16	10
4	8	16	20	0	7	14	18	13	6	12	4	5	10	14	0	11	10	20	20	9	19
5	19	5	11	18	0	17	12	8	14	15	5	16	11	19	8	0	13	6	5	17	20
6	17	15	8	13	6	0	18	10	9	11	6	8	18	7	6	7	0	7	10	12	10
7	15	16	6	17	18	18	0	14	8	12	7	19	20	8	14	11	11	0	19	12	16
8	16	18	18	15	7	7	11	0	13	8	8	11	13	14	10	19	6	9	0	6	6
9	14	7	16	7	18	12	10	7	0	8	9	16	14	19	13	8	12	18	12	0	19
10	13	18	15	9	8	5	16	17	16	0	10	9	10	7	18	14	12	6	8	11	0

Tablo 6. σ_l ve b_l parametreleri

l	σ_l	b_l
1	152	25
2	175	28

Ele alınan problemde KMZ'leri ele almanın son işin tamamlanma zamanına etkisini gösterebilmek amacıyla, iki farklı durum incelenmiştir. İlk durumda iş sıraları belirlenirken KMZ dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle örnek problem öncelikle önerilen matematiksel modelin (7)-(10) ve (12)-(18) kısıtları olmadan klasik ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi (İPM) olarak çözülmüş ve birinci makine için iş sırası 5, 7, 9, 10 ve 6 ikinci makine için ise iş sırası 3, 4, 1, 2, 8 olarak elde edilmiştir. Elde edilen iş sıraları sabitlenerek problem önerilen modelle çözülmüş ve son işin tamamlanma zamanı 324 olarak elde edilmiştir. Durum 1'e ait Gantt şeması Şekil 3'de verilmiştir.

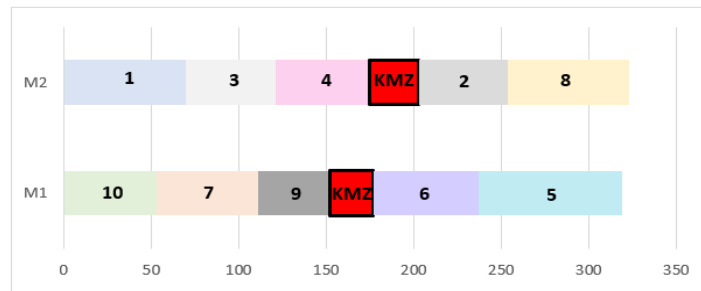


Şekil 3. Durum 1: İş sıralarının İPM ile elde edildiği çözüm için Gantt Şeması

Şekil 3'ten de görülebileceği gibi, Makine 1 (M1)'de KMZ'den önceki son iş olan 7 numaralı işin tamamlanma zamanı 141 olup KMZ'nin başlangıcı ise 152'dir. 11 birimlik bir bekleme oluşmuştur. Makine 2 (M2)'de KMZ'den önceki son iş olan 1 numaralı işin tamamlanma zamanı 169 olup KMZ'nin başlangıcı ise 175'dir. 6 birimlik bir bekleme oluşmuştur.

İkinci durumda, örnek problem önerilen matematiksel model ile 1682 saniyede çözülmüş ve eniyi amaç fonksiyonu değeri 323 olarak elde edilmiştir. Elde edilen çözüme ait Gantt Şeması Şekil 4'de verilmiştir. M1'de KMZ'den önceki son iş olan 9 numaralı işin tamamlanma zamanı 151 olup KMZ'nin başlangıcı ise 152'dir. Sadece 1 birimlik bir bekleme oluşmuştur. Benzer şekilde M2'de KMZ'den önceki son iş olan 4 numaralı işin tamamlanma zamanı 174 olup KMZ'nin başlangıcı ise 175'dir. Yine sadece 1 birimlik bir bekleme oluşmuştur.

Durum 1 ve Durum 2 birlikte değerlendirildiğinde KMZ'lerin dikkate alınmasıyla hem KMZ'lerden önceki makinelerin boş bekleme sürelerinde önemli bir düşüş hem de son işin tamamlanma zamanında azalma sağlanmıştır.



Şekil 4. Durum 2: Örnek Problemin İPM-KMZ ile çözülmesiyle elde edilen Gantt Şeması

4.2. Test Sonuçları (Test Results)

Öncelikle 10 iş 2 makinalı problemler için KMZ'leri ele almanın son işin tamamlanma zamanına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ilgili problemler hem İPM-KMZ modeli ile çözülmüş hem de İPM ile elde edilen iş sıraları sabitlenerek İPM-KMZ modelinin amaç fonksiyonu değerleri ($Z_{İPM}$) hesaplanmıştır. Süre limiti içinde tüm problemlerin eniyi çözümlerine ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir. Burada son sütunda yer alan % *fark* değerleri (22) numaralı formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%fark = \frac{Z_{İPM} - Z_{İPM-KMZ}}{Z_{İPM}} 100 \quad (22)$$

Tablo 7'den de görülebileceği gibi KMZ'lerin dikkate alınmasıyla C_{enb} değeri en fazla %11,84, ortalama %5,29 oranında azaltılmıştır.

Tablo 7. KMZ'leri dikkate almanın etkisi

problem	İPM-KMZ GAMS		İPM GAMS		% fark
	$Z_{İPM-KMZ}$	$t (sn.)$	$Z_{İPM}$	$t (sn.)$	
10-2-1-1	269	4395	284	1104	5,28
10-2-1-2	321	3900	331	2477	3,02
10-2-1-3	283	3670	321	1399	11,84
10-2-2-1	323	2173	324	1602	0,31
10-2-2-2	383	5636	432	2351	11,34
10-2-2-3	271	1754	271	1649	0,00

Daha sonra $n \leq 30$ ve $n \geq 100$ problemleri önerilen İPM-KMZ modeli ve geliştirilen GA ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmiştir. Tablo 8'de son sütunda yer alan %iyileşme değerleri (23) numaralı formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%iyileşme = \frac{Z_{İPM-KMZ} - Z_{GA}}{Z_{İPM-KMZ}} 100 \quad (23)$$

Tablo 8. $n \leq 30$ problemlerinin test sonuçları

problem	GAMS		GA		% iyileşme
	$Z_{İPM-KMZ}$	t (sn.)	Z_{GA}	t (sn.)	
10-2-1-1	269	4395	269	1	0,00
10-2-1-2	321	3900	321	1	0,00
10-2-1-3	283	3670	283	1	0,00
10-2-2-1	323	2173	323	1	0,00
10-2-2-2	383	5636	383	1	0,00
10-2-2-3	271	1754	271	1	0,00
20-3-1-1	388	7200	372	1	4,12
20-3-1-2	340	7200	295	1	13,24
20-3-1-3	439	7200	416	1	5,24
20-3-2-1	538	7200	416	1	22,68
20-3-2-2	470	7200	424	1	9,79
20-3-2-3	412	7200	374	1	9,22
30-4-1-1	-	7200	386	1	-
30-4-1-2	760	7200	329	1	56,71
30-4-1-3	694	7200	361	1	47,98
30-4-2-1	-	7200	372	1	-
30-4-2-2	645	7200	418	2	35,19
30-4-2-3	933	7200	390	2	58,20

Tablo 9. $n \geq 100$ problemlerinin test sonuçları

problem	GAMS		GA	
	$Z_{İPM-KMZ}$	t (sn.)	Z_{GA}	t (sn.)
100-5-1-1	-	7200	909	80
100-5-1-2	-	7200	922	50
100-5-1-3	-	7200	877	85
100-5-2-1	-	7200	927	144
100-5-2-2	-	7200	932	58
100-5-2-3	-	7200	905	80
150-6-1-1	-	7200	1126	142
150-6-1-2	-	7200	1114	164
150-6-1-3	-	7200	1187	104
150-6-2-1	-	7200	1175	147
150-6-2-2	-	7200	1162	197
150-6-2-3	-	7200	1158	177
200-7-1-1	-	7200	1365	158
200-7-1-2	-	7200	1373	199
200-7-1-3	-	7200	1376	271
200-7-2-1	-	7200	1335	343
200-7-2-2	-	7200	1359	311
200-7-2-3	-	7200	1347	363

Tablo 8'den de görülebileceği gibi, problemler önerilen İPM-KMZ modeli ile çözüldüğünde, tüm 10 boyutlu problemlerin süre limiti içinde eniyi çözümlerine ulaşılmıştır. 30-4-1-1 ve 30-4-2-1 problemlerine süre limiti içinde uygun çözüm bulunamazken diğer problemler için uygun çözümler elde edilmiştir.

Geliştirilen GA ile eniyi çözümleri bilinen tüm problemlerin eniyi çözümlerine ulaşılmıştır. Matematiksel model ile çözülemeyen problemlere uygun çözüm bulunmuş ve modelle uygun çözümleri elde edilen tüm problemlerin C_{enb} değerleri de iyileştirilmiştir. Enbüyük iyileşme oranı 30-4-2-3 problemi için %58,2 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 9'dan da görülebileceği gibi, $n \geq 100$ problemlerinin hiçbirisine önerilen İPM-KMZ modeli ile süre limiti içinde uygun çözüm bulunamamıştır. Geliştirilen GA ile ise tüm problemler için uygun çözümler elde edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada sıra bağımlı hazırlık sürelerinin ve kullanılmayan zaman dilimlerinin olduğu ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problem için bir matematiksel model ve bir genetik algoritma geliştirilmiştir. Önerilen çözüm yöntemlerinin performansı rassal türetilen test problemleri kullanılarak gösterilmiştir. Kullanılmayan zaman dilimlerinin dikkate alınmasıyla son işin tamamlanma zamanında ortalama %5,29'luk bir azalma sağlanmıştır. Önerilen matematiksel model ve GAMS/Cplex ile süre limiti içinde 10 boyutlu problemlerin en iyi çözümleri elde edilmiştir. 20 ve 30 boyutlu problemler için uygun çözümlere ulaşılrken, 100 ve daha büyük boyutlu problemler çözülememiştir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için geliştirilen GA ile bu problemlerin uygun çözümlerine erişilmiştir. Ayrıca geliştirilen GA, 10 boyutlu problemlerin en iyi çözümlerine ulaşmıştır. 20 ve 30 boyutlu problemlerin GAMS/Cplex ile elde edilmiş çözümleri ise ortalama %26 iyileştirilmiştir. Gelecekte, geliştirilen matematiksel model ve genetik algoritma, kullanılmayan zaman dilimlerinin daha önce hiç dikkate alınmadığı akış tipi ve atölye tipi çizelgeleme problemlerine uyarlanabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Low C., Ji M., Hsu C-J., Su C-T. (2010). Minimizing the makespan in a single machine scheduling problems with flexible and periodic maintenance, *Applied Mathematical Modelling*, 34, 334–342.
- [2] Perez-Gonzalez P., Framinan J.M. (2018). Single machine scheduling with periodic machine availability, *Computers & Industrial Engineering*, 123, 180–188.
- [3] Ji M., Cheng T.C.E. (2010). Scheduling resumable simple linear deteriorating jobs on a single machine with an availability constraint to minimize makespan, *Computers & Industrial Engineering*, 59, 794–798.
- [4] Rapine C., Brauner N., Finke G., Lebacque V. (2012). Single machine scheduling with small operator-non-availability periods, *Journal of Scheduling*, 15, 127–139.
- [5] Shabtay D., Zofi, M. (2018). Single machine scheduling with controllable processing times and an unavailability period to minimize the makespan, *International Journal of Production Economics*, 198, 191–200.
- [6] Shabtay D. (2022). Single-machine scheduling with machine unavailability periods and resource dependent processing times, *European Journal of Operational Research*, 296, 423–439.
- [7] Mor B., Mosheiov G. (2012). Heuristics for scheduling problems with an unavailability constraint and position-dependent processing times, *Computers & Industrial Engineering*, 62, 908–916.
- [8] Kacem I., Chu C., Souissi A. (2008). Single-machine scheduling with an availability constraint to minimize the weighted sum of the completion times, *Computers & Operations Research*, 35, 827 – 844.
- [9] Khoudi A., Berrichi A. (2020). Minimize total tardiness and machine unavailability on single machine scheduling problem: bi-objective branch and bound algorithm, *Operational Research*, 20, 1763–1789.

- [10] Laalaoui Y., M'Hallah R. (2016). A binary multiple knapsack model for single machine scheduling with machine unavailability, *Computers & Operations Research*, 72, 71–82.
- [11] Low C., Li R-K., Wu G-H. (2016). Minimizing total earliness and tardiness for common due date single-machine scheduling with an unavailability interval, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 6124734
- [12] Mashkani O., Moslehi G. (2016). Minimising the total completion time in a single machine scheduling problem under bimodal flexible periodic availability constraints, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(3), 323-341.
- [13] Mor B., Shapira D. (2022). Single machine scheduling with non-availability interval and optional job rejection, *Journal of Combinatorial Optimization*, In press.
- [14] Mosheiov G., Oron D. Shabtay D. (2021). Minimizing total late work on a single machine with generalized due-dates, *European Journal of Operational Research*, 293, 837–846.
- [15] Su L-H, Wang H-M. (2017). Minimizing total absolute deviation of job completion times on a single machine with cleaning activities, *Computers & Industrial Engineering*, 103, 242–249.
- [16] Yazdani M., Khalili S.M., Babagolzadeh M., Jolai F. (2017). A single-machine scheduling problem with multiple unavailability constraints: A mathematical model and an enhanced variable neighborhood search approach, *Journal of Computational Design and Engineering*, 4, 46–59.
- [17] Yin Y., Xu J., Cheng T. C. E., Wu C-C, Wang D-J. (2016). Approximation schemes for single-machine scheduling with a fixed maintenance activity to minimize the total amount of late work, *Naval Research Logistics*, 63, 172–183.
- [18] Bülbül K., Kedad-Sidhoum S., Sen H. (2019). Single-machine common due date total earliness/tardiness scheduling with machine unavailability, *Journal of Scheduling*, 22, 543–565.
- [19] Al-Shayea A.M., Saleh M. , Alatefi M., Ghaleb M. (2020). Scheduling two identical parallel machines subjected to release times, *Delivery Times and Unavailability Constraints, Processes*, 8, 1025.
- [20] Berrichi A., Yalaoui F. (2013). Efficient bi-objective ant colony approach to minimize total tardiness and system unavailability for a parallel machine scheduling problem, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 2295–2310.
- [21] Dong M. (2013). Parallel machine scheduling with limited controllable machine availability, *International Journal of Production Research*, 51(8), 2240-2252.
- [22] Fu B., Huo Y., Zhao H. (2011). Approximation schemes for parallel machine scheduling with availability constraints, *Discrete Applied Mathematics*, 159, 1555–1565.
- [23] Huo Y. (2019). Parallel machine makespan minimization subject to machine availability and total completion time constraints, *Journal of Scheduling*, 22, 433–447.
- [24] Moradi E., Zandieh M. (2010). Minimizing the makespan and the system unavailability in parallel machine scheduling problem: a similarity-based genetic algorithm, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51, 829–840.
- [25] Nessah R., Chu C. (2010). Infinite split scheduling: a new lower bound of total weighted completion time on parallel machines with job release dates and unavailability periods, *Annals of Operations Research*, 181, 359–375.
- [26] Kaabi J., Harrath Y. (2019). Scheduling on uniform parallel machines with periodic unavailability constraints, *International Journal of Production Research*, 57(1), 216-227.

- [27] Wang S., Liu M. (2015). Multi-objective optimization of parallel machine scheduling integrated with multi-resources preventive maintenance planning, *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 182–192.
- [28] Gen M., Cheng R. (1997). *Genetic algorithms and engineering design*, John Wiley and Sons.