



MAKİNE VE KALIP BAKIMLARININ DAHİL EDİLDİĞİ ÜRETİM ÇİZELGELEME PROBLEMİ

Büşra TUTUMLU^{1*}, Tuğba SARAÇ²

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-0662-8128>

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-8115-3206>

Anahtar Kelimeler

Planlı bakım,
Kalıp bakımları,
Çizelgeleme problemi,
Karma tamsayılı
matematiksel model.

Öz

Plastik enjeksiyon, seramik ve metal döküm dahil olmak üzere birçok üretim sürecinde kalıplar kullanılmaktadır ve belirli zamanlarda bu kalıplara bakım yapılması gerekmektedir. Üretim sürecinde aksamalar yaşanmaması için, işler çizelgelenirken, makine ve kalıp bakımları da dikkate alınmalıdır. Literatürde çoğunlukla sadece makine bakımları ele alınmaktadır. Oysaki bir makine bakımında iken o makinedeki kalıp başka bir makineye monte edilerek kullanılabilir veya bir kalıp bakımında ise makineye başka bir kalıp monte edilerek makine kullanılabilir. Bu nedenle üretim çizelgesine hem makine hem de kalıp bakımlarının dahil edilmesi önemlidir. Bu çalışmada, makinelerin ve kalıpların planlı bakımlarının dahil edildiği üretim çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problemde her iş belirli bir kalıp tipi ve belirli makinelerde gerçekleştirilmektedir. Hazırlık süreleri sıraya bağımlıdır ve hammadde değişimi gibi işlemler için geçiş süresi ve kalıp değişim süresi olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Planlı bakımlar, bir zaman penceresi içerisinde başlamalıdır. Ele alınan problemin çözümü için bir matematiksel model önerilmiştir. Planlı bakım başlama zamanlarının bir zaman penceresi içinde esnek olmasının katkısını gösterebilmek için önerilen matematiksel model bakım zamanlarının sabit

*Sorumlu yazar; e-posta : busra.tutumlu26@gmail.com

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1659788>

alındığı ve bakımların çizelgeye sonradan dahil edildiği durumlarla kıyaslanmıştır.

PRODUCTION SCHEDULING PROBLEM INCLUDING MACHINE AND MOLD MAINTENANCE

Keywords	Abstract
Planned maintenance, Mold maintenance, Scheduling problem, Mixed integer mathematical model.	Molds are used in many production processes including plastic injection, ceramic and metal casting and these molds need to be maintained at certain times. To avoid disruptions in the production process, machine and mold maintenance should also be taken into account when scheduling jobs. In the literature, only machine maintenance is mostly addressed. However, when a machine is under maintenance, the mold in that machine can be used by mounting it to another machine or when a mold is under maintenance, another mold can be mounted to the machine and the machine can be used. Therefore, it is important to include both machine and mold maintenance in the production schedule. In this study, a production scheduling problem is addressed in which planned maintenance of machines and molds is included. In the considered problem, each job is performed on a specific mold type and specific machines. Setup times are dependent on the sequence and consist of two stages: raw material change time and mold change time. Planned maintenance should start within a time window. A mathematical model is proposed for the solution of the considered problem. To demonstrate the contribution of the flexibility of planned maintenance start times within a time window, the proposed mathematical model is compared with the cases where maintenance times are taken as fixed and maintenances are added to the schedule later.
Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 17.03.2025	Submission Date : 17.03.2025
Kabul Tarihi : 11.04.2025	Accepted Date : 11.04.2025

1. Giriş

Etkin çizelgeler oluşturmak, modern üretim sistemlerinde önemli bir unsurdur. Etkin bir çizelgede üretim kaynaklarının verimli kullanılması gerekmektedir. İşletmelerde üretim kaynaklarının arızalarını azaltmak için bu kaynaklara belirli zamanlarda bakım yapılmaktadır. Çizelgeleme problemlerini konu alan çalışmalarda, genellikle üretim kaynaklarının planlama periyodu boyunca

kullanılabilir olduğu varsayılmaktadır (Geurtsen, Didden, Adan, Atan ve Adan, 2023). Oysa bir kaynak bakım sürecindeyken o kaynağa atanan işler zamanında tamamlanamayacaktır. Bu durumda işler gecikecektir ve işletmeler için büyük kayıplara neden olacaktır. İşletmelerin üretim verimliliğini artırabilmesi ve maliyetlerini en aza indirebilmesi için üretim ve bakım çizelgelerinin birbirine uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir. İşler çizelgelenirken, kaynakların, görevlerin ve zamanın organize edilmesine, bakımlar planlanırken ise makinelerin arızasız bir şekilde daha uzun kullanımına ve güvenilirliğine odaklanılmaktadır. Hem üretimin çizelgelenmesi hem de bakımların planlanması, operasyonları kesintisiz bir şekilde yerine getirmek ve talebi karşılamak için kritiktir.

Üretim ortamında kaynak bakımı deyince ilk akla gelen, genellikle birincil üretim kaynağı olan makinelerdir. Ancak, üretim sürecini destekleyen yardımcı ekipmanlar da üretim verimliliğinde önemli bir rol oynamaktadırlar. İkincil üretim kaynakları olarak kabul edilebilecek bu ekipmanlara kalıplar, takım uçları gibi örnekler verilebilir. Bu kaynakların üretim sürecinde kullanımı ile, zamanla aşınma ve yıpranma söz konusudur. Bu da ürünlerin kalitesini ve üretim sürekliliğini doğrudan etkilemektedir. Üretim sürekliliğinin sağlanması için sadece makine bakımlarının yapılması yeterli değildir. Bu yüzden ikincil üretim kaynak bakımlarının da doğru zamanlarda yapılması önem arz etmektedir.

Literatürde paralel makine çizelgeleme probleminde hem üretim hem de planlı bakımı ele alan çalışmalar araştırılmış ve erişilebilenler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1’den de görülebileceği gibi planlı bakımların dikkate alındığı paralel makine çizelgeleme problemlerinin çoğunda yalnızca makinelerin bakımlarına odaklanılmıştır. İncelenen literatürde, hem makine hem de kalıp bakımını göz önünde bulunduran tek bir çalışmaya erişilmiştir. Wang ve Liu (2015), bir işin tüm paralel makinelerden herhangi birine atanabileceği ve üretiminin tüm kalıplardan herhangi biri ile gerçekleştirilebileceğini varsaymıştır. Ayrıca, yazarlar hazırlık sürelerini göz ardı etmişlerdir. Oysa, pek çok üretim sürecinde her işin kendine özgü kalıp tipi vardır ve bazı işler bazı makinelerde işlem görememektedir. Bu yüzden aynı makineye atanan ardışık işler için farklı kalıplar gerektiğinde, kalıp değişim için hazırlık süreleri dikkate alınmalıdır.

Tablo 1

Planlı Bakımı Ele Alan Paralel Makine Çizelgeleme Çalışmaları

Yayın	Makine	Kalıp	Yayın	Makine	Kalıp
bu çalışma	✓	✓	Zhang, Liu, Lin ve Wu (2020)	✓	
Wang ve Liu (2015)	✓	✓	Lei ve Liu (2020)	✓	
Kurt ve Çetinkaya (2024)	✓		Shen ve Zhu (2019)	✓	
Sharifi, Ghaleb ve Taghipour (2023)	✓		Wang ve Pan (2019)	✓	
Lee, Lee ve Kim (2023)	✓		Lu, Liu, Pei, Thai ve Pardalos (2018)	✓	
Chen, Yang, Qiu ve Dauzère-Pérès (2023)	✓		Su, Hsiao, Zhou ve Chou (2018)	✓	
Santoro ve Junqueira (2023)	✓		Yin, Wang, Cheng, Liu ve Li (2017)	✓	
Chen, Zhong, Shena, Mumt ve Chou, F. (2023)	✓		Li, Liu, Sethi ve Xu (2017)	✓	
Hu, Lu, Kong, Liu ve Pardalos (2023)	✓		Yoo ve Lee (2016)	✓	
Chen, Guan, Wang, Chou ve Yue (2022)	✓		He, Li ve Xu (2016)	✓	
Lei ve Yang (2022)	✓		Lee ve Kim (2015)	✓	
Li, Xiong ve Lei (2022)	✓		Wang, Huang ve Feng (2014)	✓	
Lei ve He (2022)	✓		Berrichi ve Yalaoui (2013)	✓	
Zhang ve Chen (2022)	✓		Mellouli, Kacem, Sadfi ve Chu (2013)	✓	
He, Wang, Khazhina, Wang ve Wang (2022)	✓		Yang, Cheng, Yang ve Hsu (2012)	✓	
Krim, Zufferey, Potvin, Benmansour ve Duvivier (2022)	✓		Fu, Huo ve Zhao (2011)	✓	
Babaeimorad, Fatthi ve Fazlollahtabar (2021)	✓		Tan, Chen ve Zhang (2011)	✓	
Sun, Zhang ve Ning (2021)	✓		Cheng, Hsu ve Yang (2011)	✓	
Lei ve Yi (2021)	✓		Yang (2011)	✓	
Chen, Huang, Huang, Huang ve Chou (2021)	✓		Moradi ve Zandieh (2010)	✓	
Furugi (2021)	✓		Xu, Sun ve Li (2008)	✓	
Agárdi ve Nehéz (2021)	✓		Sheen ve Liao (2007)	✓	
Al-Shayea, Saleh, Alatefi ve Ghaleb (2020)	✓		Chen (2006)	✓	

Bu çalışmada, makine bakımının yanı sıra özellikle plastik enjeksiyon, seramik, cam ve metal döküm gibi birçok sektörün üretim sürecinde makine kadar önemli olan kalıpların da bakımlarının dikkate alındığı paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Her iş kendine özgü kalıp tipi ile üretilebilmektedir ve makine uygunlukları söz konusudur. Ayrıca hem makinelerin hem de kalıpların bakımları önceden tanımlanmış zaman pencereleri içinde başlamalıdır. Bunların yanı sıra, çizelgeleme literatüründe son yıllarda yaygın olarak kullanılan sıraya bağımlı hazırlık süresi kavramı bu çalışmada hem bir işten bir işe geçiş yaparken hammadde değişimi veya makine ayarları için geçiş süresi hem de eğer işlerin kullandıkları kalıplar farklı ise kalıp değişim süresi olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Ele alınan bu problem için karma tamsayılı bir matematiksel model önerilmiştir. Bakım başlama zamanlarını esnek ele almanın katkısını gösterebilmek için, önerilen model ile elde edilen çözümler ilk olarak gerçek hayattaki işletmelerde sıklıkla görülen yani bakımların dahil edilmeden işlerin çizelgelendiği ve bu çizelgeye daha sonra bakımların dahil edildiği durum ile kıyaslanmıştır. İkinci olarak ise önerilen model ile elde edilen çözümler, başlama zamanlarının belirli olduğu makine ve kalıp bakımlarının dahil edildiği çizelgeleme problemi çözülerek elde edilen çözümler ile karşılaştırılmıştır. Bu analizlerin yanı sıra, hem makine hem de kalıp bakımlarının zaman pencerelerinin sıkı ve gevşek olduğu durumlar analiz edilmiştir. Ayrıca önerilen model ile belirlenen süre limiti içerisinde çözülebilecek problem boyutu da araştırılmıştır.

İzleyen bölümde ele alınan problem tanımlanmış ve önerilen matematiksel model verilmiştir. Üçüncü bölümde deneysel sonuçlar detaylı olarak açıklanmıştır. Son bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur.

2. Problem Tanımı ve Matematiksel Model

Ele alınan problemde n adet iş, m adet paralel makine ve farklı tipte toplam δ adet kalıp bulunmaktadır. Her iş paralel makinelerden birisine atanmalıdır. Makinelerin iş sıraları ve her bir işin hangi kalıpla üretimin gerçekleştirileceği belirlenmelidir. Her iş, her makinede veya her kalıpla işlenememektedir. Bir makinede aynı anda sadece bir iş işlenebilmektedir. İşlem süreleri makineye bağlı olarak değişmektedir.

Her işten önce hazırlık gerekmektedir. Hazırlık işlemi ilk ve sonraki sıralardaki işler için farklı yapıdadır. İlk sıradaki işler için tek aşamalı ve makineye bağlı bir hazırlık gerekirken, ikinci ve sonraki sıralardaki işler için ise iki aşamadan oluşan bir hazırlık yapılmalıdır. Hazırlığın ilk aşamasında makine ayarlarının yapılması, hammaddelerin hazırlanması ve temizlik gibi işlemler yer almaktadır. Bu aşamanın süresi hem iş sırasına hem de makineye bağlıdır. Hazırlığın ikinci aşamasında ise kalıp değişimi yapılmaktadır. İkinci aşamanın süresi hangi kalıptan hangi kalıba geçildiğine ve bu işlemlerin hangi makinede yapıldığına bağlı olarak değişmektedir.

Ele alınan problemde işlerin yanı sıra planlı bakımların da çizelgelenmesi gerekmektedir. Makine bakımı ve kalıp bakımı olmak üzere iki tip bakım söz konusudur. Hem makineler hem de kalıplar için bakım işlemlerine, önceden belirlenen bir zaman aralığı içinde başlanmalıdır. Bakımda olan bir makine herhangi bir işi işleyemediğinden o makinedeki kalıp başka bir makineye bağlanarak kullanılabilir. Ayrıca bir makineye bağlanmış olan bir kalıba bakım yapılması gerektiğinde ise bu kalıp yerine alternatif bir kalıp bağlanarak ilgili makinenin üretim faaliyetlerinin devam etmesi sağlanmaktadır.

Ele alınan problemin çözümü için işlerin toplam tamamlanma zamanlarının enküçüklenmesini amaçlayan karma tamsayılı bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelin indis kümeleri, parametreleri, karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtları aşağıda verilmiştir.

indisler:

$i, j \in N$ belirli bir işi ve $k \in N$ iş sırasını göstermek için kullanılan indislerdir.

$$N = \{1, 2, \dots, n\}$$

$l, q \in M$ belirli bir makineyi göstermek için kullanılan indislerdir. $M = \{1, 2, \dots, m\}$

$\rho \in G$ kalıp tipini göstermek için kullanılan indistir. $G = \{1, 2, \dots, g\}$

$r, v \in R$ kalıbı göstermek için kullanılan indislerdir. $R = \{1, 2, \dots, \varphi\}$

parametreler:

n : iş sayısı

m : makine sayısı

g : kalıp tipi sayısı

ω_ρ : ρ . kalıp tipinin kopya sayısı

φ : kalıp sayısı ($\varphi = \sum_\rho \omega_\rho$)

p_{jl} : l . makinedeki j . işin işlem süresi

b_{jl} : j . iş l . makinede üretilebiliyor ise 1, üretilemiyorsa 0.

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

s_{ijl} : l . makinede i . işten j . işe geçiş süresi

δ_{vr} : l . makinede v . kalıbın sökülüp r . kalıbın bağlanması için gerekli süre

u_{jr} : j . iş r . kalıbı kullanıyorsa 1, kullanılmıyorsa 0

b'_l : l . makinenin bakımı için gerekli süre

b_r'' : r . kalıbın bakımı için gerekli süre

γ_l^{enk} : l . makinenin bakımına en erken başlanabilecek zaman

γ_l^{enb} : l . makinenin bakımına en geç başlanabilecek zaman

σ_r^{enk} : r . kalıbın bakımına en erken başlanabilecek zaman

σ_r^{enb} : r . kalıbın bakımına en geç başlanabilecek zaman

M : yeterince büyük bir pozitif sayı

karar değişkenleri:

x_{jkl} : j . iş k . sırada l . makineye atandıysa 1, atanmadıysa 0.

y_{jr} : j . işe r . kalıp atandıysa 1, atanmadıysa 0.

a_j : j . işin başlama zamanı

a'_l : l . makine bakımının başlama zamanı

a_r'' : r . kalıp bakımının başlama zamanı

C_j : j . işin tamamlanma zamanı

π_{ijr} : r . kalıbın atandığı i . iş ve j . işin çakışmasını önleyen kısıtlar için kullanılan yardımcı 0-1 karar değişkenidir.

α_{jl} ve γ'_{jr} : makine ve kalıp bakımlarının zaman penceresi kısıtlarının sağlanabilmesi için gereken yardımcı 0-1 karar değişkenidir.

amaç fonksiyonu:

$$enk\ z = \sum_j C_j \quad (1)$$

kısıtlar:

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

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

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

$$\sum_k x_{jkl} \leq b_{jl} \quad \forall j, l \quad (5)$$

$$C_j \geq h_{jl} + p_{jl} - M(1 - x_{jkl}) \quad \forall j, k, l : k = 1 \quad (6)$$

$$C_j \geq C_{il} + s_{ijl} + \delta_{vrl} + p_{jl} - M(4 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l} - y_{jr} - y_{iv}) \quad (7)$$

$$\forall i, j, k, l, v, r : i \neq j, k > 1, u_{iv} = 1, u_{jr} = 1$$

$$a_j \geq C_j - h_{jl} - p_{jl} - M(1 - x_{jkl}) \quad \forall j, k, l : k = 1 \quad (8)$$

$$a_j \leq C_j - h_{jl} - p_{jl} + M(1 - x_{jkl}) \quad \forall j, k, l : k = 1 \quad (9)$$

$$a_j \geq C_j - p_{jl} - s_{ijl} - \delta_{vrl} - M(4 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l} - y_{jr} - y_{iv}) \quad (10)$$

$$\forall i, j, k, l, v, r : i \neq j, k > 1, u_{iv} = 1, u_{jr} = 1$$

$$a_j \leq C_{jl} - p_{jl} - s_{ijl} - \delta_{vrl} + M(4 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l} - y_{jlr} - y_{ilv}) \quad (11)$$

$$\forall i, j, k, l, v, r : i \neq j, k > 1, u_{iv} = 1, u_{jr} = 1$$

$$\sum_{u_{jr}=1}^r y_{jr} = 1 \quad \forall j \quad (12)$$

$$y_{jr} \leq u_{jr} \quad \forall j, r \quad (13)$$

$$C_i \leq a_j + M(2 - y_{ir} - y_{jr}) + M\pi_{ijr} \quad \forall i, j, r : i \neq j, u_{ir} = 1, u_{jr} = 1 \quad (14)$$

$$C_j \leq a_i + M(2 - y_{ir} - y_{jr}) + M(1 - \pi_{ijr}) \quad \forall i, j, r : i \neq j, u_{ir} = 1, u_{jr} = 1 \quad (15)$$

$$a'_l \geq C_j - M(2 - \sum_k x_{jkl} - \alpha_{il}) \quad \forall j, l : b'_l > 0 \quad (16)$$

$$a'_l + b'_l \leq a_j + M(1 - \sum_k x_{jkl} + \alpha_{il}) \quad \forall j, l : b'_l > 0 \quad (17)$$

$$a'_l \geq \gamma_l^{enk} \quad \forall l : b'_l > 0 \quad (18)$$

$$a'_l \leq \gamma_l^{enb} \quad \forall l : b'_l > 0 \quad (19)$$

$$a''_r \geq C_j - M(2 - y_{jr} - y'_{jr}) \quad \forall j, r : b''_r > 0, u_{jr} = 1 \quad (20)$$

$$a''_r + b''_r \leq a_j + M(1 - y_{jr} + y'_{jr}) \quad \forall j, r : b''_r > 0, u_{jr} = 1 \quad (21)$$

$$a''_r \geq \sigma_r^{enk} \quad \forall r : b''_r > 0 \quad (22)$$

$$a''_r \leq \sigma_r^{enb} \quad \forall r : b''_r > 0 \quad (23)$$

$$x_{jkl} \in \{0,1\} \quad \forall j, k, l \quad (24)$$

$$y_{jr}, y'_{jr} \in \{0,1\} \quad \forall j, r \quad (25)$$

$$\pi_{ijr} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, r \quad (26)$$

$$\alpha_{jl} \in \{0,1\} \quad \forall j, l \quad (27)$$

$$C_j, a_j \geq 0 \quad \forall j \quad (28)$$

$$a'_l \geq 0 \quad \forall l \quad (29)$$

$$a''_r \geq 0 \quad \forall r \quad (30)$$

Amaç (1), işlerin tamamlanma zamanlarının toplamının enküçüklenmesidir. Denklem (2), her makinenin bir sırasına en fazla bir işin atanmasını ve Denklem (3), her işin mutlaka bir makineye atanmasını sağlamaktadır. Denklem (4), aynı makineye atanan işlerin sıra atlamadan gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Denklem (5), makine uygunluk kısıtıdır. Denklem (6), her makinelerdeki ilk sıradaki işlerin ve Denklem (7), ikinci ve sonraki sıradaki işlerin tamamlanma zamanlarını hesaplayan kısıtlardır. Denklem (8)-(11) işlerin başlama zamanlarını hesaplayan kısıtlardır. Denklem (12), her işe bir kalıp atanmasını sağlamaktadır. Denklem (13), y_{jr} karar değişkeninin $u_{jr}=0$ olanlar için sıfır değerinin almasını, başka bir deyişle bir işe uygun olmayan bir kalıbın atanmamasını sağlamaktadır. Denklem (14) ve (15), kalıpların çakışmasını engellemektedir. Denklem (16) ve (17), bakım olan makineye bakım süreci boyunca iş atanmamasını sağlayan kısıtlardır. Denklem (18) ve (19), l makinenin bakımına $[\gamma_i^{enk}, \gamma_i^{enb}]$ aralığında başlanmasını sağlayan kısıtlardır. Denklem (20) ve Denklem (21), bir kalıp bakımda ise bakım süreci boyunca herhangi bir işe atanmamasını sağlayan kısıtlardır. Denklem (22) ve (23), r kalıbın bakımına $[\sigma_r^{enk}, \sigma_r^{enb}]$ aralığında başlanmasını sağlayan kısıtlardır. Denklem (24)-(30), işaret kısıtlarıdır.

3. Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde, önerilen matematiksel modelin performansını değerlendirmek için bir örnek problem ve farklı boyutlarda test problemleri türetilmiştir. Türetilen örnek problem ve test problemleri GAMS 46'nın CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. Tüm testler 2,40 GHz Intel Core i5 ve 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Süre limiti 10800 saniye olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3.1. Örnek Problem

Önerilen modelin performansının detaylı olarak analiz edilebilmesi için küçük boyutlu bir örnek problem türetilmiştir. Bu örnek problemde 6 iş, 2 paralel makine ve iki farklı tipte toplam 4 kalıp bulunmaktadır. İşlerin atanabildiği ($b_{jl} = 1$) makinelerdeki ilk hazırlık süreleri (h_{jl}) ve işlem süreleri (p_{jl}) Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2

 h_{jl} ve p_{jl} Parametre Değerleri

j	l	h_{jl}	p_{jl}
1	1	75	24
1	2	4	52
2	1	21	73
3	1	55	44
3	2	14	21
4	1	61	30
4	2	13	26
5	2	55	5
6	1	11	59
6	2	53	77

Bir makinede bir işten bir işe geçiş yapabilmek için hammadde değişimi veya makine ayarları gibi hazırlıklar gerekmektedir. Bu hazırlıklar için gerekli süreler (s_{ijl}) Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3

 s_{ijl} Parametre Değerleri

i	j	l	s_{ijl}	i	j	l	s_{ijl}	i	j	l	s_{ijl}
1	2	1	61	3	1	1	12	5	1	1	42
1	3	1	12	3	2	1	36	5	2	1	61
1	4	1	86	3	4	1	73	5	3	1	67
1	5	1	59	3	5	1	31	5	4	1	59
1	6	1	100	3	6	1	82	5	6	1	17
1	2	2	36	3	1	2	21	5	1	2	80
1	3	2	14	3	2	2	58	5	2	2	65
1	4	2	37	3	4	2	82	5	3	2	35
1	5	2	95	3	5	2	67	5	4	2	97
1	6	2	92	3	6	2	63	5	6	2	12
2	1	1	93	4	1	1	34	6	1	1	90
2	3	1	62	4	2	1	79	6	2	1	44
2	4	1	36	4	3	1	71	6	3	1	55
2	5	1	74	4	5	1	56	6	4	1	76
2	6	1	63	4	6	1	97	6	5	1	13
2	1	2	59	4	1	2	62	6	1	2	45
2	3	2	34	4	2	2	62	6	2	2	63
2	4	2	55	4	3	2	45	6	3	2	51
2	5	2	74	4	5	2	47	6	4	2	100
2	6	2	40	4	6	2	42	6	5	2	16

İki tip kalıp mevcuttur. Kalıp 1 ve 2 birinci tiptedir, Kalıp 3 ve 4 ise ikinci tiptedir. Her iş için kullanılabilecek kalıplar ($u_{jr} = 1$) şu şekildedir: Kalıp 1 ve 2, İş 2, İş 5 ve İş 6'da ve Kalıp 3 ve 4 ise İş 1, İş 3 ve İş 4'te kullanılmaktadır. Bir makinede kalıp değişimi için gerekli süreler (δ_{vrl}) Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4

 δ_{vrl} Parametre Değerleri

v	r	l	δ_{vrl}	v	r	l	δ_{vrl}
1	2	1	62	3	1	1	56
1	3	1	91	3	2	1	95
1	4	1	86	3	4	1	64
1	2	2	53	3	1	2	94
1	3	2	72	3	2	2	50
1	4	2	69	3	4	2	52
2	1	1	64	4	1	1	65
2	3	1	83	4	2	1	68
2	4	1	52	4	3	1	83
2	1	2	98	4	1	2	61
2	3	2	65	4	2	2	61
2	4	2	51	4	3	2	100

Makine bakım süreleri (b'_i) sırasıyla 80 ve 50'dir. Ayrıca makine bakımlarının başlayabileceği en erken ve en geç zaman aralıkları [γ_i^{enk} , γ_i^{enb}] sırasıyla [60, 150] ve [50, 100]'dür. Kalıp 4 haricinde diğer kalıplara bakım yapılmaktadır. Kalıp bakım süreleri $b''_1=50$, $b''_2=80$ ve $b''_3=100$ 'dür ve bakıma en erken ve en geç zaman aralıkları [σ_r^{enk} , σ_r^{enb}] sırasıyla [70, 100], [200, 250] ve [100, 130]'dur.

Bakım başlama zamanlarının bir zaman penceresi içinde esnek ele alınmasının katkısını gösterebilmek için farklı durumlar ile karşılaştırılmıştır. Bu durumlar aşağıdaki gibidir:

Durum 1 (D1): Bakımların dahil edilmediği çizelgeleme problemi çözülerek iş sıralarının belirlendiği ve daha sonra bakımların sabit başlama zamanları dikkate alınarak eklendiği durum.

Durum 2 (D2): Bakımların dahil edildiği çizelgeleme probleminin çözüldüğü ve bakımların başlama zamanlarının sabit alındığı durum.

Önerilen Durum (ÖD): Bakımların dahil edildiği çizelgeleme probleminin çözüldüğü ve bakımların başlama zamanlarının bir zaman penceresi içinde esnek bırakıldığı (bakım başlama zamanlarının karar değişkeni olduğu) durum.

Bu çalışmada, $\ddot{O}D$ diğer iki durum ($D1$ ve $D2$) ile karşılaştırılmıştır. Her bir durumun işlerin toplam tamamlanma zamanını nasıl etkilediğine odaklanılmıştır.

$D1$ ve $D2$ 'nin çözümü için önerilen matematiksel modelin kısıtları revize edilmiştir. Durumlar için kullanılan modellerin amaç fonksiyonu ve kısıtları aşağıda sırasıyla verilmiştir. $\ddot{O}D$ 'nin çözümü için Bölüm 2'deki önerilen matematiksel model kullanılmaktadır.

D1 için model:

Amaç fonksiyonu: $enk\ z = \sum_j C_j$

Kısıtlar: Denklem (2)-(15)

Denklem (24)-(28)

D2 için model:

Amaç fonksiyonu: $enk\ z = \sum_j C_j$

Kısıtlar: Denklem (2)-(17)

Denklem (20)-(21)

Denklem (24)-(30)

$$a'_l = \gamma_l^{enk} \quad \forall l : b'_l > 0 \quad (31)$$

$$a''_r = \sigma_r^{enk} \quad \forall r : b''_r > 0 \quad (32)$$

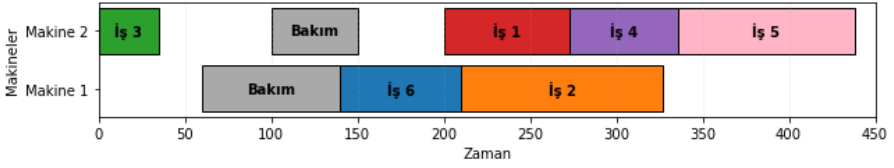
Örnek problem her durum için çözülmüştür. Elde edilen amaç fonksiyonu değerleri (z) ve çözüm süreleri (t) Tablo 5'de verilmiştir. Çözüm süreleri saniye cinsindendir.

Tablo 5

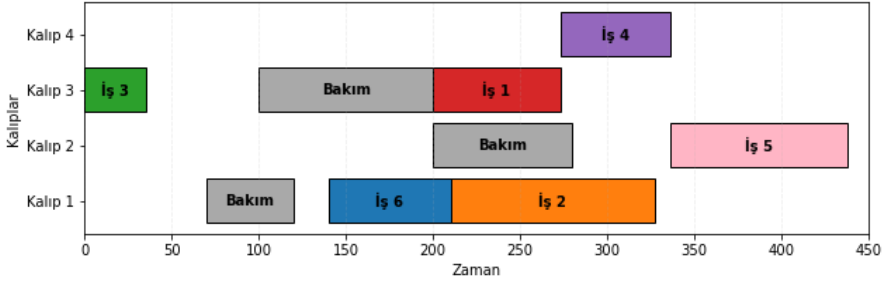
Elde Edilen Amaç Fonksiyonu Değerleri Ve Çözüm Süreleri

<i>durum</i>	<i>z</i>	<i>t</i>
<i>D1</i>	1619	35,14
<i>D2</i>	1374	30,36
<i>ÖD</i>	1113	6,31

Tablo 5 incelendiğinde, bakımların çizelgeye sonradan dahil edildiği *D1* durumunun diğer durumlardan daha kötü sonuç verdiği görülmektedir. Çizelgeleme problemi çözülürken bakımların dahil edilmemesi ve daha sonra uygun ilk aralıkta çizelgelenmesi üretim kaynaklarının verimli kullanılamamasına neden olmaktadır. Bu durumda da işler, daha geç tamamlanmaktadır. *D1*, *D2* ve *ÖD* durumları için hem makine-iş hem de kalıp-iş Gantt şemaları sırasıyla Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir.

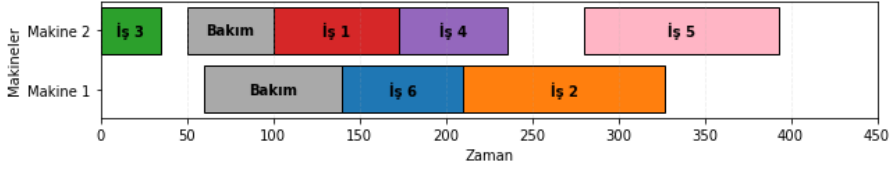


(a)

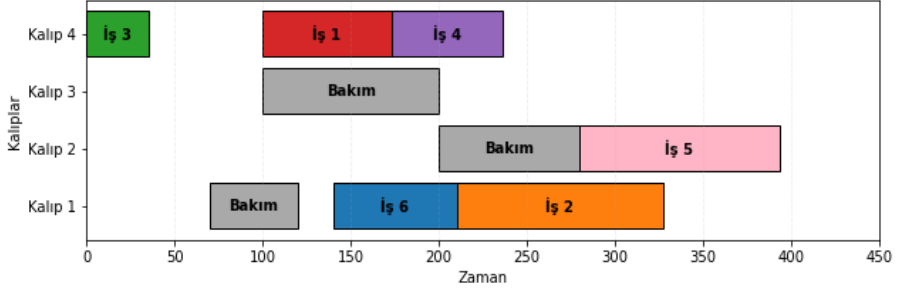


(b)

Şekil 1. *D1*'in Makine-iş (a) ve Kalıp-iş (b) Gantt Şemaları

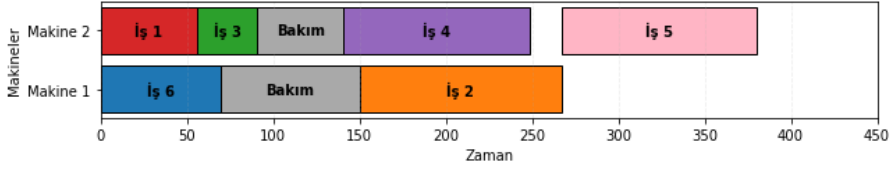


(a)

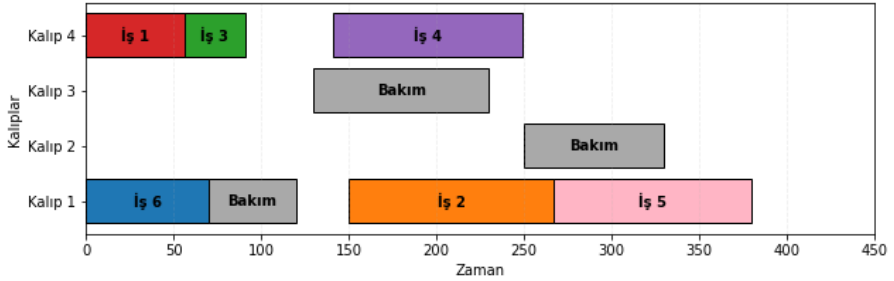


(b)

Şekil 2. D2'nin Makine-iş (a) ve Kalıp-iş (b) Gantt Şemaları



(a)



(b)

Şekil 3. ÖD'nin Makine-iş (a) ve Kalıp-iş (b) Gantt Şemaları

Şekil 1-3'ten de görülebileceği gibi çizelgeleme yapılırken bakımları dikkate almak ve bakım başlama zamanlarına esneklik tanımak işlerin toplam tamamlanma zamanlarına olumlu katkı sağlamıştır. *ÖD* durumu, *D1* durumundan yaklaşık %31 ve *D2* durumundan yaklaşık %19 daha başarılıdır.

3.2. Test Problemlerinin Türetilmesi

Önerilen matematiksel modelin performansı, rassal türetilen farklı boyutlardaki test problemleri ile test edilmiştir. Test problemlerinin özellikleri Tablo 6'da verilmiştir. İşlem süreleri (p_{jl}), ilk hazırlık süreleri (h_{jl}) ve bir işten bir işe geçiş süreleri (s_{ijl}) [1, 100] aralığında ve kalıp değişim süreleri (δ_{vrl}), makine bakım süreleri (b'_l) ve kalıp bakım süreleri (b''_l) [50, 100] aralığında kesikli düzgün dağılıma uygun türetilmiştir. Her makine ve her kalıp için bakım yapılıp yapılmayacağı kararı şu şekilde verilmektedir; bir rassal sayı türetilir ve eğer bu rassal sayı 0,5'ten küçük ise bakım yapılmasın ($b'_l = 0$ ve $b''_l = 0$), değilse bakım yapılsın ($b'_l > 0$ ve $b''_l > 0$) kararı verilmektedir. Makine uygunluk parametre değerleri (b_{jl}) %80'i 1 değerini alacak şekilde türetilmiştir. Kalıpların kopya sayıları (ω_p), 2'dir. İşlerin üretimi için kullanılan kalıp tipleri rastgele seçilmiştir. Seçilen kalıp tiplerine göre u_{jr} parametresi hesaplatılmıştır. Makine bakımlarının (γ_l^{enk}) ve kalıp bakımlarının (σ_r^{enk}) en erken başlayabileceği zamanlar, Saraç ve Özçelik (2023) çalışmasındaki iki bakım arasında geçebilecek en büyük süre formülü temel alınarak hesaplatılmıştır. γ_l^{enk} ve σ_r^{enk} parametre değerleri, $[75, 75(\Delta - 1)]$ aralığında düzgün dağılıma uygun olarak türetilmiştir. Δ , formülü makine için Denklem (33)'de ve kalıp için Denklem (34)'de verilmiştir. Makine bakımlarının (γ_l^{enb}) ve kalıp bakımlarının (σ_r^{enb}) en geç başlama zamanları, γ_l^{enk} ve σ_r^{enk} parametre değerlerinin 0,2 ve 0,6 ile çarpımı ile hesaplatılmaktadır. 0,2 ile elde edilen veri setini *sıkı* ve 0,6 ile elde edilen veri seti *gevşek* olarak adlandırılmıştır.

$$\text{makine için } \Delta = \begin{cases} 3, & \left\lfloor \frac{n}{m} \right\rfloor \leq 2 \\ \left\lfloor \frac{n}{m} \right\rfloor, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (33)$$

$$\text{kalıp için } \Delta = \begin{cases} 3, & \left\lfloor \frac{n}{\varphi} \right\rfloor \leq 2 \\ \left\lfloor \frac{n}{\varphi} \right\rfloor, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (34)$$

Tablo 6

Test Problemlerinin Özellikleri

n	6, 8, 10, 20, 30, 40, 50
m	2, 3, 4
g	2, 3, 4
φ	4, 6, 8

n , m ve φ parametrelerine bağlı olarak test problemlerinin tipleri belirlenmiştir. Ele alınan problemdeki bakımların zaman pencereleri sıkı ve gevşek olarak türetildiğinden test problemleri n - m - φ -sıkı/gevşek olarak isimlendirilmiştir. Örneğin 6-2-4-sıkı olarak isimlendirilen test problemi, 6 iş, 2 makine, 4 kalıp ve bakım zaman pencerelerinin sıkı olduğu bir problemidir.

3.3. Test Sonuçları

Türetilen tüm test problemleri $D1$, $D2$ ve $\bar{O}D$ durumları için çözülmüştür. Çözüm süresi 10800 saniye ile sınırlandırılmıştır. Tablo 7’de $D1$, $D2$ ve $\bar{O}D$ durumlar için elde edilen sonuçların amaç fonksiyon değerleri (z) ve çözüm süreleri (t) saniye cinsinden verilmiştir. Şekil 4’de de her bir test problemi tipi için her bir durumun çözümünden elde edilen sonuçlarının grafiği verilmiştir. $\bar{O}D$ ’de bakımların zaman pencereleri hem sıkı hem de gevşek parametre değerleri kullanılarak çözdürüldüğünden ilgili grafikte $\bar{O}D$ /sıkı ve $\bar{O}D$ /gevşek olarak adlandırılmıştır.

Tablo 7 ve Şekil 4 incelendiğinde, bakımın çizelgeye daha sonra dahil edildiği $D1$ durumu ile ne kadar verimsiz sonuçlar elde edildiği açıkça görülmektedir. $D2$ sonuçlarına bakıldığında $D1$ ’e göre belirgin bir iyileşmenin olduğu gözlemlenmektedir. $\bar{O}D$ ile çoğu test probleminde hem $\bar{O}D$ /sıkı hem de $\bar{O}D$ /gevşek durumları için diğer iki duruma göre kıyasla daha başarılı sonuçlar bulunmuştur. Ayrıca problem boyutu artıkça $\bar{O}D$ ’nin diğer durumlara göre daha kısa sürelerde çözüm elde edildiği görülmektedir. Sonuçların daha iyi analiz edilebilmesi için % olarak iyileşme oranları hesaplanmış ve Tablo 8’de verilmiştir. Hesaplamalar, Denklem (35)’deki formül ile yapılmıştır.

Tablo 7

Test Problemlerinin Sonuçları

problem	z_{D1}	t_{D1}	z_{D2}	t_{D2}	$z_{\text{ÖD}}$	$t_{\text{ÖD}}$
6-2-4-sıkı	1120	4,25	1118	3,83	1118	12,34
6-2-4-gevşek					796	9,95
6-2-6-sıkı	1784	3,20	1514	6,97	1514	3,95
6-2-6-gevşek					1369	3,67
6-3-4-sıkı	1196	23,31	998	133,3	904	65,09
6-3-4-gevşek					832	72,41
6-3-6-sıkı	1090	10,84	991	92,69	991	22,28
6-3-6-gevşek					893	12,66
8-2-6-sıkı	1775	10800,00	1687	8319,8	1636	5164,45
8-2-6-gevşek					1584	5529,67
8-2-8-sıkı	2898	8366,30	2216	8936,92	2139	4587,91
8-2-8-gevşek					2119	5661,44
8-3-6-sıkı	1463	4483,44	1375	6124,16	1375	1704,11
8-3-6-gevşek					1375	2304,80
8-3-8-sıkı	1188	7952,78	1129	10800,00	1042	8951,08
8-3-8-gevşek					1037	8306,75



Şekil 4. Test Problemlerinin Sonuçlarının Grafiği

$$\%iyileşme_{(z_2; z_1)} = \frac{z_1 - z_2}{z_1} 100 \quad (35)$$

Tablo 8

Durumların Karşılaştırılması (%)

<i>Problem tipi</i>	$z_{D2}; z_{D1}$	$z_{\text{ÖD/sıkı}}; z_{D1}$	$z_{\text{ÖD/gevşek}}; z_{D1}$	$z_{\text{ÖD/sıkı}}; z_{D2}$	$z_{\text{ÖD/gevşek}}; z_{D2}$	$z_{\text{ÖD/gevşek}}; z_{\text{ÖD/sıkı}}$
6-2-4	0,18	0,18	28,93	0,00	28,80	28,80
6-2-6	15,13	15,13	23,26	0,00	9,58	9,58
6-3-4	16,56	24,41	30,43	9,42	16,63	7,96
6-3-6	9,08	9,08	18,07	0,00	9,89	9,89
8-2-6	4,96	7,83	10,76	3,02	6,11	3,18
8-2-8	23,53	26,19	26,88	3,47	4,38	0,94
8-3-6	6,02	6,02	6,02	0,00	0,00	0,00
8-3-8	4,97	12,29	12,71	7,71	8,15	0,48
<i>ortalama</i>	10,05	12,64	19,63	2,95	10,44	7,60

Tablo 8'deki karşılaştırma yüzdelerine bakıldığında çizelgeleme sırasında bakımları dikkate almanın önemi açıkça ortaya çıkmaktadır. İşletmeler tarafından genellikle benimsenen 'işleri çizelgele bakım zamanı geldiğinde bakımı başlat' yaklaşımının başarılı olmadığını açık bir şekilde göstermektedir. İşletmelerin sadece işlerin çizelgelenmesine odaklanması yerine bütünlüklük bir yaklaşım benimsemesi yani hem işlerin hem de bakımların çizelgelenmesi problemini birlikte ele alması durumunda ($D2$) işlerin tamamlanma zamanlarının toplamı $D1'$ e kıyasla ortalama %10,05 daha başarılı olmaktadır. Bakımları ele almanın yanı sıra bakım başlama zamanlarına da esneklik tanındığında (ÖD), $D1'$ e kıyasla iyileşme oranı %20'ye yaklaşacak şekilde ciddi bir artış göstermiştir. Bakım başlama zamanlarını sabit almayıp zaman penceresi içinde esnek bırakmanın en az bakımları dikkate almak kadar önemli olduğu gözlenmiştir.

Planlı bakım arıza sonucu yapılan bir bakım olmadığı için hem makinelerin hem de kalıpların bakımları üretimi aksatmayacak şekilde belirlenen bir zaman penceresi içerisinde başlatılabilir. ÖD 'deki zaman pencereleri sayesinde çizelgelere esneklik sağlanır. Bu esnekliğin az ya da çok olmasının işlerin tamamlanma zamanlarının toplamı üzerindeki etkisi, ÖD/gevşek durumunun ÖD/sıkı ile kıyaslanmasıyla gözlenen ortalama %7,60'lık iyileşme oranı ile

görülmektedir. Sadece zaman penceresini genişletmenin bile işlerin toplam tamamlanma zamanlarını kayda değer miktarda azaltabildiği belirlenmiştir.

$\bar{O}D$ 'nin performansı, süre limitleri içerisinde eniyi çözümünün bulunduğu test problemleri ile gösterilmiştir. Tablo 9'da ise $\bar{O}D$ 'nin çözümü için kullanılan modelin 10800 saniye içerisinde çözebileceği boyutları belirlemek için daha büyük boyutlu test problemleri çözülmüştür. Tabloda amaç fonksiyonu değerleri (z_{OD}) ve $\%gap$ değerleri verilmiştir. $\%gap$, GAMS programında Denklem (36)'da verilen formül ile hesaplanılmaktadır.

$$\%gap = \frac{\text{bulunan eniyi amaç fonksiyonu değeri} - \text{eniye alt sınır değeri}}{\text{bulunan eniyi amaç fonksiyonu değeri}} 100 \quad (36)$$

Tablo 9

Büyük Boyutlu Test Problemlerinin Sonuçları

problem	z_{OD}	$\%gap$
10-4-6-sıkı	1074	$\%90,24$
10-4-6-gevşek	1316	$\%94,53$
20-4-6-sıkı	7927	$\%99,49$
20-4-6-gevşek	6226	$\%99,36$
30-4-6-sıkı	32954	$\%99,76$
30-4-6-gevşek	42667	$\%99,81$
40-4-6-sıkı	-	-
40-4-6-gevşek	60984	$\%99,93$
50-4-6-sıkı	-	-
50-4-6-gevşek	-	-

Tablo 9 incelendiğinde, iş sayısı 10 ile 30 arasında olduğunda süre sınırı içerisinde uygun bir çözüm bulunduğu ancak $\%gap$ 'in yüksek olduğu görülmektedir. Problem boyutu arttıkça yani 40 iş olduğunda 40-4-6-sıkı problemi için uygun bir çözüm bulunamazken 40-4-6-gevşek problemi için uygun çözüm bulunmuştur. 50 iş olduğunda ise hem sıkı hem de gevşek örnekleri için herhangi bir uygun çözüm bulunamamıştır. Önerilen model ile sıkı zaman penceresi olduğunda 30 işe, gevşek olduğunda 40 işe kadar olan problemler için 10800 saniyede uygun çözümlere erişilmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada makine ve kalıp bakımlarının dikkate alındığı üretim çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problem, makine bakımlarının dikkate alındığı klasik çizelgeleme problemine kıyasla gerçek üretim sistemlerini daha iyi temsil etmektedir. Ele alınan probleme, kalıp ve makine uygunlukları, hammadde hazırlığı gibi işlemler için gerekli hazırlık süreleri ve kalıp değişim süreleri dahil edilmiştir. Planlı bakımların acil olmaması nedeniyle bakımların belirli bir zaman aralığında gerçekleştirilmesi yeterlidir. Bu nedenle bakımlar, bir zaman penceresi içerisinde başlayabilme esnekliğine sahiptirler. Ele alınan problem için karma tamsayılı bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelin amaç fonksiyonu işlerin tamamlanma zamanlarının toplamının enküçüklenmesidir. Önerilen matematiksel modelin katkısını ortaya koyabilmek için, önerilen durum bakım başlama zamanlarının sabit ele alındığı iki farklı durum ile kıyaslanmıştır. Bu durumlar; bakımların dahil edilmediği çizelgeleme problemi çözülerek iş sıralarının belirlendiği ve daha sonra bakımların başlama zamanları dikkate alınarak eklendiği durum ve bakımların dahil edildiği çizelgeleme probleminin çözüldüğü ve bakımların başlama zamanlarının sabit olduğu durumdur. Önerilen durumun işlerin tamamlanma zamanları toplamına etkisi, küçük boyutlu bir problemde bile ilk durumdan yaklaşık %31 ve ikinci durumdan yaklaşık %19 daha başarılı sonuçlar bulunarak gösterilmiştir. Ayrıca test problemlerinde makine ve kalıp bakımların zaman pencereleri sıkı ve gevşek olarak türetilerek zaman pencerelerindeki esnekliğin de işlerin tamamlanma zamanları toplamına etkisi incelenmiştir. Bakımların zaman pencerelerinin gevşek olması işlerin tamamlanma zamanlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Kısaca bu çalışma, daha verimli ve güvenilir üretim çizelgeleme metodolojilerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Gelecekteki araştırmalarda, büyük boyutlu problemlerin çözümü için sezgisel veya metasezgisel algoritmalar geliştirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışmanın 1. Yazarı, TÜBİTAK 2211-A Yurt İçi Doktora Burs Programı tarafından desteklenmektedir. Ancak yayın ile ilgili tüm sorumluluk yayının sahibine aittir. Yayının içeriğinin bilimsel anlamda TÜBİTAK tarafından onaylandığı anlamına gelmemektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Büşra TUTUMLU, fikrin oluşması, literatür taraması, çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi, testlerin yapılması, makale metninin yazımı başlıklarında; Tuğba SARAÇ, fikrin oluşması, literatür taraması, çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi, testlerin yapılması, makale metninin yazımı

başlıklarında katkı sunmuşlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Agárdi, A., ve Nehéz, K. (2021). Parallel machine scheduling with Monte Carlo Tree Search. *Acta Polytechnica*, 61(2), 307-312. Doi: <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0307>
- Al-Shayea, A. M., Saleh, M., Alatefi, M., ve Ghaleb, M. (2020). Scheduling two identical parallel machines subjected to release times, delivery times and unavailability constraints. *Processes*, 8(9), 1025. Doi: <https://doi.org/10.3390/pr8091025>
- Babaeimorad, S., Fatthi, P., ve Fazlollahtabar, H. (2021). A joint optimization model for production scheduling and preventive maintenance interval. *International Journal of Engineering*, 34(11), 2508-2516. Doi: <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.11b.13>
- Berrichi, A., ve Yalaoui, F. (2013). Efficient bi-objective ant colony approach to minimize total tardiness and system unavailability for a parallel machine scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 2295-2310. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4841-0>
- Chen, J. S. (2006). Optimization models for the machine scheduling problem with a single flexible maintenance activity. *Engineering Optimization*, 38(1), 53-71. Doi: <https://doi.org/10.1080/03052150500270594>
- Chen, L., Yang, W., Qiu, K., ve Dauzère-Pérès, S. (2023). A lexicographic optimization approach for a bi-objective parallel-machine scheduling problem minimizing total quality loss and total tardiness. *Computers & Operations Research*, 155, 106245. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106245>
- Chen, Y. Y., Huang, P. Y., Huang, C. J., Huang, S. Q., ve Chou, F. D. (2021). Makespan minimization for scheduling on two identical parallel machines with flexible maintenance and nonresumable jobs. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 38(4), 271-284. Doi: <https://doi.org/10.1080/21681015.2021.1883131>
- Chen, Y., Guan, Z., Wang, C., Chou, F., ve Yue, L. (2022). Bi-objective optimization of identical parallel machine scheduling with flexible maintenance and job release times. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 13(4), 457-472. Doi: <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2022.8.003>

- Chen, Y., Zhong, L., Shena, C., Mumt, J., ve Chou, F. (2023). Joint optimization of production and maintenance scheduling for unrelated parallel machine using hybrid discrete spider monkey optimization algorithm. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 14(3), 539-554. Doi: <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2023.4.001>
- Cheng, T. E., Hsu, C. J., ve Yang, D. L. (2011). Unrelated parallel-machine scheduling with deteriorating maintenance activities. *Computers & Industrial Engineering*, 60(4), 602-605. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.12.017>
- Fu, B., Huo, Y., ve Zhao, H. (2011). Approximation schemes for parallel machine scheduling with availability constraints. *Discrete Applied Mathematics*, 159(15), 1555-1565. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dam.2011.06.007>
- Furugi, A. (2021). A tabu search algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with machine availability constraint and sequence-dependent setup time. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3). Doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.806641>
- Geurtsen, M., Didden, J. B., Adan, J., Atan, Z., ve Adan, I. J. B. F. (2023). Production, maintenance and resource scheduling: A review. *European Journal of Operational Research*, 305(2), 501-529. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.045>
- He, J., Li, Q., ve Xu, D. (2016). Scheduling two parallel machines with machine-dependent availabilities. *Computers & Operations Research*, 72, 31-42. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.021>
- He, X., Wang, Z., Li, Y., Khazhina, S., Du, W., Wang, J., ve Wang, W. (2022). Joint decision-making of parallel machine scheduling restricted in job-machine release time and preventive maintenance with remaining useful life constraints. *Reliability Engineering & System Safety*, 222, 108429. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108429>
- Hu, C., Lu, S., Kong, M., Liu, X., ve Pardalos, P. M. (2023). Parallel machine scheduling with linearly increasing energy consumption cost. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 91(2), 239-258. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10472-022-09810-5>
- Krim, H., Zufferey, N., Potvin, J. Y., Benmansour, R., ve Duvivier, D. (2022). Tabu search for a parallel-machine scheduling problem with periodic maintenance, job rejection and weighted sum of completion times. *Journal of Scheduling*, 1-17. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10951-021-00711-9>
- Kurt, A., ve Çetinkaya, F. C. (2024). Unrelated parallel machine scheduling under machine availability and eligibility constraints to minimize the makespan of non-resumable jobs. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, in-press. Doi: <https://doi.org/10.24867/IJIEEM-2024-1-345>

- Lee, D., Lee, D., ve Kim, K. (2023). Self-growth learning-based machine scheduler to minimize setup time and tardiness in OLED display semiconductor manufacturing. *Applied Soft Computing*, 145, 110600. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110600>
- Lee, J. Y., ve Kim, Y. D. (2015). A branch and bound algorithm to minimize total tardiness of jobs in a two identical-parallel-machine scheduling problem with a machine availability constraint. *Journal of the Operational Research Society*, 66(9), 1542-1554. Doi: <https://doi.org/10.1057/jors.2014.122>
- Lei, D., ve He, S. (2022). An adaptive artificial bee colony for unrelated parallel machine scheduling with additional resource and maintenance. *Expert Systems with Applications*, 205, 117577. Doi: <https://doi.org/10.3390/sym14071380>
- Lei, D., ve Liu, M. (2020). An artificial bee colony with division for distributed unrelated parallel machine scheduling with preventive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 141, 106320. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106320>
- Lei, D., ve Yang, H. (2022). Scheduling unrelated parallel machines with preventive maintenance and setup time: Multi-sub-colony artificial bee colony. *Applied Soft Computing*, 125, 109154. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109154>
- Lei, D., ve Yi, T. (2021). A novel shuffled frog-leaping algorithm for unrelated parallel machine scheduling with deteriorating maintenance and setup time. *Symmetry*, 13(9), 1574. Doi: <https://doi.org/10.3390/sym13091574>
- Li, G., Liu, M., Sethi, S. P., ve Xu, D. (2017). Parallel-machine scheduling with machine-dependent maintenance periodic recycles. *International Journal of Production Economics*, 186, 1-7. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.01.014>
- Li, M., Xiong, H., ve Lei, D. (2022). An artificial bee colony with adaptive competition for the unrelated parallel machine scheduling problem with additional resources and maintenance. *Symmetry*, 14(7), 1380. Doi: <https://doi.org/10.3390/sym14071380>
- Lu, S., Liu, X., Pei, J., Thai, M. T., ve Pardalos, P. M. (2018). A hybrid ABC-TS algorithm for the unrelated parallel-batching machines scheduling problem with deteriorating jobs and maintenance activity. *Applied Soft Computing*, 66, 168-182. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.018>
- Mellouli, R., Kacem, I., Sadfi, C., ve Chu, C. (2013). Lagrangian relaxation and column generation-based lower bounds for the $Pm, h_1 || \sum w_i C_i$ scheduling problem. *Applied Mathematics and Computation*, 219(22), 10783-10805. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.05.004>
- Moradi, E., ve Zandieh, M. (2010). Minimizing the makespan and the system unavailability in parallel machine scheduling problem: a similarity-based

- genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51, 829-840. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2666-7>
- Saraç, T., ve Özçelik, F. (2023). Bozulma etkili ve tek bakım ekipli bakım çizelgeleme problemi için bir matematiksel model. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(3), 882-892. Doi: <https://doi.org/10.31796/ogummf.1247165>
- Santoro, M. C., ve Junqueira, L. (2023). Unrelated parallel machine scheduling models with machine availability and eligibility constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 179, 109219. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109219>
- Sharifi, M., Ghaleb, M., ve Taghipour, S. (2023). Joint parallel-machine scheduling and maintenance planning optimisation with deterioration, unexpected breakdowns, and condition-based maintenance. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 10(1), 2200888. Doi: <https://doi.org/10.1080/23302674.2023.2200888>
- Sheen, G. J., ve Liao, L. W. (2007). Scheduling machine-dependent jobs to minimize lateness on machines with identical speed under availability constraints. *Computers & Operations Research*, 34(8), 2266-2278. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.002>
- Shen, J., ve Zhu, Y. (2019). A parallel-machine scheduling with periodic constraints under uncertainty. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(12), 1687814019892430. Doi: <https://doi.org/10.1177/1687814019892430>
- Su, L. H., Hsiao, M. C., Zhou, H., ve Chou, F. D. (2018). Minimizing the number of tardy jobs on unrelated parallel machines with dirt consideration. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 35(6), 383-393. Doi: <https://doi.org/10.1080/21681015.2018.1508082>
- Sun, L., Zhang, X. H., ve Ning, L. (2021). Results of parallel-machine scheduling model with maintenance activity considering time-dependent deterioration, delivery times, and resource allocation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-14. Doi: <https://doi.org/10.1155/2021/8826345>
- Tan, Z., Chen, Y., ve Zhang, A. (2011). Parallel machines scheduling with machine maintenance for minsum criteria. *European Journal of Operational Research*, 212(2), 287-292. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.02.006>
- Wang, L. Y., Huang, X., Ji, P., ve Feng, E. M. (2014). Unrelated parallel-machine scheduling with deteriorating maintenance activities to minimize the total completion time. *Optimization letters*, 8, 129-134. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11590-012-0472-x>
- Wang, M., ve Pan, G. (2019). A novel imperialist competitive algorithm with multi-elite individuals guidance for multi-object unrelated parallel machine

- scheduling problem. *IEEE Access*, 7, 121223-121235. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937747>
- Wang, S., ve Liu, M. (2015). Multi-objective optimization of parallel machine scheduling integrated with multi-resources preventive maintenance planning. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 182-192. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.07.002>
- Xu, D., Sun, K., ve Li, H. (2008). Parallel machine scheduling with almost periodic maintenance and non-preemptive jobs to minimize makespan. *Computers & operations research*, 35(4), 1344-1349. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.08.015>
- Yang, D. L., Cheng, T. C. E., Yang, S. J., ve Hsu, C. J. (2012). Unrelated parallel-machine scheduling with aging effects and multi-maintenance activities. *Computers & Operations Research*, 39(7), 1458-1464. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.017>
- Yang, S. J. (2011). Parallel machines scheduling with simultaneous considerations of position-dependent deterioration effects and maintenance activities. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 28(4), 270-280. Doi: <https://doi.org/10.1080/10170669.2011.573006>
- Yin, Y., Wang, Y., Cheng, T. C. E., Liu, W., ve Li, J. (2017). Parallel-machine scheduling of deteriorating jobs with potential machine disruptions. *Omega*, 69, 17-28. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.07.006>
- Yoo, J., ve Lee, I. S. (2016). Parallel machine scheduling with maintenance activities. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 361-371. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.09.020>
- Zhang, X., ve Chen, L. (2022). A general variable neighborhood search algorithm for a parallel-machine scheduling problem considering machine health conditions and preventive maintenance. *Computers & Operations Research*, 143, 105738. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105738>
- Zhang, X., Liu, S. C., Lin, W. C., ve Wu, C. C. (2020). Parallel-machine scheduling with linear deteriorating jobs and preventive maintenance activities under a potential machine disruption. *Computers & Industrial Engineering*, 145, 106482. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106482>