Endüstri Mühendisliği / Journal of Industrial Engineering

https://dergipark.org.tr/tr/pub/endustrimuhendisligi

BEKLEMESİZ ESNEK AKIŞ TİPİ ÇİZELGELEME PROBLEMİNDE BAKIM BAŞLAMA ZAMANLARININ BELİRLENMESİ: MAKİNE HIZLARININ ETKİSİ

Feriştah ÖZÇELİK[1*], Tuğba SARAÇ[2]

[1]Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, ESKİŞEHİR
ORCID No : http://orcid.org/ 0000-0003-0329-203X
[2]Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, ESKİŞEHİR
ORCID No : http://orcid.org/0000-0002-8115-3206

Anahtar Kelimeler

Beklemesiz esnek akış tipi çizelgeleme, Değişken makine hızları, Bakım başlama zamanı.

Öz

Bu çalışmada, makine hızlarının iş bazında değişebildiği ve bakım başlama zamanlarının karar değişkeni olduğu beklemesiz esnek akış tipi çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problem için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen matematiksel modelin performansı, rassal türetilen test problemleri kullanılarak gösterilmiştir. Makine hız değişimlerinin dikkate alınmasının etkisini gösterebilmek amacıyla, önerilen matematiksel model ile elde edilen sonuçlar, hızların sabit ele alındığı durum ile karşılaştırılmış ve son işin tamamlanma zamanında ortalama %15 iyileşme sağlanmıştır.

DETERMINATION OF MAINTENANCE STARTING TIMES IN NO-WAIT FLEXIBLE FLOW SHOP SCHEDULING PROBLEM: EFFECT OF MACHINE SPEEDS

Keywords

No-wait flexible flow shop scheduling,

Abstract

In this study, we consider the no-wait flexible flow shop scheduling problem, where machine speeds vary depending on the job, and maintenance starting times are treated as

*Sorumlu yazar; e-posta : fdurmaz@ogu.edu.tr

doi : https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1635184

Variable machine speeds, Maintenance starting times.

decision variables. A mathematical model is developed for the considered problem. The performance of the proposed mathematical model is demonstrated using randomly generated test problems. In order to show the effect of considering machine speed changes, the results obtained with the proposed mathematical model are compared with the case where speeds are considered constant, and an average of 15% improvement is achieved in the completion time of the last job.

Araştırma Makalesi		Research Article	
Başvuru Tarihi	: 07.02.2025	Submission Date	: 07.02.2025
Kabul Tarihi	: 10.04.2025	Accepted Date	: 10.04.2025

1. Giriş

Beklemesiz akış tipi çizelgeleme problemi, özellikle sürekli üretim hatlarının planlanmasında sıkça karşılaşılan bir problemdir. Beklemesiz akış tipi çizelgeleme probleminde, işler birden çok aşamadan geçmektedir. Bu üretim biçiminde işler, ilk aşamadaki makineden başlayarak herhangi bir bekleme olmadan ardışık olarak tüm aşamalardaki makinelerden geçmektedir. Bu tip üretim süreçlerinde, belirli ürünlerdeki fiziksel veya kimyasal gereksinimlerden kaynaklanan kısıtlar nedeniyle üretimin kesintisiz bir şekilde devam etmesi zorunludur. Gıda ve çelik üretimi ya da kimyasal işlemler içeren süreçler ve ilaç endüstrisi gibi alanlarda beklemesiz üretime gereksinim duyulabilir. Örneğin, çelik endüstrisinde bir iş parçasının soğumasına izin verilmeden bir sonraki işleme geçmesi gerekirken, kimyasal süreçlerde, bir reaksiyonun sürekliliğini sağlamak için bekleme olmaksızın işlem yapılması gerekebilir. Bu tür süreçler, geleneksel çizelgeleme problemlerine kıyasla daha karmaşık eniyileme yaklaşımlarını kullanmayı gerektirir. Beklemesiz akış tipi çizelgeleme problemini ele alan çalışmalar ile ilgili daha ayrıntılı bilgilere Singh, Oberoi ve Singh (2021) tarafından yapılan literatür taraması çalışmasından ulaşılabilir.

Beklemesiz akış tipi üretimi çizelgelemek, klasik akış tipi çizelgeleme probleminden daha zordur. İlk aşamalardaki makineler uygun olsalar bile, sonraki aşamalardaki beklemeleri önlemek için üretimin gerçekleştirilemediği durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu tarz üretim biçimlerinde her aşamadaki makinelerin ayarlanabilir hızlara sahip olması ve çizelgeleme ile birlikte hız düzeylerine de karar verilmesi, bu gereksiz beklemelerin ortadan kaldırılabilmesi için önemli fırsatlar yaratabilir. Bu nedenle literatürde beklemesiz akış tipi çizelgeleme problemlerinde hızı ele alan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda, makine hızları her iş için ya da her makine için ayrı tanımlanabilmektedir. Zhao, Hu, Wang, Xu, Zhu ve Jonrinaldi (2023) ve Fang, Luo ve Che (2021) beklemesiz akış tipi çizelgeleme probleminde makine hızlarının iş bazında, Spieksma ve Woeginger (2005) ise makine bazında değişebildiği durumu ele almışlardır.

Literatürdeki çalışmaların çoğunda makinelerin kesintisiz hizmet verdiği varsayılır. Oysa, üretim sistemlerinde planlı bakım gibi nedenlerle üretim kesintiye uğrar. Planlı bakım, arıza durumundan bağımsız olarak, makinelerin verimli bir şekilde kullanılabilmelerini sağlayabilmek için gerçekleştirilen bir bakım türüdür. Planlı bakımla ilgili çalışmalarda bakım zamanlarının sabit ve önceden bilindiği veya planlayıcı tarafından belirlenen bir karar değişkeni olduğu durumlar incelenmiştir. Espinouse, Formanowicz ve Penz (2001), Miyata, Nagano ve Gupta (2019a), Chen, Li ve Wang (2020) beklemesiz akış tipi çizelgeleme probleminde bakım zamanlarının önceden bilindiği durumu, Miyata, Nagano ve Gupta (2019b) ve Miyata ve Nagano (2021) bakım zamanlarının da bir karar değişkeni olarak ele alındığı durumu ele almışlardır.

Akış tipi üretimin herhangi bir aşamasında birden fazla paralel makine yer alıyor ise problem, esnek akış tipi ya da melez akış tipi çizelgeleme problemi olarak adlandırılır. Beklemesiz gerçekleştirilmesi gereken akış tipi üretim süreçlerinde paralel makinelerin varlığı beklemelerin önemli ölçüde azaltılabilmesi fırsatı yaratabildiği için önemlidir. Beklemesiz Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemi (BEATÇP)ni ele alan çalışmalardan erişilebilenler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'den görülebileceği gibi bakım süresi ve makine hızları, beklemesiz esnek akış tipi çizelgeleme probleminde önemine rağmen ele alınmamıştır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla bu çalışmada makine hızlarının iş bazında değişebildiği ve bakım başlama zamanlarının karar değişkeni olduğu beklemesiz esnek akış tipi çizelgeleme problemi ilk defa ele alınmıştır. Ele alınan problem için bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Çalışmanın izleyen bölümünde ele alınan problem ve önerilen matematiksel model, üçüncü bölümde deneysel sonuçlar ve son bölümde sonuç ve öneriler sunulmuştur.

Tablo 1

Beklemesiz Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemini Ele Alan Çalışmalar

çalişma	*Ö*	*F*	*İ*	*bakım*	*hız*	*amaç*	*çözüm yöntemi*
Wang ve diğ. (2015)	✓					C_{enb}	DSA
Carpov ve diğ. (2012)	✓					C_{enb}	SA
Wang ve diğ. (2020)	✓					C_{enb}	DSA, MSA
Jolai ve diğ. (2012)	✓					C_{enb}	MA
Tang ve Song (2010)	✓					C_{enb}	MSA
Shao ve diğ. (2021)	✓					C_{enb}	SA
Bouras ve diğ. (2021)	✓					C_{enb}	MILP
Esmaelian ve diğ. (2023)	✓					C_{enb}	MILP
Asefi ve diğ. (2014)	✓					C_{enb} ve T_{ort}	MA
Abdollahpour ve Rezaian (2017)	✓					∑T, ∑E, KS ve TS	MSA
Shafaei ve diğ. (2011a)	✓					ort. akış süresi	MSA
Shafaei ve diğ. (2011b)	✓					beklenen C_{enb}	MA
Moradinasab ve diğ. (2013)	✓					∑C	MSA
Ramezani ve diğ. (2015)		✓				C_{enb}	MA
Rabiee ve diğ. (2014)			✓			C_{enb}	MA
Wang ve Liu (2013)			✓			C_{enb}	MSA
Meng ve diğ. (2020)			✓			C_{enb}	MILP
Işık ve diğ. (2023)			✓			C_{enb}	KP
Qin and Zhang (2016)			✓			C_{enb} ve T_{enb}	MSA
Rabiee ve diğ. (2016)			✓			T_{ort}	MSA
Huang ve diğ (2015)			✓			∑T ve ∑E	MSA
Jafarzadeh ve diğ. (2017)			✓			C_{enb} ve T_{ort}	MSA
Xuan ve diğ. (2021)			✓			toplam akış süresi	MA
Jolai ve diğ. (2009)			✓			toplam kar	MSA
Bu çalışma			✓	✓	✓	C_{enb}	MILP

Ö: özdeş, F: farklı hızlara sahip, İ: ilişkisiz, C_{enb}: son işin tamamlanma zamanı, T_{ort}: ortalama gecikme, T_{enb}: enbüyük gecikme, ∑T: toplam gecikme, ∑E: toplam erkenlik, ∑C: toplam tamamlanma zamanı, KS: kaçırılan siparişler, TS: tamamlanamayan siparişler, MILP: karma tamsayılı doğrusal programlama, SA: sezgisel algoritma, MSA: metasezgisel algoritma, MA: melez algoritma, DSA: dal sınır algoritması, KP: kısıt programlama

2. Ele alınan problem ve önerilen matematiksel model

Ele alınan problemde *n* iş, her iki aşamasında da *m* paralel makinenin olduğu iki aşamalı akış tipi üretim sürecinden geçmektedir. Üretim özelliği gereği bir işin ilk aşamada işlemi biter bitmez, hiç bekleme olmaksızın ikinci aşamada işleme girmesi gerekmektedir. Her makine beş hız seviyesine sahiptir. Makine hızı, bir iş devam ederken değiştirilemez. Bir makine aynı anda sadece bir iş için kullanılabilir. İşler atandıkları makinelerde bölünmeden tamamlanmalıdır. Bir işin işlem süresi (p_{jrl}) bulunduğu aşamaya, makineye ve makinenin hızına bağlıdır. Tüm işler planlama periyodu başında işlenmeye hazır durumdadır. Her makineye, planlama periyodu içinde bir kez bakım yapılmalıdır. Süresi önceden bilinen bakımların başlama zamanlarına karar verilmesi gerekmektedir. Bakım sırasında makineler üretim gerçekleştirememektedir. Problemin amacı son işin tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir.

Farklı hız seviyelerini (HS) dikkate alan ve bakım zamanlarına (BZ) da karar veren beklemesiz esnek akış tipi çizelgeleme problemi için önerilen matematiksel modelin (M_{HS-BZ}) kümeleri, indisleri, parametreleri ve karar değişkenleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2

M_{HS-BZ} Modelinin Küme, İndis, Parametre ve Karar Değişkenleri

küme	*açıklama*
N= {1, 2, … , n}	iş
M= {1, 2, … , m}	makine
B= {1, 2, … , n+1}	sıra
T={1, 2, … , n+m}	toplam iş (her makinedeki bakım bir yapay iş olarak kabul edilmiştir.)
Q= {1, 2}	aşama
W= {1, 2, 3}	hız seviyesi
indis	*açıklama*
$i, j \in T$	toplam iş
$k \in B$	sıra
$r \in Q$	aşama
$l \in M$	makine
$s \in W$	hız seviyesi
parametre	*açıklama*
p_{jrl}	*j*. işin/bakımın *r*. aşamada *l*. makinede işlem süresi
v_s	*s*. hız seviyesine ait katsayı
β	büyük pozitif sayı
karar değişkeni	*açıklama*
x_{jkrl}	eğer *j*. iş *r*. aşamadaki *l*. makineye *k*. sırada atandıysa 1, diğer durumda 0
y_{jrs}	eğer *j*. iş *r*. aşamada *s* hızında işlenecek ise 1, diğer durumda 0
C_{jr}	*j* işinin *r*. aşamadaki tamamlanma zamanı
a_{jr}	*j* işinin *r*. aşamadaki başlama zamanı
C_{enb}	son işin/bakımın tamamlanma zamanı

(M_{HS-BZ}) :

$$enkz = C_{enb} \tag{1}$$

kısıtları altında

$$\sum_{j} x_{jkrl} \leq 1 \qquad \forall\, k\,, r, l \tag{2}$$

$$\sum_{k} \sum_{l} x_{jkrl} = 1 \qquad \forall\, j, r \tag{3}$$

$$\sum_{j>n} \sum_{k} x_{jkrl} = 1 \qquad \forall\, r, l \tag{4}$$

$$\sum_{s} y_{jrs} = 1 \qquad \forall\, j, r \tag{5}$$

$$y_{jr3} = 1 \qquad \forall\, j, r\colon\ j > n \tag{6}$$

$$\sum_{j} x_{jkrl} - \sum_{i} x_{i(k-1)rl} \leq 0 \qquad \forall\, k, r, l\colon\ \ k > 1 \tag{7}$$

$$C_{jr} \geq \frac{p_{jrl}}{v_s}\, y_{jrs} - \beta\left(1 - x_{j1rl}\right) \qquad \forall\, j, r, l, s \tag{8}$$

$$C_{jr} \geq C_{ir} + \frac{p_{jrl}}{v_s}\, y_{jrs} - \beta\left(2 - x_{jkrl} - x_{i(k-1)rl}\right) \qquad \forall\, i, j, k, r, l, s\colon\ i \neq j, k > 1 \tag{9}$$

$$a_{jr} = C_{j(r-1)} \qquad \forall\, j, r\colon\ j \leq n, r > 1 \tag{10}$$

$$a_{j1} \leq \beta\left(1 - x_{j11l}\right) \qquad \forall\, j, l \tag{11}$$

$$a_{j1} \geq -\beta\left(1 - x_{j11l}\right) \qquad \forall\, j, l \tag{12}$$

$$a_{jr} \leq C_{jr} - \frac{p_{jrl}}{v_s} + \beta\left(2 - \sum_{k} x_{jkrl} - y_{jrs}\right) \qquad \forall\, j, r, l, s \tag{13}$$

$$a_{jr} \geq C_{jr} - \frac{p_{jrl}}{v_s} - \beta\left(2 - \sum_{k} x_{jkrl} - y_{jrs}\right) \qquad \forall\, j, r, l, s \tag{14}$$

$$C_{enb} \geq C_{jr} \qquad \forall\, j, r \tag{15}$$

$$x_{jkrl} \in \{0,1\} \qquad \forall\, j, k, r, l \tag{16}$$

$$y_{jrs} \in \{0,1\} \qquad \forall\, j,r,s \qquad (17)$$

$$C_{jr}, a_{jr} \geq 0 \qquad \forall\, j,r \qquad (18)$$

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

Amaç (1) son işin/bakımın tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir. Denklem (2) bir aşamadaki, bir makinenin bir sırasına birden fazla iş atanmasını engeller. Denklem (3) her aşamadaki her işin mutlaka bir makinenin bir sırasına atanmasını sağlar. Denklem (4) her aşamadaki her makineye mutlaka bir bakım atanmasını garanti eder. Denklem (5) her iş için bir hız belirler. Denklem (6), tüm bakımların tek bir hız seviyesinde yapılmasını sağlar. Denklem (7) aynı makineye atanan işler için sıra atlamama kısıtıdır. Denklem (8) her aşamadaki her makinenin ilk sırasındaki işin ve denklem (9) ikinci ve sonraki işlerin tamamlanma zamanını belirlemektedir. Denklem (10) her işin ikinci aşamada beklemesiz başlamasını garanti etmektedir. Denklem (11) ve (12) ilk aşamada makinelerin ilk sıralarına atanan işlerin başlama zamanlarının 0 olmasını sağlar. Denklem (13) ve (14) işlerin başlama zamanlarını hesaplar. Denklem (15) son işin tamamlanma zamanını hesaplar. Denklem (16)-(19) karar değişkenlerinin negatif olmama veya 0, 1 tamsayı değer alma kısıtlarıdır.

Önerilen matematiksel model, toplamda $2m^2n + 2m^2 + 2mn^2 + 2mn + 10n + 10m + 1$ adet karar değişkeni ve $6mn^3 + 6m^3n + 6m^3 + 12m^2n^2 + 6m^2n + 12m^2 + 16mn + 12m + 6n$ adet kısıttan oluşmaktadır.

3. Deneysel Sonuçlar

Önerilen matematiksel model GAMS 45.2.0 da kodlanmış, çözümünde Cplex çözücüsü ve Intel Core i9 CPU 3.60 GHz işlemci ve 32 GB belleğe sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3.1. Örnek problem

Örnek problemde işlem görecek 5 iş (i1, i2, i3, i4, i5) vardır. Bakımlara karşı gelmek üzere iki iş daha (i6, i7) tanımlanmıştır. İlk aşamada iki (m1.1,m1.2) ikinci aşamada iki (m2.1, m2.2) makine yer almaktadır. Örnek problemin hız seviyesi 3'e karşı gelen işlem süreleri, Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3

Örnek Problemin p_{jrl} Parametre Değerleri

$j/r.l$	*1.1*	*1.2*	*2.1*	*2.2*
1	12	65	34	45
2	89	76	87	62
3	55	14	95	72
4	58	32	23	54
5	29	15	65	35
6	100	100	100	100
7	100	100	100	100

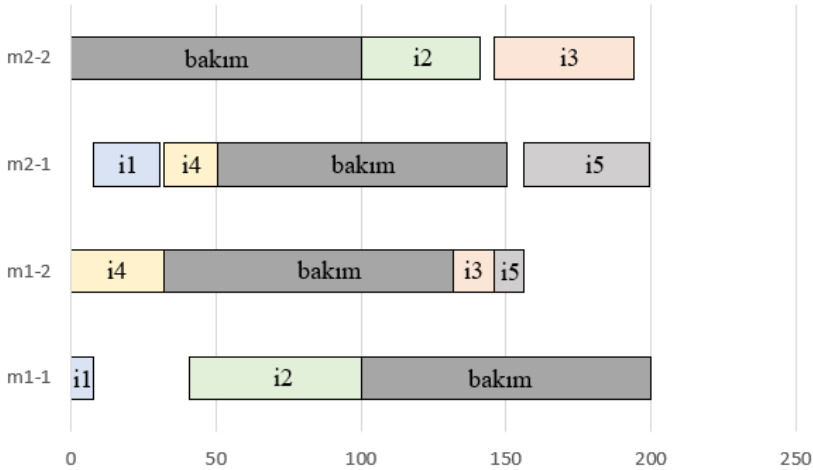
Örnek problem önerilen matematiksel model (M_{HS-BZ}) ile çözülmüş ve 305 saniyede eniyi çözüme ulaşılmıştır. Eniyi amaç fonksiyonu değeri 200 olarak elde edilmiştir. Elde edilen çözümde iş sıraları ve hızları Tablo 4'te, Gantt şeması ise Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 4

M_{HS-BZ} Modeli ile Elde Edilen İş Sıraları ve İş Bazında Makine Hızları

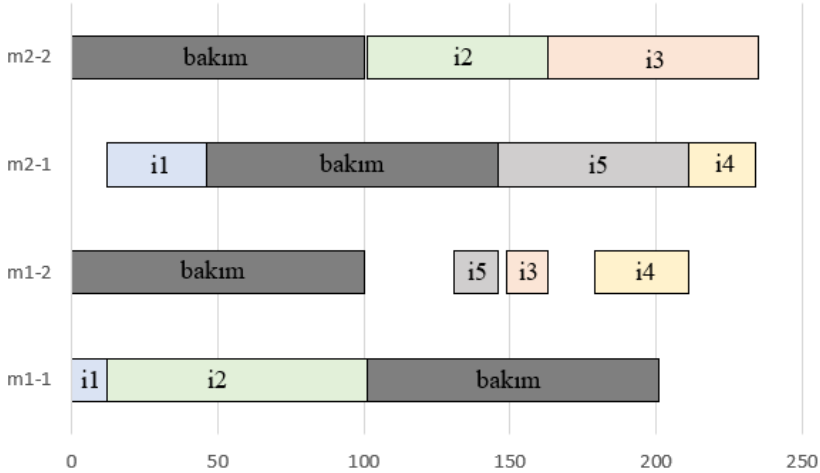
makine	*iş sırası (makine hız seviyesi)*
m1-1	i1(5), i2(5), i7(bakım)
m1-2	i4(3), i6(bakım), i3(3), i5(5)
m2-1	i1(5), i4(4), i7(bakım), i5(5)
m2-2	i6(bakım), i2(5), i3(5)

Tablo 4'te her işin yanında parantez içinde o işin makinenin hangi hız seviyesinde yapıldığı verilmiştir. Örneğin; m1-1 makinesinde i1 işi ilk sırada 5. hız seviyesinde, ikinci sırada i2 işi 5. hız seviyesinde gerçekleştirilmiş sonrasında makinenin bakımı yapılmıştır.



Şekil 1. M_{HS-BZ} Modelinin Çözümü ile Elde Edilen Gantt Şeması

Örnek problem makinelerin hız seviyeleri 3'e sabitlenerek de çözülmüştür. M_{HS-BZ} modelinin tüm hız seviyelerinin 3 olarak kısıtlandığı versiyon, hız seviyesi değişimlerini dikkate alamadığı için M_{BZ} olarak adlandırılmıştır. 5 saniyede eniyi çözüme ulaşılmıştır. Eniyi amaç fonksiyonu değeri 235 olarak elde edilmiştir. Elde edilen çözüm için Gantt şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. M_{BZ} Modeli (Hızların 3 Seviyesine Sabitlendiği) ile Elde Edilen Gantt Şeması

Şekil 1 ve 2'den de görülebileceği gibi makinelerin hızlarının iş bazında değişebildiği durum, sağladığı esneklik nedeniyle hem beklemeleri azaltmış hem de son işin/bakımın tamamlanma zamanını önemli ölçüde azaltmıştır.

3.2. Test Problemleri

Test problemlerinde iş sayıları 6, 8 ve 10, paralel makine sayıları ise 2 ve 3 olarak belirlenmiştir. Makine ve iş sayıları dikkate alındığında toplamda 6 tip problem tariflenmiştir. Her problem tipinden 5 örnek türetilmiştir. Böylece toplamda 30 adet test problemi türetilmiştir. Test problemleri '*iş sayısı-makine sayısı-örnek numarası*' biçiminde adlandırılmıştır. Örneğin; 6-2-3 isimli test problemi, 6 iş ve her aşamada 2 paralel makinenin olduğu problem tipinin üçüncü örneğidir.

Tüm makinelerin 5 hız seviyesine sahip olduğu kabul edilmiştir. Her hız seviyesinin, işlem süresini ne kadar arttırdığı ya da azalttığını gösteren katsayılar (v_s) tüm test problemleri için denklem (20)' de verildiği gibi kullanılmıştır.

$$v_s = \begin{cases} 0{,}50 & s = 1 \\ 0{,}75 & s = 2 \\ 1 & s = 3 \\ 1{,}25 & s = 4 \\ 1{,}50 & s = 5 \end{cases} \tag{20}$$

p_{jrl} parametresi, denklem (21)'de verildiği gibi, j iş sayısına eşit ya da daha küçük ($j \leq n$) iken 3. hız seviyesindeki işlem süresini göstermektedir. j iş sayısından büyük ($j > n$) olduğunda ise bakım süresini göstermektedir.

$$p_{jrl} = \begin{cases} j \leq n & j.\text{ işin } r.\text{ aşamadaki } l.\text{ makinede } s = 3 \text{ için işlem süresi} \\ j > n & r.\text{ aşamadaki } l.\text{ makinede yapılan } j.\text{ bakımın süresi} \end{cases} \tag{21}$$

İşlem süreleri [1, 100] aralığında kesikli düzgün dağılıma uygun, rassal türetilmiştir. Bakım süreleri ise tüm makineler için 100 olarak alınmıştır.

3.3. Test Sonuçları

Test problemleri hem önerilen M_{HS-BZ} hem de hız seviyesi değişimlerinin dikkate alınmadığı M_{BZ} modeli ile 10800 saniye süre limiti ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5, dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde problem isimleri yer almaktadır. İki, üç ve dördüncü sütunlardan oluşan ikinci bölümde sırasıyla, tüm makinelerin hız seviyelerinin üçe sabitlendiği model ile elde edilmiş olan amaç fonksiyonu değeri (z), GAMS yazılımı ile elde edilmiş olan amaç fonksiyonu değerinin tahmini eniyi değere olan yüzde farkını gösteren değer ($\%gap$) ve çözüm süresi (t) verilmiştir.

Tablonun üçüncü bölümünde ise sırasıyla M_{HS-BZ} modeli ile elde edilen z, ($\%gap$) ve t değerleri verilmiştir. Son bölümde ise denklem (22)'de formülü verilmiş olan *% iyileşme* değerleri sunulmuştur.

$$\%iyileşme = \frac{z_{BZ} - z_{HS-BZ}}{z_{BZ}} 100 \tag{22}$$

Tablo 5

Test Sonuçları

problem	M_{BZ}			M_{HS-BZ}			*% iyileşme*
	z	$\%gap$	t	z	$\%gap$	t	
6-2-1	216	0	33	177,33	10	10800	17.90
6-2-2	244	0	103	204,00	29	10800	16.39
6-2-3	237	0	125	191,33	17	10800	19.27
6-2-4	255	0	10	204,67	25	10800	19.74
6-2-5	231	0	42	193,33	9	10800	16.31
6-3-1	205	0	221	175,33	30	10800	14.47
6-3-2	202	0	247	168,00	41	10800	16.83
6-3-3	225	0	1292	187,33	18	10800	16.74
6-3-4	169	0	959	146,00	22	10800	13.61
6-3-5	200	0	153	178,67	44	10800	10.67
8-2-1	332	0	394	268,67	63	10800	19.08
8-2-2	292	0	1341	264,67	62	10800	9.36
8-2-3	317	0	962	264,67	62	10800	16.51
8-2-4	353	0	4098	273,33	63	10800	22.57
8-2-5	220	4	10800	189,33	47	10800	13.94
8-3-1	200	35	10800	176,67	43	10800	11.67
8-3-2	207	30	10800	192,67	48	10800	6.92
8-3-3	221	15	10800	193,33	48	10800	12.52
8-3-4	211	14	10800	174,00	43	10800	17.54
8-3-5	193	12	10800	171,33	42	10800	11.23
10-2-1	309	61	10800	250,00	60	10800	19.09
10-2-2	298	49	10800	248,00	60	10800	16.78
10-2-3	341	45	10800	274,93	64	10800	19.38
10-2-4	295	44	10800	226,00	56	10800	23.39
10-2-5	313	43	10800	266,00	62	10800	15.02
10-3-1	233	57	10800	192,67	48	10800	17.31
10-3-2	242	59	10800	211,33	53	10800	12.67
10-3-3	215	53	10800	200,67	50	10800	6.67
10-3-4	211	53	10800	201,33	50	10800	4.58
10-3-5	268	63	10800	233,33	57	10800	12.94

Tablo 5'ten de görülebileceği gibi sadece hızların sabit olduğu M_{BZ} modeli ile 6-2, 6-3 ve 8-2 problemlerin eniyi çözümleri ($\%gap$ = 0) elde edilebilmiştir. Önerilen M_{HS-BZ} modeli ile 10800 saniye içinde test problemlerinin eniyi çözümlerine %9 ila %64 oranında uzak çözümlere ulaşılabilmiştir. $\%gap$ değerleri çok küçük olmasa bile hızların dikkate alınmadığı modele kıyasla çok daha başarılı C_{enb} değerleri elde edilmiştir.

Tablo 5'te yer alan *%iyileşme* değerleri incelendiğinde iş bazında hız değişikliğine izin verilmesinin C_{enb} değerini %5 ila %23 oranında iyileştirdiği ve ortalama iyileşme oranının %15 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu oranlar işletmelerin verimliliklerini önemli ölçüde iyileşme fırsatı yarattığı için oldukça önemlidir.

M_{BZ} ve M_{HS-BZ} ile elde edilen sonuçların istatistiksel olarak kıyaslanabilmesi için Sign Test uygulanmıştır. Öncelikle matematiksel modellerin başarılı olduğu durum sayıları için Tablo 6 oluşturulmuştur.

Tablo 6

M_{BZ} ve M_{HS-BZ} Modellerinin Başarılı Oldukları Durum Sayıları

Durum	*Sayı*
$z_{BZ} > z_{HS-BZ}$	30
$z_{BZ} < z_{HS-BZ}$	0
$z_{BZ} = z_{HS-BZ}$	0
toplam test sayısı	30

Tablo 6'dan görüldüğü gibi tüm test problemlerinde M_{HS-BZ} modeli, M_{BZ} modelinden daha başarılı amaç fonksiyonu değerlerine sahiptir.

H_0 hipotezi: İki modelin performansları arasında anlamlı fark yoktur.

H_1 hipotezi: M_{HS-BZ} ve M_{BZ} modellerinin performansları arasındaki fark anlamlıdır.

Burada p-değeri $\approx 1.86 \times 10^{-9}$ olarak hesaplanmıştır. p değeri çok küçük bir sayı olduğundan H_0 hipotezi reddedilir. M_{HS-BZ} modeli M_{BZ} modelinden daha başarılıdır. Aralarındaki performans farkı anlamlıdır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, beklemesiz esnek akış tipi çizelgeleme problemi, makine hızlarının iş bazında değişebildiği durumda, bakım başlama zamanlarına da karar verecek şekilde bütünleşik bir yapıda ele alınmıştır. Ele alınan problemin çözümü için bir matematiksel model geliştirilmiş ve önerilen modelin performansı rassal türetilen test problemleri ile değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, makine hız değişimlerini dikkate almanın, son işin tamamlanma zamanı açısından önemli bir iyileştirme sağladığını göstermektedir. Sabit hız varsayımı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, en az %5 en fazla %23 oranında daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu bulgu, bakım planlaması ve değişken makine hızlarının entegre bir şekilde optimize edilmesinin özellikle aşamalar arasında bekleme olmaması gereken özel üretim süreçlerinde, kayda değer verimlilik artışları sağlayabileceğini göstermektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar, geliştirilen modelin daha büyük ölçekli problem setleri üzerinde test edilmesini ve çözüm sürelerinin iyileştirilmesi için sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin kullanımını içerebilir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Feriştah ÖZÇELİK, makale fikrinin oluşturulması, çözüm yönteminin tasarımı, test problemlerinin türetilmesi, testlerin yapılması ve elde edilen bulguların yorumlanması, makalenin yazımı; Tuğba SARAÇ, makale fikrinin oluşturulması, çözüm yönteminin tasarımı, test problemlerinin türetilmesi, testlerin yapılması ve elde edilen bulguların yorumlanması, makalenin yazımı konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynakça

Abdollahpour, S. ve Rezaian, J. (2017). Two new meta-heuristics for no-wait flexible flow shop scheduling problem with capacitated machines, mixed make-to-order and make-to-stock policy. *Soft Computing*, 21, 3147-3165. Doi: https://doi.org/10.1007/s00500-016-2185-z

Asefi, H., Jolai, F., Rabiee, M. ve Tayebi Araghi M. E. (2014). A hybrid NSGA-II and VNS for solving a bi-objective no-wait flexible flowshop scheduling problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 1017–1033. Doi: https://doi.org/10.1007/s00170-014-6177-9

Bouras, A., Masmoudi, M., Saadani, N. E. H., Bahroun, Z. ve Abdeljaouad, M. A. (2021). Multi-stage appointment scheduling for outpatient chemotherapy unit: a case study. *RAIRO-operations Research*, 55(2), 589-610. Doi: https://doi.org/10.1051/ro/2021025

Carpov, S., Carlier, J., Nace, D. ve Sirdey, R. (2012). Two-stage hybrid flow shop with precedence constraints and parallel machines at second stage. *Computers & Operations Research*, 39(3), 736-745. Doi: https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.05.020

Chen, K., Li, D. ve Wang, X. (2020). Makespan minimization in two-machine flow-shop scheduling under no-wait and deterministic unavailable interval constraints. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 29, 400-411. Doi: https://doi.org/10.1007/s11518-020-5456-2

Esmaelian, M., Mohammadi, M. ve Shahmoradi, H. (2023). New formulation for scheduling flexible flow shop problems. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(6), 3305-3319. Doi: https://doi.org/10.1007/s12008-023-01414-5

Espinouse, M-L, Formanowicz, P. ve Penz, B. (2001). Complexity results and approximation algorithms for the two machine no-wait flow-shop with limited machine availability, *Journal of the Operational Research Society*, 52(1), 116-121. Doi: https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601025

Fang, K., Luo W. ve Che A. (2021). Speed scaling in two-machine lot-streaming flow shops with consistent sublots, *Journal of the Operational Research Society*, 72(11), 2429-2441. Doi: https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1796533

Huang, R. H., Yang, C. L. ve Liu, S. C. (2015). No-Wait Flexible Flow Shop Scheduling with Due Windows. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(1), 456719. Doi: https://doi.org/10.1155/2015/456719

Işık, E. E., Topaloglu Yildiz, S. ve Şatır Akpunar, Ö. (2023). Constraint programming models for the hybrid flow shop scheduling problem and its extensions. *Soft Computing*, 27(24), 18623-18650. Doi: https://doi.org/10.1007/s00500-023-09086-9

Jafarzadeh, H., Moradinasab, N. ve Gerami, A. (2017). Solving no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines and rework time by the adjusted discrete Multi Objective Invasive Weed Optimization and fuzzy dominance approach. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 10(5), 887-918. Doi: https://doi.org/10.3926/jiem.2348

Jolai, F., Rabiee, M. ve Asefi, H. (2012). A novel hybrid meta-heuristic algorithm for a no-wait flexible flow shop scheduling problem with sequence dependent

setup times, *International Journal of Production Research*, 50(24), 7447-7466. Doi: https://doi.org/10.1080/00207543.2011.653012

Jolai, F., Sheikh, S., Rabbani, M. ve Karimi, B. (2009). A genetic algorithm for solving no-wait flexible flow lines with due window and job rejection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42, 523-532. Doi: https://doi.org/10.1007/s00170-008-1618-y

Meng, L., Zhang, C., Shao, X., Zhang, B., Ren, Y. ve Lin, W. (2020). More MILP models for hybrid flow shop scheduling problem and its extended problems, *International Journal of Production Research*, 58(13), 3905-3930. Doi: https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1636324

Miyata, H. H., Nagano, M. S. ve Gupta, J. N. D. (2019a). Incorporating preventive maintenance into the m-machine no-wait flow-shop scheduling problem with total flow-time minimization: a computational study, *Engineering Optimization*, 51(4), 680-698. Doi: https://doi.org/10.1080/0305215X.2018.1485903

Miyata, H. H., Nagano, M. S. ve Gupta, J. N. (2019b). Integrating preventive maintenance activities to the no-wait flow shop scheduling problem with dependent-sequence setup times and makespan minimization. *Computers & Industrial Engineering*, 135, 79-104. Doi: https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.034

Miyata, H. H. ve Nagano, M. S. (2021). Optimizing distributed no-wait flow shop scheduling problem with setup times and maintenance operations via iterated greedy algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 592-612. Doi: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.005

Moradinasab, N., Shafaei, R., Rabiee, M. ve Ramezani, P. (2013). No-wait two stage hybrid flow shop scheduling with genetic and adaptive imperialist competitive algorithms, *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 25(2), 207-225. Doi: https://doi.org/10.1080/0952813X.2012.682752

Qin, Y. ve Zhang, H. (2016). Elite particle swarm optimization algorithm for solving the bi-criteria no-wait flexible flow shop problem. *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 9(12), 267-232. Doi: http://dx.doi.org/10.14257/ijgdc.2016.9.12.24

Rabiee, M., Jolai, F., Asefi, H., Fattahi, P. ve Lim, S. (2016). A biogeography based optimisation algorithm for a realistic no-wait hybrid flow shop with unrelated parallel machines to minimise mean tardiness, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(9), 1007-1024. Doi: https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130256

Rabiee, M., Sadeghi Rad, R., Mazinani, M. ve Shafaei, R. (2014). An intelligent hybrid meta-heuristic for solving a case of no-wait two-stage flexible flow

shop scheduling problem with unrelated parallel machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71, 1229-1245. Doi: https://doi.org/10.1007/s00170-013-5375-1

Ramezani, P., Rabiee, M. ve Jolai, F. (2015). No-wait flexible flowshop with uniform parallel machines and sequence-dependent setup time: a hybrid meta-heuristic approach. *Journal of Intelligent Manufacturing,* 26, 731-744. Doi: https://doi.org/10.1007/s10845-013-0830-2

Shafaei, R., Moradinasab, N. ve Rabiee, M. (2011a). Efficient meta heuristic algorithms to minimize mean flow time in no-wait two stage flow shops with parallel and identical machines, *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 6(6), 421-430. Doi:https://doi.org/10.1080/17509653.2011.10671192

Shafaei, R., Rabiee, M. ve Mirzaeyan, M. (2011b). An adaptive neuro fuzzy inference system for makespan estimation in multiprocessor no-wait two stage flow shop, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(10), 888-899. Doi: https://doi.org/10.1080/0951192X.2011.597430

Shao, W., Shao, Z. ve Pi, D. (2021). Effective constructive heuristics for distributed no-wait flexible flow shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 136, 105482. Doi: https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105482

Singh, H., Oberoi, J. S. ve Singh, D. (2021). Multi-objective permutation and non-permutation flow shop scheduling problems with no-wait: a systematic literature review. *RAIRO-Operations Research*, 55(1), 27-50. Doi: https://doi.org/10.1051/ro/2020055

Spieksma, F. C. ve Woeginger, G. J. (2005). The no-wait flow-shop paradox. *Operations Research Letters*, 33(6), 603-608. Doi: https://doi.org/10.1016/j.orl.2004.10.007

Tang, J. ve Song, J. (2010). Discrete particle swarm optimisation combined with no-wait algorithm in stages for scheduling mill roller annealing process, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(11), 979-991. Doi: https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.506655

Wang, S. ve Liu, M. (2013). A genetic algorithm for two-stage no-wait hybrid flow shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 40(4), 1064-1075. Doi: https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.10.015

Wang, S., Liu, M. ve Chu, C. (2015). A branch-and-bound algorithm for two-stage no-wait hybrid flow-shop scheduling, *International Journal of Production Research*, 53(4), 1143-1167. Doi: https://doi.org/10.1080/00207543.2014.949363

Wang, S., Wang, X. ve Yu, L. (2020). Two-stage no-wait hybrid flowshop scheduling with sequence-dependent setup times, *International Journal of*

Systems Science: Operations & Logistics, 7(3), 291-307. Doi: https://doi.org/10.1080/23302674.2019.1575997

Xuan, H., Zheng, Q., Li, B. ve Wang, X. (2021). A novel genetic simulated annealing algorithm for no-wait hybrid flowshop problem with unrelated parallel machines. *ISIJ International*, 61(1), 258-268. Doi: https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-258

Zhao, F., Hu, X., Wang, L., Xu, T., Zhu, N. ve Jonrinaldi (2023). A reinforcement learning-driven brain storm optimisation algorithm for multi-objective energy-efficient distributed assembly no-wait flow shop scheduling problem, *International Journal of Production Research*, 61(9), 2854-2872. Doi: https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2070786