



PARALEL İŞLEMCİLİ ESNEK AKIŞ ATÖLYESİ ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ İÇİN STOKASTİK ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

Mehmet ERTEM^{1*}, Müjgan SAĞIR²

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

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-5363-3619>

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

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-2781-658X>

Anahtar Kelimeler Öz

<i>Paralel işlemcili esnek akış atölyesi çizelgeleme</i>	<i>Karma Tamsayılı model</i>	<i>Stokastik sıra bağımlı süresi</i>	<i>Stokastik çizelgeleme</i>
<i>Bu çalışmada sıra bağımlı hazırlık zamanlı k kademeli esnek akış atölyesi çizelgeleme problemi için önceden geliştirilmiş bir matematiksel model revize edilerek, sıra bağımlı hazırlık sürelerinin stokastik olma durumu incelenmiştir. Çalışmada bu kapsamda üç matematiksel modele yer verilmektedir. M1 modeli söz konusu problem için daha önce geliştirilen matematiksel modeldir. M2 modeli, M1 modeline göre daha büyük problemleri, daha hızlı çözebilecek, (Sağır, 2015)'den yararlanılarak geliştirilmiş revize modeldir. M3 modeli ise M2'nin stokastik parametreleri dikkate alan Stokastik Programlama metoduyla modellenmiş halidir. 5 kademe, 8 makine ve 6 işe kadar olan problemler her 3 model ile de çözülebilmiş olup M2 modeli ile çözüm süreleri oldukça kısadır. Ayrıca M2 modeli ile 10 işe kadar olan problemler de çözülebilmştir. Genel olarak test problemlerinin çözülmesi sonucunda; M2 modelinin, çözebildiği problem boyutu ve çözüm süresi bakımından M1'e göre</i>			

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

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1244776>

üstünlüğü, M3 modelinin ise stokastik parametreleri ele alarak tamamlanma zamanı bakımından daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında amaç, önce problemin deterministik matematiksel modelinin revize edilerek, daha büyük problemleri daha kısa sürede çözebilecek şekilde geliştirilmesidir. İzleyen adımda ele alınan model, sıra-bağımlı hazırlık sürelerindeki belirsizlikleri hesaba katarak daha gerçekçi sonuçlar verecek şekilde güncellenmiştir.

A STOCHASTIC SOLUTION APPROACH TO FLEXIBLE FLOWSHOP SCHEDULING PROBLEMS

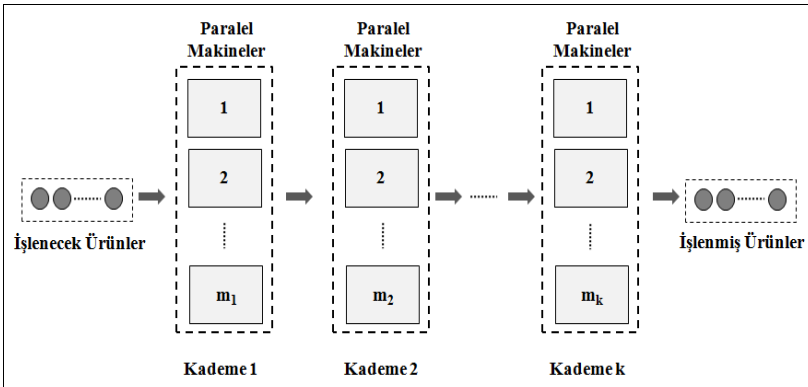
Keywords	Abstract
Hybrid Flow Shop Scheduling Mixed Integer Programming Model Stochastic sequence dependent set-up times Stochastic Scheduling	<p>In this study, a previously developed mathematical model for the k-stage flexible flow shop scheduling problem with sequence dependent setup time is revised and stochasticity of sequence dependent setup times is investigated. In this context, three mathematical models are included in the study. The M1 model is the mathematical model previously developed for the problem in question. The M2 model is a revised model developed by utilizing the ability to solve larger problems faster than the M1 model (Sagir, 2015). The M3 model, on the other hand, is the model of M2 with the Stochastic Programming method, which takes stochastic parameters into account. Problems up to 5 stages, 8 machines and 6 jobs can be solved with all 3 models, and the solution times are very short with the M2 model. In addition, problems up to 10 jobs were solved with the M2 model. In general, as a result of solving test problems; It has been shown that the M2 model is superior to M1 in terms of the problem size and solution time it can solve, while the M3 model gives better results in terms of completion time by taking stochastic parameters. The aim of this study is to first revise the deterministic mathematical model of the problem and develop it in a way that can solve larger problems in a shorter time. The model addressed in the next step has been updated to provide more realistic results by considering the uncertainties in sequence-dependent setup times.</p>
Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 30.01.2023	Submission Date : 30.01.2023
Kabul Tarihi : 25.07.2023	Accepted Date : 25.07.2023

1. Giriş

Paralel işlemcili esnek akış atölyesi çizelgeleme probleminde (HFS-hybrid flow shop), işlerin işlenmesi gereken birden fazla üretim kademesinin ve her kademede paralel makinelerin olduğu bir üretim ortamı ile ilgilenilir. Amaç, bir performans ölçütünü eniyileyecek şekilde işlerin kademelerde ve makinelerde işlem görecekları sırayı belirlemektir (Ribas, Leisten ve Framinan, 2010). İşlem sürelerinin bir parçası olmayan hazırlık süreleri işlerin sırasına bağılı olarak değiştiğinde bu problem zorlaşır. Dudek, Smith ve Panwalkar (1974) endüstriyel işlemlerin %70'inin sıra bağımlı hazırlık süresi içerdiğini göstermiştir. Bu çalışma kapsamında, akış tipi çizelgeleme probleminde sıra bağımlı hazırlık sürelerini stokastik olarak ele almanın katkısı araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında ele alınan problem $FF_k, (PM^{(m_i)}) / S_{ijk}/C_{enb}$ şeklinde tanımlanmakta olup, söz konusu gösterim, k kademeli bir esnek akış tipi üretim ortamında, işler arasında sıra bağımlı hazırlık sürelerinin (S_{ijk}) olduğu, i . kademede m_i adet özdeş paralel makinenin bulunduğu ve toplam tamamlanma zamanının (C_{enb}) enküçüklenmesinin amaçlandığı bir problemi tanımlamaktadır (Sagır ve Okul, 2015).

Paralel işlemcili esnek akış atölyesi çizelgeleme problemleri, akış atölyesi çizelgeleme problemleri ile paralel makine çizelgeleme problemlerinin özelliklerini birleştirmektedir. Akış atölyelerinde bütün işler atölyenin kademelerini (aşamalarını) aynı sırayla ziyaret ederler. Paralel işlemcili akış atölyelerinde ise, her aşamada, işleri işleyecek bir veya daha fazla makine (işlemci) vardır. Aynı işlemi yapabilen m_i tane makine i . kademeye, paralel olarak yerleştirilir ve her iş bu makinelerden birinde işlenebilir. Bu durum, üretim sistemine ek bir esneklik kazandırır. Tanımlanan atölye ortamı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Paralel İşlemcili k -kademeli Esnek Akış Atölyesi

İkinci bölüm paralel işlemcili esnek akış atölyesi çizelgeleme problemleri ile ilgili çalışmalara yer vermektedir. Önceden geliştirilmiş deterministik matematiksel model (M1) ile bu çalışma kapsamında revize edilmiş deterministik model (M2) ve (M2)'de sıra bağımlı hazırlık sürelerinin stokastik olarak ele alındığı model (M3) üçüncü bölümde açıklanmaktadır. Dördüncü bölüm çözüm yaklaşımını ve bir örnek problem sonucunu göstermektedir. Beşinci bölümde çeşitli büyüklüklerdeki problemler için M1 ve M3 modellerinin çözüm performansları karşılaştırılmaktadır. Altıncı bölümde sonuçlar tartışılmaktadır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Paralel işlemcili esnek akış atölyesi çizelgeleme problemi, her bir kademe içinde işlerin makinelere atanması ve aynı makinedeki işlerin sıralanmasını içerir (Ribas ve diğ., 2010). Birden fazla çözüm yaklaşımı sunulmuştur, ancak dal-sınır algoritması en sık kullanılan yöntemdir (Dessouky, Dessouky ve Verma, 1998). Lee ve Kim (2009), her kademe içindeki makinelerin eşit olduğu iki kademeli bir paralel işlemcili esnek akış atölyesi içinde, gecikme iş sayısını en küçük hale getiren bir dal-sınır algoritması incelemiştir.

Sezgisel yaklaşımlar, orta ve büyük boyutlu problemlerde yaygın olarak kullanılır. En basit sezgisel yaklaşım, çizelgeleme politikaları ya da sıralama kuralları olarak bilinen liste çizelgeleme algoritmalarıdır. Brah (1996), m kademeli bir paralel işlemcili esnek akış atölyesi çizelgeleme problemi üzerinde, 10 sıralama kuralının en büyük gecikmenin en küçüklenmesi amacı altında performanslarını karşılaştırmıştır. Brah ve Wheeler (1998), aynı problem üzerinde, toplam tamamlanma zamanının ve en büyük gecikmenin en küçüklenmesi kriterleri altında sıralama kurallarının performanslarını daha iyi analiz edebilmek için simülasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir.

Araştırmacılar son 30 yılda, basit deterministik sezgisel yöntemlerin performansını artırmak amacıyla metasezgisel yöntemler geliştirmişlerdir. Metasezgisel yöntemler, tavlama benzetimi, yasaklı arama ve genetik algoritma olarak bilinmektedir ve ayrıca karınca kolonisi optimizasyonu, yapay bağışıklık sistemleri ve yapay sinir ağları gibi yöntemler de çizelgeleme problemlerinde kullanılmaktadır (Ruiz, Şerifoğlu ve Urlings, 2009).

Janiak, Kozan, Lichtenstein ve Oğuz (2007) k kademeli bir paralel işlemcili akış atölyesi çizelgeleme probleminde, tavlama benzetimi, yasaklı arama ve melez algoritma olarak üç farklı yaklaşım sunmuş ve melez algoritmanın daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Başka bir çalışmada Engin, Özmete, İpek ve Karoğlu (2023) bulanık esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin çözümünde hibrit biyocoğrafya tabanlı optimizasyon algoritması (HBTO) kullanılmıştır. Bu algoritma, akış tipi çizelgeleme problemlerinin çözümünde de kullanılmaktadır. Çalışma, NP-zor bir problemin çözümünde etkili bir yöntem sunmaktadır.

Ayrıca, Allahverdi (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, çizelgeleme problemlerine yönelik 150 çalışma içinde sadece az sayıda çalışmada hazırlık süresi, önemli bir parametre olarak değerlendirilmiştir (Gholami, Seyed, Hakimifar, Nazemi ve Jolai, 2017). Bu çalışmalar arasında, esnek akış atölyesi çizelgeleme problemi için çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Morais, Godinho ve Boiko (2013) tarafından yapılan bir literatür çalışmasında da hazırlık süresinin önemine dikkat çekilmiş ve az sayıda çalışmanın bu konuyu ele aldığı vurgulanmıştır.

İzleyen örnekler, sıra bağımlı hazırlık sürelerinin deterministik olarak ele alındığı çalışmaların örnekleridir. Behnamian ve Ghomi (2011), paralel işlemcili esnek akış atölyesinde sıra bağımlı hazırlık sürelerinin bulunduğunu varsayarak en büyük tamamlanma zamanını ve toplam kaynak atama maliyetini enküçükleme amacıyla genetik algoritma ve komşu değişken arama yöntemlerini birleştirerek melez bir yaklaşım önermiştir. 100 işten fazlasını içeren test problemleri için bu yaklaşım, rastgele seçim benzetiminden (RNDSA) daha iyi sonuçlar vermiştir.

Rashidi, Jahandar ve Zandieh (2010) sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu bir paralel işlemcili esnek akış atölyesi ortamında en büyük tamamlanma zamanını ve gecikmeyi en küçükleme problemini incelemiştir. Marichelvam, Prabaharan ve Yang (2014) aynı amaç fonksiyonu için, k -kademeli bir paralel işlemcili esnek akış atölyesi çizelgeleme probleminin Guguk kuşu- Cuckoo Search (CS) algoritması ve başlangıç çözümü için NEH sezgiseli ile çözümünü gerçekleştirmiştir. Gerçek veriler ile testler yapılmış ve geliştirilen algoritmanın performansı literatürde yer alan bazı çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ICS (Geliştirilmiş Cuckoo Search) algoritmasının diğer metasezgisellere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ozsoydan ve Sağır (2021) sıra bağımlı hazırlık zamanını dikkate alarak, paralel işlemcili esnek akış atölyesi problemi için açgözlü algoritmaya dayalı bir hipersezgisel algoritma önermiştir.

Ebrahimi, Ghomi ve Karimi (2014) bir paralel işlemcili esnek akış atölyesinde sıra bağımlı hazırlık süreleri olduğunda en büyük tamamlanma zamanını ve toplam gecikmeyi en aza indirmeyi amaçlayan, genetik algoritma temelli NSGA-II ve MOGA algoritmalarını önermiştir. Burada termin tarihleri belirsiz bir parametre olarak kabul edilmiştir. Geliştirilen algoritmaların performansları, farklı parametre setleri için literatürde yer alan MPGA ile kıyaslanmış ve NSGA-II'nin diğer iki algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Pan, Gao, Li ve Gao (2017) aynı problem ve performans kriterine göre toplam dokuz algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritmalar, farklı metasezgisel algoritmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve yapay arı kolonisi yaklaşımının en iyi performansı gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Literatürdeki bilinen 240 en iyi çözümün 126'sı bu çalışma kapsamında iyileştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında ileriki bölümlerde görüleceği üzere, sıra bağımlı hazırlık süresinin stokastik olarak ele alındığı bir matematiksel model geliştirilmiş olup literatürde bu problem için sıra bağımlı hazırlık süresini stokastik olarak ele alan çalışmaya, erişilebilen kaynaklar içerisinde rastlanmamıştır.

3. Yöntem

Literatürde paralel işlemcili esnek akış atölyesi çizelgeleme problemleri için geliştirilmiş matematiksel modeller vardır. Problemin NP-zor yapısı literatürde gösterilmiştir (Gupta, 1988). Bu çalışma kapsamında önceden geliştirilen deterministik bir model (M1) (Sagir, Okul 2015), ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi için geliştirilmiş bir modelleme yaklaşımından esinlenerek (Avalos-Rosales, Angel-Bello ve Alvarez, 2015) paralel işlemcili esnek atölye çizelgeleme problemi için revize edilmiş ve daha etkin sonuç verecek M2 modeli elde edilmiştir. Avalos-Rosales ve diğ. (2015), ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi için tamamlanma zamanını, yeni doğrusallaştırma kısıtları ve bazı yeni değişkenlerin tanımlanması ile elde ederek daha büyük boyutlu problemleri daha kısa sürede çözebilecek bir matematiksel model önermiştir. Bu yaklaşımı paralel işlemcili esnek akış atölyesi çizelgeleme problemine uyarlayarak geliştirdiğimiz M2 modeli, aşağıda M1 modelinden sonra verilmektedir. M3 modeli ise, M2 modelinin sıra bağımlı hazırlık süresi parametresinin stokastik olarak ele alındığı ve bu çalışma kapsamında geliştirilen halidir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

M1 ve M2 modellerinin varsayımları aşağıdaki şekilde ortaktır:

1) Sıra bağımlı hazırlık süreleri ve diğer parametreler deterministiktir. 2) Her kademede en az bir makine, en az bir kademede birden fazla makine bulunmaktadır. 3) Bir makine bir anda sadece bir işi işleyebilir. 4) Her iş, bir kademede sadece bir makinede işlenebilir. 5) İşler, önceki kademede işleri bittikten ve izleyen kademede işlem görecekları makine uygun olduğu anda işlem görürler.

M3 modeli için ise, (1) nolu varsayım geçerli olmayıp diğer varsayımlar geçerlidir.

M1 modeli

Kümeler

$N = \{1, \dots, n\}$	İş & Sıra	$i, j, s \in N$
$M = \{1, \dots, \sum_t m_t\}$	Makine	$l \in N$
$K = \{1, \dots, v\}$	Kademe	$t \in M$

İndisler

Parametreler

m_t	t kademesindeki makine sayısı
p_{jt}	j işinin t kademesindeki işlem süresi
h_{jt}	j işi t kademesinde ilk iş ise hazırlık süresi
S_{ijt}	t kademesinde i işinden j işine geçildiğinde sıra bağımlı hazırlık süresi
q_j	j işinin talebi

Karar değişkenleri

C_{jt} : j işinin t kademesinde tamamlanma zamanı

C_{enb} : enbüyük tamamlanma zamanı

$$X_{jtls} : \left. \begin{array}{l} j \text{ işi } t \text{ kademesinde } l \text{ makinesinde } s \text{ inci sıraya atanırsa,} \\ \text{(d. d.,} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 1 \\ 0 \end{array}$$

Matematiksel model

$\text{Enk } C_{enb}$

$$\sum_{l=1}^{m_t} \sum_{s=1}^n X_{jtls} = 1 \quad \forall(j, t) \quad (1.1)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{jtls} \leq 1 \quad \forall(t, l, s) \quad (1.2)$$

$$C_{jt} + M(1 - X_{jtls}) \geq C_{j(t-1)} + p_{jt}q_j + h_{jt} \quad \forall(j, l) \quad s = 1, t > 1 \quad (1.3)$$

$$C_{jt} - C_{it} + M(2 - X_{itl(s-1)} - X_{jtls}) \geq p_{jt}q_j + s_{ijt} \quad (1.4)$$

$$\forall(i, j, t, l) \quad i \neq j, s > 1$$

$$C_{jt} \geq C_{j(t-1)} + p_{jt} * q_j \quad \forall(j, t) \quad t > 1 \quad (1.5)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{jtls} - \sum_{i=1}^n X_{itl(s-1)} \leq 0 \quad \forall(t, l) \quad s > 1, i \neq j \quad (1.6)$$

$$C_{enb} \geq C_{jt} \quad \forall(j, t) \quad (1.7)$$

$$C_{jt} \geq 0 \quad \forall(j, t) \quad (1.8)$$

$$X_{jtls} \in \{0,1\} \quad \forall(j, t, l, s) \quad (1.9)$$

(1.1) her işin her kademede yalnızca tek bir makinede ve tek bir sıraya atanmasını sağlar. (1.2) bir makinenin bir anda en çok bir işi işleyebileceğini gösterir. (1.3) ve (1.4) bir işin tamamlanma zamanını hesaplayan kısıtlardır. Eğer iş bir kademede bir makinede ilk iş ise tamamlanma zamanı (1.3) ile, aksi halde (1.4) ile bulunmaktadır. (1.5) öncelik ilişkisini, (1.6) işlerin ardışık olarak atanmasını sağlar. (1.7) ve (1.8) enbüyük tamamlanma zamanını hesaplar. (1.9) işaret kısıtıdır.

Avalos-Rosales vd. (2015)'nin ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problem için daha etkin çözümler elde etmeyi sağlayan modelleme yaklaşımı bu çalışma kapsamında tanımlanan problem için ilk kez kullanılarak, aşağıdaki M2 modeli elde edilmiştir. Literatürde yer alan bu problem için, erişilebildiği kadarıyla, bu uyarılama henüz gerçekleşmemiştir. Bu kapsamda, paralel işlemcili esnek akış problemleri ile ilgilendiğimiz için karar değişkeni tanımlamaları ve kısıtlar aşağıdaki şekilde revize edilmiştir.

M2 modeli

Kümeler

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

$$N_0 = N \cup 0$$

$$M = \{1, \dots, \sum_l m_l\}$$

$$K = \{1, \dots, v\}$$

İş

0: Sahte İş

Makine

Kademe

İndisler

$$j, k \in N$$

$$j, k \in N_0$$

$$i \in M$$

$$l \in K$$

Karar değişkenleri

C_{kl} : k işinin l kademesinde tamamlanma zamanı

CK_k : k işinin tamamlanma zamanı

C_{enb} : enbüyük tamamlanma zamanı

$$x_{ijkl} : \left\{ \begin{array}{l} l. \text{ kademedede } i. \text{ makinede } j \text{ işinden sonra } k \text{ işi gelirse,} \\ \text{d. d. ,} \end{array} \right. \begin{array}{l} 1 \\ 0 \end{array}$$

$$y_{ikl} : \left\{ \begin{array}{l} l. \text{ kademedede } i. \text{ makineye } k \text{ işi atanırsa,} \\ \text{d. d. ,} \end{array} \right. \begin{array}{l} 1 \\ 0 \end{array}$$

Matematiksel model (M2)

Enk C_{enb}

$$\sum_{k \in N_0} x_{ijkl} \leq 1 \quad \forall (i, j \in \{0\}, l) \quad (2.1)$$

$$C_{kl} \geq C_{k(l-1)} + p_{kl}q_k \quad \forall (k \in N, l), l > 1 \quad (2.2)$$

$$C_{kl} \geq C_{k(l-1)} + p_{kl}q_k + x_{ijkl} * h_{kl} \quad \forall (i, j \in \{0\}, k \in N, l), l > 1 \quad (2.3)$$

$$C_{kl} - C_{jl} + M(1 - x_{ijkl}) \geq s_{jkl} + p_{kl}q_k \quad \forall (i, j \in \{0\}, k \in N, l), l > 1, j \neq k \quad (2.4)$$

$$\sum_{i \in M} y_{ikl} = 1 \quad \forall (k \in N, l) \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in N_0} x_{ijkl} = y_{ikl} \quad \forall (i, k \in N, l), j \neq k \quad (2.6)$$

$$\sum_{k \in N_0} x_{ijkl} = y_{ijl} \quad \forall (i, j \in N, l), j \neq k \quad (2.7)$$

$$CK_j \geq C_{jl} \quad \forall (j \in N, l) \quad (2.8)$$

$$C_{enb} \geq CK_j \quad \forall (j \in N) \quad (2.9)$$

$$C_{enb} \geq \sum_{l \in K} (\sum_{j \in N_0} \sum_{k \in N_0} x_{ijkl} s_{jkl} + \sum_{k \in N_0} y_{ikl} p_{kl} q_k) \quad \forall (i), j \neq k \quad (2.10)$$

$$C_{kl} \geq 0 \quad \forall (k \in N, l) \quad (2.11)$$

$$C_{kl} = 0 \quad \forall (l, k \in \{0\}) \quad (2.12)$$

$$CK_j \geq 0 \quad \forall (j \in N_0) \quad (2.13)$$

$$x_{ijkl} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j, k, l) \quad (2.14)$$

$$y_{ijl} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j, l) \quad (2.15)$$

M2 modelinde amaç en son işin tamamlanma zamanını en küçüklemeektir. Burada kısıt (2.1) her kademede ve her makinede sahte işten sonra en fazla bir iş atanmasını sağlar. Kısıtlar (2.2), (2.3) ve (2.4) bir işin tamamlanma zamanını hesaplayan kısıtlardır. (2.2) işin, bir kademedeki tamamlanma zamanının, o işin o kademedeki işlem süresi ile işlem gördüğü önceki kademedeki tamamlanma zamanından büyük olması gerektiğini sağlamak içindir. (2.3), iş bir kademede ilk iş ise, tamamlanma zamanını sıra bağımlı olmayan, ilk işe özel hazırlık süresini (h_{kl}) dikkate alarak hesaplamak içindir. (2.4) ise bir işin tamamlanma zamanını; kendisinden önce gelen işin tamamlanma zamanını, diğer işe geçişteki sıra bağımlı hazırlık süresini ve işin işlem süresini dikkate alarak hesaplamak içindir. (2.5) her kademede her işin yalnızca bir makineye atanmasını garanti etmektedir. (2.6) ve (2.7) kısıtları x ve y değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlar. (2.8) bir işin tamamlanma zamanını, (2.9) ve (2.10) ise enbüyük tamamlanma zamanını hesaplar. (2.11) ve (2.13) tamamlanma zamanını gösteren karar değişkenlerinin negatif olmamasını garanti ederken (2.12) her kademede sahte işlerin tamamlanma süresinin 0 olmasını sağlar. Son olarak, (2.14) ve (2.15) işaret kısıtlarıdır.

M3 modeli

Avoles-Rosales ve diğ. (2015) ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi için, çeşitli tamsayı modeller önererek, bu modellerin hem çözülebilen problem boyutu hem de çözüm süresi açısından daha üstün olduklarını ortaya koymuştur. Bu sonuçların motivasyonundan yola çıkarak M2 modeli, paralel işlemcili, esnek akış atölyesi çizelgeleme problemi için, Avoles-Rosales ve diğ. (2015)'in ilişkisiz paralel makineler için geliştirdiği modele benzer şekilde revize edilerek önceki bölümde gösterildiği şekilde elde edilmişti. Aşağıda ise M2 modelinden hareketle geliştirilen yeni stokastik programlama modeline yer verilmektedir (M3).

Kümeleler M2 modeli ile aynıdır. Ek olarak:

$$W = \{1, \dots, w\} \quad \text{Senaryo} \quad w \in W$$

Parametreler

S_{jklw} : Senaryo w için l kademesinde j işinden k işine geçilirse stokastik hazırlık süresi

Karar değişkenleri

C_{klw} : Senaryo w için k işinin l kademesinde tamamlanma zamanı

CK_{jw} : Senaryo w için j işinin tamamlanma zamanı

Matematiksel model (M3)

$\text{Enk } C_{enb}$

$$\sum_{k \in N_0} x_{ijkl} \leq 1 \quad \forall (i, j \in \{0\}, l) \quad (3.1)$$

$$C_{klw} \geq C_{k(l-1)w} + p_{kl}q_k \quad \forall (k \in N, l, w), l > 1 \quad (3.2)$$

$$C_{klw} \geq C_{k(l-1)w} + p_{kl}q_k + x_{ijkl}h_{kl} \quad \forall (i, j \in \{0\}, k \in N, l, w), l > 1 \quad (3.3)$$

$$C_{klw} - C_{jlw} + M(1 - x_{ijkl}) \geq S_{jklw} + p_{kl}q_k \quad \forall (i, j \in \{0\}, k \in N, l, w), l > 1, j \neq k \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in M} y_{ikl} = 1 \quad \forall (k \in N, l) \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in N_0} x_{ijkl} = y_{ikl} \quad \forall (i, k \in N, l), j \neq k \quad (3.6)$$

$$\sum_{k \in N_0} x_{ijkl} = y_{ijl} \quad \forall (i, j \in N, l), j \neq k \quad (3.7)$$

$$CK_{jw} \geq C_{jtw} \quad \forall (j \in N, l, w) \quad (3.8)$$

$$C_{enb} \geq \frac{1}{|W|} \sum_w CK_{jw} \quad \forall (j \in N) \quad (3.9)$$

$$C_{enb} \geq \frac{1}{|W|} \sum_w \left(\sum_{l \in K} \left(\sum_{j \in N_0} \sum_{k \in N_0} x_{ijkl} S_{jklw} + \sum_{k \in N_0} y_{ikl} p_{kl} q_k \right) \right) \quad \forall (i), j \neq k \quad (3.10)$$

$$C_{klw} \geq 0 \quad \forall (k \in N, l, w) \quad (3.11)$$

$$C_{klw} = 0 \quad \forall (l, k \in \{0\}, w) \quad (3.12)$$

$$CK_{jw} \geq 0 \quad \forall (j \in N_0, w) \quad (3.13)$$

$$x_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j, k, l) \quad (3.14)$$

$$y_{ijl} \in \{0,1\} \quad \forall(i, j, l) \quad (3.15)$$

M3 modelinin kısıtları M2 modeli ile benzer özelliklere sahiptir. Örneğin, senaryo indeksi içermeyen (3.1), (3.5), (3.6), (3.7), (3.14) ve (3.15) numaralı kısıtlar M2 modelindeki aynı sıra numaralı kısıtlarla eş görevleri yapmaktadır. Benzer şekilde, (3.2), (3.3) ve (3.4) her işin her kademe ve senaryodaki tamamlanma sürelerinin hesaplanmasını sağlar. (3.8) her işin her senaryodaki tamamlanma sürelerinin, (3.9) ve (3.10) ise en büyük tamamlanma zamanının senaryolar üzerinden beklenen değerinin hesaplanmasını sağlar. Son olarak, (3.11) ve (3.13) her senaryodaki tamamlanma zamanını gösteren karar değişkenlerinin negatif olmamasını garanti ederken (3.12) her kademede ve senaryoda sahte işlerin tamamlanma süresinin 0 olmasını sağlar.

4. Çözüm yaklaşımı ve oyuncak problem

Bu çalışma kapsamında çözüm yaklaşımı olarak, standart hazırlık sürelerini ya da senaryoların ortalamasını kullanan deterministik yaklaşım yerine, tüm olası senaryoları dikkate alarak eniyi çözümü bulan stokastik programlama yaklaşımı benimsenmiştir.

4.1. İki aşamalı stokastik programlama

Stokastik programlama, stokastik değerlere sahip parametrelerin geçmiş veriler veya uzman görüşü kullanılarak değerlendirildiği optimizasyon problemlerini modellemek için kullanılır. Stokastik parametreleri dikkate almanın başka bir yolu, verileri olasılık dağılımlarına uydurarak teorik dağılımlar oluşturmaktır. Rücu (recourse) modelleri, stokastik parametre değerlerinin bilinmeden önce ilk aşama kararın alındığı en yaygın stokastik programlama modelleridir. Stokastik parametrelerin değerleri ortaya çıktıktan sonra önceki aşama kararında düzeltmeler yapılır ve ardından bir sonraki aşama kararı verilir. En yaygın kullanılan rücu modeli, ilk aşamada kararın alındığı, ardından belirsizliğin ortaya çıktığı ve ikinci aşamada rücu kararının alındığı iki aşamalı stokastik modeldir.

Deterministik yaklaşımda tek bir değere ihtiyaç duyulduğu için geçmiş veriler kullanılarak bir nokta tahmini yapılır veya bu verilerin ortalaması alınır. Bu yaklaşım değişkenliği göz ardı eder ve yalnızca kullanılan tek değeri dikkate alarak çözümler üretir. Buna karşılık, stokastik yaklaşım, senaryolar yardımıyla stokastik parametreler üzerindeki varyasyonu öngören daha gerçekçi bir çizelgeleme sağlar.

Bu çalışmada, stokastik sıra-bağımlı hazırlık sürelerindeki değişkenlik Monte Carlo örnekleme yöntemi ile senaryolaştırılmıştır. Senaryolaştırma aşamasında geçmiş veriler dağılıma uydurularak her senaryo için rastgele bir parametre

değeri üretiliyor. Böylece gerçekçi veriler kullanılarak yapılan çizelgeleme, olası durumları göz önünde bulundurarak uzun vadede daha başarılı sonuçlar alınmasını sağlar. Stokastik model kullanmanın avantajını açıklamak için, deterministik ve stokastik modellerin sonuçları karşılaştırılarak stokastik çözümün değeri hesaplanır.

4.2. Oyuncak problem

M3 modeli; 3 iş, 2 kademe ve her kademe 2 makine ($\{PU1, PU2\}$, $\{AB1, AB2\}$) olan bir problem için çözülmüştür. Stokastik sıra-bağımlı hazırlık süreleri aşağıda verilen üç senaryo ile temsil edilmiştir:

- İyi (düşük hazırlık süreleri)
- Orta (standart hazırlık süreleri)
- Kötü (yüksek hazırlık süreleri)

Oyuncak problemde kullanılan parametre değerleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1.

Oyuncak Problemin M2 ve M3 Modellerinde Kullanılan p_{kl} , h_{kl} , s_{jkl} , ve q_k Parametrelerinin Değerleri

p_{kl}	1	2	h_{kl}	1	2	s_{jkl}	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	q_k	
1	50	45	1	480	480	1	-	-	420	3600	420	3600	1	300
2	30	45	2	480	480	2	420	3600	-	-	420	3600	2	250
3	20	66	3	480	480	3	420	3600	420	3600	-	-	3	300

Tablo 2.

Oyuncak Problemin M3 Modelinde Kullanılan s_{jklw} Parametresinin Değerleri

s_{jklw}	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
1.2	320	420	520	2600	3600	4600
1.3	420	620	220	1600	5600	3600
2.1	420	530	310	2000	3600	5200
2.3	560	280	420	5800	1400	3600
3.1	420	120	720	2100	3600	5100
3.2	310	420	530	1500	5700	3600

Oyuncak problemin çözümünde izlenecek adımlar şu şekildedir (Ertem, Ozcelik ve Sarac, 2021):

Adım 1: Stokastik programlama problemi tüm senaryolar dikkate alınarak çözülür ve amaç fonksiyonu değeri (z_s) hesaplanır.

Adım 2: Deterministik model kullanılarak problem çözülür ve amaç fonksiyonunun değeri (z_d) hesaplanır.

Adım 3: Adım 2'de bulunan çözüm sabitlenerek stokastik programlama probleminin amaç fonksiyonunun değeri tekrar (z_{mv}) hesaplanır.

Adım 4: Stokastik çözümün değeri (VSS)'ni hesaplamak için deterministik ve stokastik amaç fonksiyonu değerleri arasındaki fark ($VSS = z_{mv} - z_s$) bulunur.

Buna göre, Adım 1 için stokastik modelin eniyi çözümü $z_s=36810$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen çizelgeye göre ilk kademede PU1'e j2-j3, PU2'ye j1, ikinci kademede ise AB1'e j2-j1, AB2'ye j3 şeklinde atanmıştır. Burada belirtilen PU1, PU2, AB1 ve AB2 makinaları, gerçek sistemde yer alan Abkant ve Punch makineleri için kullanılmış olup, orijinal isimler korunmuştur.

Adım 2'de deterministik modelin eniyi çözümünde ise $z_d= 36810$ olup elde edilen çizelgeye göre ilk kademede PU1'e j2, PU2'ye j3-j1, ikinci kademede ise AB1'e j2-j1, AB2'ye j3 şeklinde atanmıştır.

Adım 3 olarak deterministik modelin eniyi çözümdeki karar değişkeni değerleri sabit alınarak stokastik programlama modeli (M3) yeniden çözülüp $z_{mv}=36873,3$ olarak elde edilmiştir. Bulunan amaç fonksiyonu değeri (z_{mv}) kullanılarak VSS değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$VSS=Z_{mv}-Z_s=36873.3-36810=63.3.$$

Bu durumda enküçük tamamlanma zamanı C_{enb} 'ün, problemin stokastik olarak ele alınması ile 63.33 birim azaldığı söylenebilir. Problem, gelecek çalışmalar için, enküçük toplam gecikme süresi, enküçük toplam geciken iş sayısı gibi diğer performans ölçütleri kullanılarak da çözülebilir.

5. Bulgular

Bu çalışma kapsamında geliştirilen alternatif deterministik model (M2) ve stokastik modelin (M3) performanslarını ölçmek adına 15 adet test verisi oluşturulmuştur. Bu kapsamda *Applied Optimization Ssystems*²'de yer alan "*Instances for hybrid flexible flowshop problems with setups*" adlı test verileri, bu çalışma kapsamında tanımlanan probleme uyarlanarak kullanılmıştır. Test verileri geliştirilirken 2-5 kademe aralığı için toplam makine sayıları 4-8 aralığında seçilmiş ve belirlenen kademe-makine kombinasyonları için 3-10 aralığında iş sayıları atanmıştır. Böylece, küçük ve orta ölçekli esnek akış tipi atölye ortamları temsil edilmiştir.

M1 ve M2 modellerinin çözüm performansları, geliştirilen 15 test verisi için Tablo 3'teki gibi elde edilmiştir. Testler çözülürken 20000 saniye süre sınırı uygulanmış ve bu süre içerisinde eniyi sonuç elde edilememesi durumunda elde edilebilen eniyi sonuç tabloya eklenmiştir. Tablo-3'teki sonuçlar M2 modelinin çok daha kısa sürelerde eniyi sonucu bulduğunu göstermektedir. Örneğin, belirlenen süre sınırı içerisinde M1 modeli 9 test verisi için eniyi değere ulaşabilirken M2 modeli için bu sayı 13'tür. Ayrıca, eniyi sonuca ulaşma süreleri arasındaki farklarda şaşırtıcı oranda yüksektir. Mesela, 5-8-6 (kademe-makine-iş) test verisi için M1 modelinin eniyi sonuca ulaşması 6158,42 saniye sürerken M2 modelinin aynı sonuca ulaşması için gereken süre yalnızca 1 saniyedir. Bu sonuçlar, geliştirilen alternatif model sayesinde (M2), atölye tipi makine çizelgeleme problemlerinin çözümünde literatüre ciddi bir katkı sağlayacaktır.

Geliştirilen test verileri aynı zamanda rassal olarak senaryolaştırılmış ve stokastik model (M3) ile de çözülerek stokastik çözümün değeri her test verisi için hesaplanmıştır. Rassal veriler oluşturulurken sıra-bağımlı hazırlık süreleri deterministik sürelerin %20 eksiği ve fazlasının düzgün dağılım parametreleri olacak şekilde ($S_{jklw} \sim D(0.8 * S_{jkl}, 1.2 * S_{jkl})$) türetilmiş ve böylece sıra-bağımlı hazırlık sürelerinde meydana gelebilen değişimler temsil edilmiştir. Stokastik çözüm değerleri Tablo-4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 15 test verisinin 4 tanesinde stokastik çözüm değeri pozitif, 8 tanesinde ise 0 olarak hesaplanmış. Geriye kalan 3 test verisinde ise M3 modeli makul süreler

² <http://soa.iti.es/problem-instances>

içerisinde optimum çözülemediği için stokastik çözümün değeri hesaplanamamıştır. Stokastik çözümün hesaplandığı durumlarda bu değer in kayda değer oranda büyüklüğe sahip olduğu Tablo-4'ten açıkça gözlemlenebilir.

Bu sonuçlar, esnek akış tipi atölye problemlerini stokastik olarak ele almanın daha gerçekçi çizelgeler hazırlamak açısından ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Bazı kademe-makine-iş kombinasyonları için VSS'nin sıfır olarak hesaplanması, sadece o örnek durumlar için problem deterministik olarak ele alınmanın da yeterli olacağı anlamına gelir. Ancak, bu varsayımı genelleştirmenin yanlış olduğunu VSS'nin pozitif hesaplandığı veriler kanıtlamaktadır. Ayrıca, modelin stokastik versiyonu (M3) çözümsel açıdan dahada karmaşıklaştığı için büyük boyutlu problemler için sezgisel yaklaşımlara gerek duyulabilir.

Tablo 3

M1 ve M2 Model Performanslarının Karşılaştırılması

K	M	N	M1		M2	
			Süre (s.)	Amaç F. Değeri	Süre (s.)	Amaç F. Değeri
2	4	3	0,21	36900	0,21	36900
2	4	4	0,33	40900	0,32	40900
2	4	10	**	22850*	481,74	21650
3	5	3	0,22	58190	0,22	58190
3	5	10	**	23430*	20000	21900*
4	6	3	0,23	51940	0,22	51940
4	6	6	475,80	14730	1,55	14730
4	6	7	20000	16755*	24,63	15930
4	6	8	**	17500*	469,69	16420
4	6	9	**	23960*	531,25	19690
5	8	2	0,11	25710	0,06	25710
5	8	4	0,39	19230	0,13	19230
5	8	5	7,81	19230	0,45	19230
5	8	6	6158,42	19230	1,00	19230
5	8	10	**	29390*	20000	23350*

* 20000 saniye süre limitine veya hafıza limitine ulaşıldığı anda elde edilen amaç fonksiyon değeri

** Hafıza limiti çözücünün çalıştırıldığı bilgisayarın hafıza limiti olup problem büyüklüğü 3GB'a ulaştığı anda çözücü elde ettiği eniyi çözümü rapor ederek çözümü sonlandırmaktadır.

Tablo 4

Stokastik Çözümün Değeri

K	M	N	M3		VSS DEĞERİ
			Süre (s.)	Amaç F. Değeri	
2	4	3	0,28	37313,51	0
2	4	4	0,47	40806,98	0
2	4	10	**	20692,69*	-
3	5	3	0,27	57622,59	0
3	5	10	**	21778,17*	-
4	6	3	0,20	51940	0
4	6	6	2,31	14730	0
4	6	7	267,86	16183,23	182,69
4	6	8	3134,64	16324,09	48,53
4	6	9	26758,78	19344,24	0
5	8	2	0,24	25710	0
5	8	4	0,34	19230	0
5	8	5	1,23	19230	43,38
5	8	6	3,17	19230	466,08
5	8	10	**	22748,55	-

-Önceden belirlenen süre içerisinde optimum çözümün bulunamadığı test verileri için VSS değeri hesaplanamamıştır.

*20000 saniye süre limitine veya hafıza limitine ulaşıldığı anda elde edilen amaç fonksiyon değerini

**Hafıza limiti çözücünün çalıştırıldığı bilgisayarın hafıza limiti olup problem büyüklüğü 3GB'a ulaştığı anda çözücü elde ettiği eniyi çözümü rapor ederek çözümü sonlandırmaktadır.

6. Sonuç

Bu çalışmada sıra bağımlı hazırlık zamanlı k kademeli esnek akış atölyesi çizelgeleme problemi için önceden geliştirilmiş bir matematiksel model revize edilerek, sıra bağımlı hazırlık sürelerinin stokastik olma durumu incelenmiştir. Bu kapsamda problem önce hem çözüm süresi hem de problem boyutu olarak daha etkin sonuçlar verecek bir şekilde yeniden modellenmiş ardından sıra bağımlı hazırlık süresi parametresi stokastik olarak ele alınarak yeni bir model daha geliştirilmiştir. Test verileri ile elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Stokastik parametrelerin dikkate alınması, tüm gerçek hayat problemleri için oldukça önemli bir konu olup, deterministik modellerdeki varsayımların yaratabileceği sakıncaların ortadan kalkmasını sağlamaktadır. Bu sayede yönetsel olarak daha etkin ve gerçekçi planlar yapılabilmekte, bu durumda kaynakların daha verimli kullanımını sağlamaktadır. Öte yandan problemlerin stokastik olarak ele alınması çözüm süreçlerini daha da zorlaştırmaktadır. Bu çalışma kapsamında Avalos-Rosales vd. (2015)'nin ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi için önerdiği modelleme yaklaşımı ilk kez esnek akış atölyesi çizelgeleme problemlerine uyarlanarak önce matematiksel model daha kısa sürede ve daha büyük problemleri çözebilecek hale getirilmiş, ardından da sıra bağımlı stokastik hazırlık süresi dikkate alınarak aynı problem Stokastik Programlama metoduyla çözülmüştür. Problemin bu yönleriyle ele alındığı başka bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu nedenle elde edilen bulguların literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında amaç, problem için etkin matematiksel modeller geliştirmek ve stokastik parametreleri ele almanın önemini tartışmak olup ileriki çalışmalarda, aynı problem için sezgisel veya meta-sezgisel algoritmalar geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Mehmet ERTEM, literatür taraması, matematiksel modelin geliştirilmesi, deneysel çalışmaların ve uygulamanın gerçekleştirilmesi, makalenin yazımı ve gerekli düzeltmelerin yapılmasında, Müjgan SAĞIR ise literatür taraması, matematiksel modelin geliştirilmesi, deneysel çalışmaların ve uygulamanın gerçekleştirilmesi, makalenin yazımı ve gerekli düzeltmelerin yapılmasında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Ogubap-Proje No: 201915053).

Kaynaklar

- Allahverdi, A. (2015). The third comprehensive survey on scheduling problems with setup times/costs. *European Journal of Operational Research*, 246 (2), 345–378. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.004>
- Avalos-Rosales, O., Angel-Bello, F. ve Alvarez, A. (2015). Efficient metaheuristic algorithm and re-formulations for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence and machine-dependent setup times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76, 1705-1718. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6390-6>
- Behnamian, J. ve Fatemi Ghomi, S.M.T. (2011). Hybrid flowshop scheduling with machine and resource-dependent processing times. *Applied Mathematical Modelling*, 35, 1107-1123. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.07.057>
- Brah, S. A. (1996). A comparative analysis of due date based job sequencing rules in a flow shop with multiple processors. *Production Planning & Control*, 7(4), 362-373. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537289608930364>
- Brah, S. A. ve Wheeler, G. E. (1998). Comparison of scheduling rules in a flow shop with multiple processors: A simulation. *Simulation*, 71(5), 302-311. DOI: <https://doi.org/10.1177/003754979807100501>
- Dessouky, M. M., Dessouky, M. I. ve Verma, S. K. (1998). Flowshop scheduling with identical jobs and uniform parallel machines. *European Journal of Operational Research*, 109(3), 620-631. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00194-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00194-X)
- Dudek, R., Smith, M. ve Panwalkar, S. (1974). Use of a case study in sequencing-scheduling research. *Omega*, 2, 253–261. DOI: [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(74\)90094-2](https://doi.org/10.1016/0305-0483(74)90094-2).
- Ebrahimi, M., Ghomi, M. F. ve Karimi, B. (2014). Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9–10), 2490–2504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.10.061>
- Engin, O., ÖZMETE, A., İPEK, S. ve KAROĞLU, Y. (2023). Çizelgeleme Problemlerinin Çözümünde Hibrit Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon Algoritmasının Kullanımı. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 1(8), 68-77. Doi: <https://doi.org/10.46578/humder.1256671>

- Ertem, M., Ozcelik, F. ve Sarac, T. (2021),_Stokastik İlişkisiz Paralel Makine Çizelgeleme Problemi için bir Matematiksel Model, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 29, 278-283. DOI: <https://doi.org/10.31590/ejosat.1017475>
- Gholami, Z., Seyed M., Hakimifar, M., Nazemi, N. ve Jolai, F. (2017). Robust and Fuzzy Optimisation Models for a Flow Shop Scheduling Problem with Sequence Dependent Set Up Times: A real case study on a PCB assembly company. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30, 552-563. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2016.1187293>
- Gupta, J.N.D. (1988). Two-stage, hybrid flow shop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 39, 359-364. DOI: <https://doi.org/10.1057/jors.1988.63>
- Janiak, A., Kozan, E., Lichtenstein, M. ve Oğuz, C. (2007). Metaheuristic approach to the hybrid flow shop scheduling problem with a cost-related criterion. *International Journal of Production Economics*, 105, 407-424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.05.027>
- Lee, C. ve Kim, Y.D. (2009). A branch-and-bound algorithm for a two-stage hybrid flowshop scheduling problem minimizing total tardiness. *International Journal of Production Research*, 42(22):4731- 4743. DOI: <https://doi.org/10.1080/0020754041233127044>
- Marichelvam, M.K., Prabakaran, T. ve Yang, X.S. (2014). Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop scheduling problems to minimize makespan. *Applied Soft Computing*, 19, 93-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.02.005>
- Morais, M.D., Godinho, M. ve Boiko, T.J.P. (2013). Hybrid flow shop scheduling problems involving setup considerations: a literature review and analysis. *International Journal of Industrial Engineering Theory Applications and Practice*, 20, 614-630.
- Ozsoydan, B. ve Sagir, M. (2021). Iterated greedy algorithms enhanced by hyper-heuristic-based learning for hybrid flexible flowshop scheduling problem with sequence dependent setup times: A case study at a manufacturing plant. *Computers & Operations Research*, 125(1), 105044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105044>
- Pan, Q.K., Gao, L., Li, X. ve Gao, K. (2017). Effective metaheuristics for scheduling a hybrid flowshop with sequence-dependent setup times. *Applied Mathematics and Computation*, 303, 89-112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.01.004>
- Rashidi, E., Jahandar, M. ve Zandieh, M. (2010), An improved hybrid multi-objective parallel genetic algorithm for hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines. *The International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology, 49, 1129-1139. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2475-z>

Ribas, I., Leisten, R. ve Framinan, J.M. (2010). Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. *Computers and Operations Research*, 37, 1439-454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.001>

Ruiz, R., Şerifoğlu, F.S. ve Urlings, T. (2009). Modeling realistic hybrid flexible flow shop scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 35, 1151-1175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.07.014>

Sağır, M. ve Okul, H. D. (2020). Restricted Enumeration And Machine Grouping Based Approach for Hybrid Flexible Flow Shop Scheduling Problems With Sequence-Dependent Setup Times. *Journal of Industrial Engineering (Turkish Chamber of Mechanical Engineers)*, 31(3). DOI: <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.706010>

Yang, X.S. ve Deb, S. (2009). Cuckoo search via Lévy flights, *NaBIC 2009: Proceedings of the World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing*, Coimbatore, 210-214.