

Enderun Dergisi

Cilt:1 Sayı:1

Gönderiliş Tarihi: 09/01/2017

Kabul Tarihi: 10/02/2017

ESNEK AKIŞ TİPİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI¹

Emre ASLAN²

ÖZ

Esnek akış tipi çizelgeleme problemi birbirine seri aşamaları olan, bu aşamalardan en az birinde paralel makineler bulunan ve işlerin aynı rotayı takip ettiği çizelgeleme problemi tipidir. Akış tipi çizelgeleme probleminin paralel makineli hali veya paralel makine çizelgeleme probleminin çok aşamalı hali olarak da düşünülebilir. Bu konuda geçmiş yıllarda yapılmış literatür çalışmaları olmasına rağmen güncel bir literatür taraması bulunmamaktadır. Bu çalışmada esnek akış tipi çizelgeleme problemi üzerine yapılmış 132 çalışma yayımlandıkları yıla, süreç karmaşıklığına, çizelgeleme kriterine ve çözümde kullanılan yöntem(ler)e göre sıralanmış, 2, 3 ve çok aşamalı olarak sınıflandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Esnek akış tipi çizelgeleme problemi, çizelgeleme

SUPPLY CHAIN MANAGEMENT – ENTERPRISE SYSTEM INTEGRATION AND SUPPLY CHAIN RESOURCE PLANNING

ABSTRACT

Flexible flowshop scheduling problem is a kind of problem that has serial stages, which at least one of them has parallel machines and that jobs follow the same route. It can be considered as flowshop scheduling problem with parallel machines or parallel machine scheduling problem with multi stages. There is not a recent literature review, though there are reviews made in the past. In this study 132 papers on flexible flowshop scheduling problem were sequenced according to publication date, process complexity, scheduling criteria and method(s) used for solution and classified as 2, 3 and multi stages.

Keywords: Supply Chain Flexible flowshop scheduling problem, scheduling

¹ Yazarın Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı Üretim Yönetimi ve Pazarlama Bilim Dalında Prof. Dr. Osman UNUTLMAZ danışmanlığında 23.06.2014 tarihinde savunduğu “Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemine Sezgisel Bir Yaklaşım ve Bir Uygulama” başlıklı doktora tezinden türetilmiştir.

² Yrd. Doç. Dr., Gaziosmanpaşa Üniversitesi, emre.aslan@gop.edu.tr

GİRİŞ

Bir çizelge, genellikle olayların ne zaman olmasının beklendiğini anlatır, belli aktivitelerin zamanlaması için bir plan ortaya çıkarır ve “Eğer her şey yolunda giderse, belli bir olay ne zaman olacak?” sorusunun cevabını verir. (Baker and Trietsch, 2009:1). Sıra, işlerin makinelerdeki işlem görme düzenidir. Bu nedenle bir işlem sırası çeşitli operasyonların başlama ve bitiş zamanları hakkında açık bir bilgi vermez. Fakat çizelge sıralama bilgisinin yanında zaman programını da içerir (French, 1982:26).

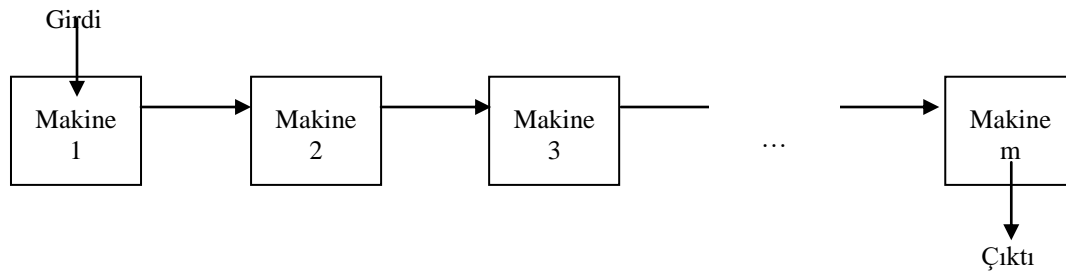
Çizelgeleme, kaynaklar ve görevler arasında bir atama, sıralama ve zamanlama problemidir. Bir organizasyonda kaynaklar ve görevler farklı şekillerde olabilir. Kaynaklar; bir atölyede makineler, havaalanında pistler, inşaat alanında işçiler, bilgisayarda işlemci olabilir. Görevler ise üretim sürecindeki operasyonlar, havaalanında kalkışlar ve inişler, inşaat projesinde aşamalar ve bilgisayar programında yapılan işlemler olabilir. (Pinedo, 2008:1).

1. ESNEK AKIŞ TİPİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ

Pek çok imalat ve montaj tesisinde her bir iş bir dizi operasyondan oluşur. Çoğunlukla, bu operasyonlar her işin aynı rotayı izleyeceği şekilde aynı sırayla yapılır. Makinelerin seri şekilde düzenlendiği kabul edilir ve bu imalat ortamına akış tipi atölye (flow shop) denir. Ardışık makineler arasında yarı mamul stoklama kapasitesinin sınırsız olduğu kabul edilir. Bu genellikle işlem gören ürünlerin fiziksel olarak küçük olduğu, büyük miktarlarda ürünlerin makineler arasında stoklanmasının kolay olduğu durumlarda geçerlidir (Pinedo, 2008:151).

Akış tipinde bir iş *operasyon* denilen ayrı görevlere bölünmüştür ve her bir operasyon farklı bir makinede işlem görür. Bu bağlamda bir iş, özel bir öncelik yapısına sahip operasyonlar topluluğudur. İlkinden sonraki her operasyonun tek öncülü vardır ve sondan önceki her operasyonun tek ardılı vardır (Baker and Trietsch, 2009:225).

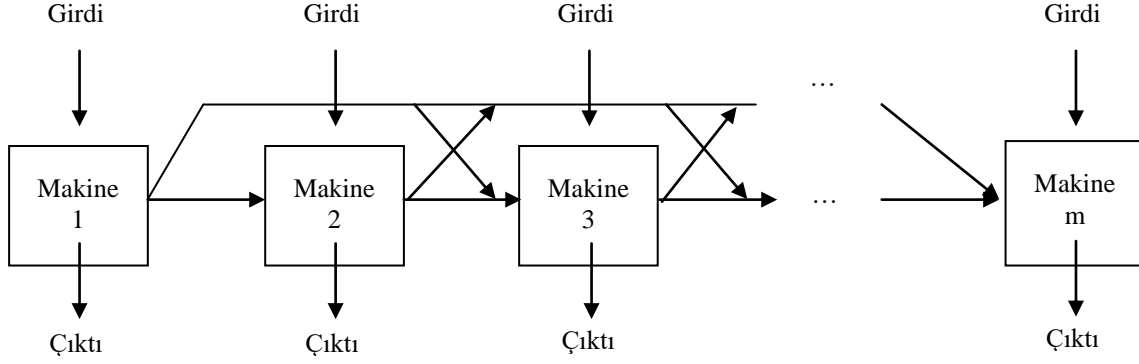
Akış tipindeki atölyede m makine vardır ve klasik akış tipi modelinde her işin her biri farklı makine gerektiren m operasyonu vardır. Böylece akış tipi atölyedeki makineler $1, 2, \dots, m$ şeklinde; j işinin operasyonları ise gereken makineye karşılık gelecek şekilde $(1, j), (2, j), \dots, (m, j)$ şeklinde numaralandırılabilir. Şekil 1 bütün işlerin her makinede bir işlem gerektirdiği klasik akış tipi atölyeyi temsil etmektedir (Baker and Trietsch, 2009:225).



Şekil 1: Klasik Akış Tipinde İş Akışı

Daha genel bir durumda bazı işlerin operasyon sayısı m 'den daha az olabilir (Şekil 2). İşlerin operasyonları her zaman ardışık makinelerde olmayabilir veya ilk ve son operasyonlar her zaman 1 ve m makinelerinde olmayabilir. Bununla beraber işin akışı halen tek yönlüdür ve genel akış tipi bazı operasyonların zamanı sıfır olacak şekilde klasik akış tipi problem şeklinde ifade edilebilir (Baker and Trietsch, 2009:226).

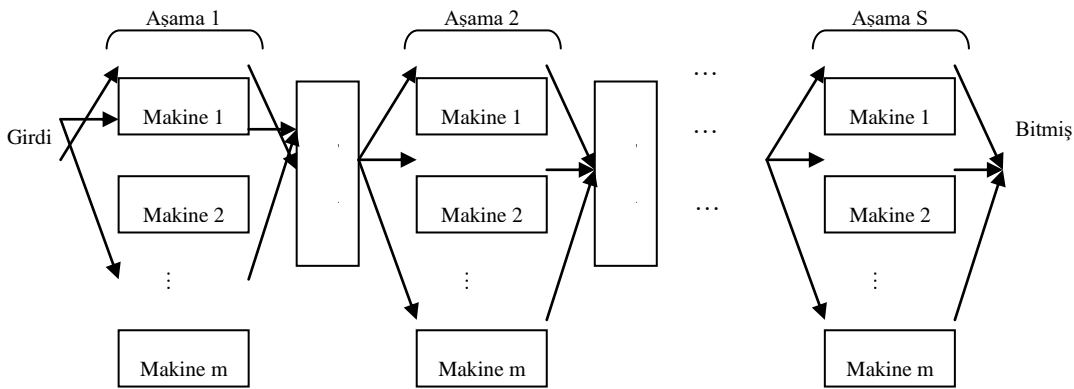
Esnek akış tipi çizelgeleme problemi, klasik akış tipine göre daha genel bir makine ortamı, birbirine seri belli sayıda aşamadan ve her aşamada birbirine paralel belli sayıda makineden oluşur (Pinedo, 2008:151). Esnek akış tipi ortam aynı zamanda melez akış tipi (hybrid flow shop), paralel makineli akış tipi (flow shop with parallel machines), çok işlemcili akış tipi (multiprocessor flow shop) veya esnek akış hattı (flexible flow line) olarak da adlandırılmaktadır (Quadt and Kuhn, 2007b:686; Wang, 2005:78).



Şekil 2: Genel Akış Tipi Bir Atölyede İş Akışı

Esnek akış tipi çizelgeleme, her aşamada tek makine bulunan klasik akış tipi modelin ve tek aşamalı paralel makine modelinin geliştirilmiş halidir (Cheng; Karuno; Kise, 2001:140). Paralel makine çizelgeleme problemi işlerin makinelere tahsisi ile ilgilenirken, akış tipi çizelgeleme problemi aşamalarda işlerin sıralanması ile ilgilenir. Esnek akış tipi çizelgelemede de esas karar verilecek şey, bir veya daha fazla kritere göre işlerin her aşamada farklı makinelerde işlem göreceği sırayı belirlemek üzere her aşamada işleri makinelere atamak ve çizelgelemektir (Ribas; Leisten; Framinan, 2010: 1439). Akış tipi çizelgeleme probleminde bir dizi farklı makine her aşamada bir makine olacak şekilde çok sayıda aşamaya yerleştirilmiştir. Paralel makine çizelgeleme probleminde, bir dizi özdeş makine vardır ve hepsi aynı aşamadır. Esnek akış tipi çizelgeleme probleminde birbirine seri s aşamaya yerleştirilen bir grup makine vardır. l aşamasında $l=1, \dots, s$, birbirine paralel m_l makine vardır. j işi, $j=1, \dots, n$, her aşamada makinelerin herhangi birinde işlem görmelidir. j işinin değişik aşamalardaki işlem süresi paralel makinelerin özdeş olması durumunda $p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{sj}$ şeklinde gösterilir. Her makine belli bir anda sadece bir işi işleyebilir (Wang, 2005: 78). Bu durum Şekil 3'de gösterilmiştir.

Esnek akış tipi makine ortamı pek çok endüstride yaygındır. Eğer bir aşamadaki işlem süreleri diğer aşamalardan önemli ölçüde yüksekse, o aşamaya yeni bir makine eklemek yaygındır. Talepte değişimler olduğunda zaman içinde yeni makineler satın alınır ve bunların genellikle hızları farklı olur. Makine veya kaynaklar maliyetli olduğunda, eski versiyonları hala ekonomik değere sahip olduklarından, yeni alınan makine kadar hızlı olmasalar da kullanılmaya devam ederler (Crowder, 2006: 5).



Şekil 3: Esnek Akış Tipinde İş Akışı

Kaynak: Quadt and Kuhn (2007b: 687).

Esnek akış tipi ortamda bazı aşamalarda tek makine olabilir, fakat en az bir aşamada birden çok makine olması gerekir. İşlerin atölye içindeki akışı tek yönlüdür. Her iş her aşamada bir makinede işlem görür ve bir veya daha fazla aşamadan geçer. Her aşamadaki paralel makineler özdeş, farklı hızda veya ilişkisiz olabilir (Linn and Zhang, 1999: 57).

2. LİTERATÜR

Esnek akış tipi çizelgeleme problemi ile ilgili literatürde pek çok çalışma olmasına rağmen bunların büyük çoğunluğu teorik çalışmalardır (Lin and Liao, 2003: 133). Gerçek hayattaki üretim sistemleri literatürdeki problemlerden daha karmaşıktır ve teori ile mevcut yöntemlerin uygulanması arasında ciddi bir boşluk bulunmaktadır (Ruiz and Maroto, 2006: 781).

Sayıda az da olsa literatürde farklı endüstrilerde uygulaması olan esnek akış tipi çizelgeleme çalışmaları bulunmaktadır. Kablo üretiminde (Narasimhan ve Panwalkar, 1984), baskı devre kartı (PCB) üretiminde (Wittrock, 1985; Wittrock, 1988; Jin vd. 2002; Alisantoso vd., 2003), paketleme tesisinde (Adler vd., 1993), fotoğraf filmi üretiminde (Tsubone vd., 1993), traktör imalatında (Ding and Kittichartphayak, 1994), bir gıda işleme tesisinde (Randhawa vd., 1994), otomobil montajında (Agnētis vd., 1997), uçak motorları üreten bir işletmede (Li, 1997; Huang and Li, 1998), etiket üretiminde (Lin and Liao, 2003), seramik üretiminde (Ruiz and Maroto, 2006), çelik üretiminde (Tseng vd., 2008) ve biyosüreç (antibiyotik, antikor enzim üretimi) endüstrisinde (Gicquel vd., 2012) esnek akış tipi çizelgeleme uygulamalarına rastlamak mümkündür.

Arthanary ve Ramaswamy (1971) ve Salvador (1973) bazı kaynaklarda (Linn and Zhang, 1999: 57; Cheng vd., 2001: 140; Wang, 2005: 78) esnek akış tipi çizelgeleme problemini ilk ortaya atan çalışmalar olarak ifade edilmektedir.

Linn ve Zhang (1999) esnek akış tipi çizelgeleme çalışmalarını üç ana başlıkta değerlendirmişlerdir: süreç karmaşıklığı, modelleme kriteri ve çözüm yöntemleri. Çalışmaları süreç karmaşıklığına göre kabaca üç gruba ayırmışlardır: iki aşamalı, üç aşamalı ve k aşamalı ($k>3$) esnek akış tipi çizelgeleme problemleri. Bu başlıklar altında literatürdeki çalışmaları incelemişlerdir. Çalışmaların daha çok iki aşamalı problemler üzerine yoğunlaştığını, bunların da çoğunun aşamalarda özdeş paralel makineler olan çalışmalar olduğunu söylemektedirler. Maksimum tamamlanma zamanı minimizasyonunun en yaygın kullanılan çizelgeleme kriteri olduğunu ve en yaygın kullanılan çözüm yaklaşımının dal-sınır ve sezgisellerin olduğunu söylemektedirler.

Wang (2005), literatürdeki esnek akış tipi çizelgeleme problemi ile ilgili çalışmaları optimum, sezgisel ve yapay zeka yöntemleri ile getirdikleri çözümlere göre incelemiştir.

Kis ve Pesch (2005), tamamlanma zamanını ve ortalama akış zamanını minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemlerine kesin çözüm getiren çalışmaları incelemişlerdir. İki-aşamalı problemleri dahil etmeyip, ikiden çok aşamalı problemlere bakmışlardır.

Quadt ve Kuhn (2007b) esnek akış tipi çizelgeleme ile ilgili bir sınıflandırma çalışması yapmışlardır. Aşamaları sınırlandırılmış çalışmalar (2-aşamalı, 3 aşamalı gibi) ve işlem bölme içeren çalışmalar dahil edilmemiştir. İnceledikleri çalışmaları çözüm yöntemlerine optimal prosedürler ve sezgiseller olarak iki sınıfta incelemişlerdir. Sezgiseller; ayrışma yaklaşımları (decomposition approach) ve bütünsel (holistic) yaklaşımlar olarak ikiye ayrılmıştır. Ayrışma yaklaşımları iş odaklı, aşama odaklı ve problem odaklı olarak üçe ayrılmıştır.

Ribas vd. (2010), esnek akış tipi çizelgeleme ile ilgili çalışmaları üretim bakış açısıyla dikkate almışlardır. Çalışmaların uygulaması olup olmamasından bağımsız olarak daha gerçekçi, üretim şartlarını dikkate alan çalışmalara bakmışlardır. Çalışmaları öncelikle problem karakteristiklerine, sonra da çözüm yaklaşımlarına göre sınıflandırmışlardır. Problem karakteristiklerinde makine karakteristikleri (özdeş, farklı hızda ve ilişkisiz paralel makineler) ve iş kısıtlarını (sıra bağımlı ve bağımsız olarak hazırlık zamanları, makine boşaltma ve taşıma süreleri, iş öncelikleri, parti büyüklüğü belirleme [lot sizing], parti bölme [lot splitting], ve yeniden işlemeli [re-entrant / recirculation]) dikkate alarak bir sınıflandırma yapmışlardır. Çözüm yaklaşımlarını ise kesin, sezgisel, melez ve simülasyon/karar destek sistemi şeklinde sınıflandırmışlardır. Sezgiselleri kendi içinde yapısal (constructive) ve iyileştirici (improvement) olarak ikiye ayırmışlar, metasezgiselleri, iyileştirici sınıfı altında incelemişlerdir.

Ruiz ve Vazquez-Rodriguez (2010) esnek akış tipi çizelgeleme problemi için en kapsamlı ve güncel literatür taramasını yapmışlardır. 200'den fazla çalışmayı problem tipi (aşama sayısı), paralel makinelerin durumu, amaç fonksiyonu ve kullanılan yöntemlere göre incelemişlerdir. Kullanılan yöntemleri kesin, sezgisel ve metasezgisel algoritmalar başlıkları altında sınıflandırmışlardır.

Tablo 1’de bu makale için yukarıda bahsi geçen esnek akış tipi çizelgeleme problemi ile ilgili literatür çalışmalarından ve veritabanlarından aramalar sonucu ulaşılabilen 132 çalışma süreç karmaşıklığına, çizelgeleme kriterine ve çözüm yöntemlerine göre verilmiştir. Uygulama problemi olan çalışmalar * ile gösterilmiştir. Tabloda FFc esnek akış tipi çizelgeleme problemi olduğunu, c yerinde yazan sayı aşama sayısını, Pm aşamalarda paralel makinelerin özdeş olduğunu, Qm farklı hızda olduğunu, Rm ise ilişkisiz olduğunu belirtmektedir. $block$ bloke etmeyi, $brkdown$ arızaları, s_{jk} sıra bağımlı hazırlık zamanlarını, $prmp$ işlem bölmenin mümkün olduğunu, $fmls$ ürün ailelerini, $batch$ yığın işlemeyi, $rcrc$ yeniden dolaşımı, $prec$ öncelik kısıtlarını, r_j hazır olma zamanlarını, M_j makine uygunluk kısıtlarını, nwt beklemesiz olduğunu ifade etmektedir. C_{max} maksimum tamamlanma zamanı kriterini, w_j ağırlığı, T_j gecikmeyi, E_j erken tamamlanmayı, U_j geciken iş sayısını ifade etmektedir.

Tablo 1: Esnek Akış Tipi Çizelgeleme İle İlgili Literatür Sınıflandırması

| Yazar(lar) | Süreç Karmaşıklığı | Çizelgeleme Kriteri(Tek/Çok) | Çözüm Yöntemi |
|----------------------------------|--|--|-------------------------------|
| * Salvador, 1973 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Dal ve sınır |
| * Narasimhan and Panwalkar, 1984 | $FF2(Rm_2)$ | İkinci aşamada makine atıl bekleme ve işlerin bekleme süreleri | Sezgisel |
| * Wittrock, 1985 | $FF3(Pm)$ aşama atlama | C_{max} ve ara stoklar | Sezgisel |
| Kochhar and Morris, 1987 | $FFc(Pm)$ $block$, $brkdown$ | Ortalama akış süresi | Sezgisel |
| Narasimhan and Mangiameli, 1987 | $FF2(Pm)$ | Siparişlerin bekleme süresi, makine atıl bekleme süresi, C_{max} ve makine tamamlanma zamanları ortalaması | Sezgisel |
| Gupta, 1988 | $FF2(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| * Wittrock, 1988 | $FF3(Pm)$ | C_{max} ve ara stoklar | Sezgisel |
| Sriskandarajah and Sethi, 1989 | $FF2(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Brah and Hunsucker, 1991 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Dal ve sınır |
| Gupta and Tunc, 1991 | $FF2(Pm_2)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Rajendran and Chaudhuri, 1992a | $FFc(Pm)$ | Toplam akış zamanı | Dal ve sınır ile bir sezgisel |
| Rajendran and Chaudhuri, 1992b | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Dal ve sınır |
| * Adler vd. 1993 | $FF3(Rm)$ s_{jk} aşama atlama | $\sum w_j T_j$, toplam hazırlık zamanı, ara stoklar | Sezgisel |

| | | | |
|-----------------------------------|--------------------|--|---|
| Luss and Rosenwein, 1993 | $FFc(Pm)$ | $\sum w_j T_j$ | Sezgisel |
| * Tsubone vd. 1993 | $FF2$ | Hazırlık zamanı oranı, ara stoklar ve üretim oranı | Sezgisel |
| Chang and Liao, 1994 | $FFc(Pm)$ | Gecikme/erken tamamlanma, ara stok | Sezgisel |
| * Ding and Kittichartphayak, 1994 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Gupta and Tunc, 1994 | $FF2(Pm_2)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Hunsucker and Shah, 1994 | $FFc(Pm)$ | C_{max} , ortalama ve maksimum akış zamanı | Sezgisel |
| Lee and Vairaktarakis, 1994 | $FF2(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| * Randhawa vd. 1994 | FFc | C_{max} , makine kullanım oranı | Sezgisel |
| Chen, 1995 | $FF2(Pm_1)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Santos vd. 1995 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Sawik, 1995 | $FF3(Pm) block $ | C_{max} | Sezgisel |
| Uetake vd. 1995 | $FF2(Rm_2)$ | C_{max} ve ara stok | Sezgisel |
| Guinet and Solomon, 1996 | $FFc(Pm)$ | $\max(w_j T_j)$ ve C_{max} | Sezgisel |
| Guinet vd. 1996 | $FF2(Pm)$ | C_{max} | Karma tamsayı programlama ve sezgisel |
| Hoogeveen vd. 1996 | $FF2(Pm_1) prmp $ | C_{max} | Güçlü anlamda NP-zor olduğunu göstermişlerdir |
| Santos vd. 1996 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Vignier vd. 1996a | $FF2(Pm)$ | $\max(T_j)$ | Sezgisel |
| Vignier vd. 1996b | $FFc(Pm)$ | $\sum C_j$ | Dal ve sınır |
| * Agnetis vd. 1997 | $FFc(Pm)$ | $\sum U_j$ ve ara stok | Sezgisel |
| Gupta vd. 1997 | $FF2(Pm_1)$ | C_{max} | Dal ve sınır, sezgisel |

| | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|--|---|
| * Li, 1997 | $FF2(Pm_2)$ $ fmls, batch $ | C_{max} | Sezgisel |
| Oğuz and Ercan, 1997 | $FF2(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Vignier vd. 1997 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Dal ve sınır |
| * Huang and Li, 1998 | $FF2(Qm_2)$ $ fmls $ | C_{max} | Sezgisel |
| Lee and Vairaktarakis, 1998 | $FF2(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Portmann vd. 1998 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Dal ve sınır ile metasezgisel (genetik algoritma) |
| Yang, 1998 | $FFc(Pm) r_j $ | $\sum w_j T_j$ | Sezgisel ile dal ve sınır |
| Brah and Loo, 1999 | $FFc(Pm)$ | C_{max} ve ortalama akış zamanı | Sezgisel |
| Verma and Dessouky, 1999 | $FFc(Qm)$ özdeş işler | C_{max} | Sezgisel |
| Yu vd. 1999 | FFc | C_{max} ve ortalama akış zamanı | Sezgisel |
| Botta-Genoulaz, 2000 | $FFc(Pm) prec $ | $\max(w_j T_j)$ | Sezgisel |
| Carlier and Neron, 2000 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Dal ve sınır |
| Jayamohan and Rajendran, 2000 | $FF3$ | Akış zamanı ve gecikme | Sezgisel |
| Koulamas and Kyparisis, 2000 | $FF2$ $FF3(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Liu and Chang, 2000 | $FFc(Pm) s_{jk} $ | Teslim tarihini karşılama, ara stoklar, hazırlık maliyetleri | Sezgisel |
| Moursli and Pochet, 2000 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Dal ve sınır, alt ve üst sınırlar için sezgisel |
| Sawik, 2000 | $FF3(Pm) block $ | C_{max} | Karma tamsayı programlama |
| Yang vd. 2000 | $FFc(Pm) r_j $ | $\sum w_j T_j$ | Sezgisel |
| Azizoğlu vd. 2001 | $FFc(Pm)$ | Toplam akış zamanı | Dal ve sınır |
| Cheng vd. 2001 | $FFc(Pm)$ | $\max(w_j T_j)$ | Sezgisel |

| | | | |
|-------------------------------|---|--|--|
| Kyparisis and Koulamas, 2001 | $FFc(Pm)$ | $\sum w_j C_j$ | Sezgisel |
| Negenman, 2001 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Metasezgisel (çeşitli yerel arama algoritmaları) |
| Neron vd. 2001 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Dal ve sınır ile ilgili düzenlemeler |
| Soewandi and Elmaghraby, 2001 | $FF3(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Gupta vd. 2002 | $FFc(Pm) prmu $ değişken işlem süreleri | Erken tamamlanma ve gecikme cezaları, ağırlıklı tamamlanma zamanları ve teslim tarihi atama maliyetlerinin toplamı | Sezgisel |
| * Jin vd. 2002 | $FF3(Pm)$ | C_{max} | Metasezgisel (genetik algoritma) |
| Sawik, 2002 | $FF3(Pm) block $ | C_{max} | Karma tamsayı programlama |
| Wang and Li, 2002 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Metasezgisel (genetik algoritma) |
| * Alisantoso vd. 2003 | $FF4(Pm)$ aşama atlama | Ortalama gecikme | Metasezgisel (Bağışıklık algoritması) |
| Kurz and Askin, 2003 | $FFc(Pm) s_{jk} $ aşama atlama | C_{max} | Sezgisel |
| Soewandi and Elmaghraby, 2003 | $FF2(Q_m)$ | C_{max} | Sezgisel |
| * Lin and Liao, 2003 | $FF2(Pm_2)$ $ s_{jk}, M_j $ | $\max(w_j T_j)$ | Sezgisel |
| Engin and Döyen, 2004 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Metasezgisel (yapay bağışıklık sistemi) |
| Kurz and Askin, 2004 | $FFc(Pm) s_{jk} $ aşama atlama | C_{max} | Sezgisel |
| Logendran vd. 2005 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Oğuz and Ercan, 2005 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Metasezgisel (genetik algoritma) |
| Wang vd. 2005 | $FF2(Pm) nwt $ | C_{max} | Sezgisel |

| | | | |
|-------------------------------|----------------------------------|---|---|
| | | atıl zaman yok | |
| Xie and Wang, 2005 | $FF2(Pm)$ $ brkdown $ | C_{max} | Sezgisel |
| Akrami vd. 2006 | $FFc(Pm)$ $ block $ | Hazırlık maliyetleri, ara stok ve bitmiş ürün stok maliyetleri | Karma tamsayıli lineer olmayan programlama, metasezgisel (genetik algoritma ve tabu arama) |
| Allaoui and Artiba, 2006 | $FF2(Pm_2)$ $ brkdown $ | C_{max} | Dal ve sınır ile sezgisel |
| Crowder, 2006 | $FFc(Qm)$ $ s_{jk},$ $block $ | C_{max} | Metasezgisel (başlangıç çözümü için sezgisel, sonrasında benzetimli tavlama) |
| Haouri vd. 2006 | $FF2(Pm)$ | C_{max} | Dal ve sınır |
| Kyparisis and Koulamas, 2006a | $FFc(Qm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Kyparisis and Koulamas, 2006b | $FF2(Qm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Logendran vd. 2006 | $FFc(Pm)$ $ s_{jk} $ | C_{max} | Metasezgisel (tabu arama) |
| * Ruiz and Maroto, 2006 | $FFc(Rm)$ $ s_{jk} $ | C_{max} | Metasezgisel (genetik algotirma) |
| Zandieh vd. 2006 | $FFc(Pm)$ $ s_{jk} $ | C_{max} | Metasezgisel (bağışıklık algoritması) |
| Caricato vd. 2007 | $FF2(Pm_1)$ | C_{max} | Sezgisel (gezgin satıcı problemine dayalı) ve karma tamsayıli programlamaya dayalı |
| Janiak vd. 2007 | $FFc(Pm)$ $ r_j $ | $\sum w_j E_j, \sum w_j T_j$ ve toplam ağırlıklı bekleme süresi | Sezgisel ve metasezgisel (tabu arama ve benzetimli tavlama) |
| Jenabi vd. 2007 | $FFc(Rm)$ | Toplam hazırlık ve stok maliyetleri | Karma 0-1 lineer olmayan programlama ve metasezgisel (genetik algoritma melezi ve benzetimli tavlama) |
| Quadt and Kuhn, 2007a | FFc | Hazırlık maliyetleri ve ortalama akış zamanı | Metasezgisel (genetik algoritma) |
| Paternina-Arboleda vd. | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |

2008

| | | | |
|------------------------------------|---|--|---|
| Ruiz vd. 2008 | $FFc(Rm)$ $ r_j, s_{jk}, M_j, prec $ aşama atlama | C_{max} | Karma tamsayı programlama ve sezgisel |
| Shiau vd. 2008 | $FFc(Pm)$ Oransal | $\sum w_j C_j$ | Metasezgisel (genetik algoritma ve tabu arama melezi) |
| * Tseng vd. 2008 | $FF2(Pm_2)$ aşama atlama | C_{max} | Sezgisel |
| Amin-Naseri and Beheshti-Nia, 2009 | $FFc(Qm) batch $ | C_{max} | Karma tamsayı programlama, sezgisel ve metasezgisel (üç boyutlu genetik algoritma) |
| Behnamian vd. 2009 | $FFc s_{jk} $ | Çok amaçlı C_{max} ve $\sum(E_j+T_j)$ | Metasezgisel (benzetimli tavlama ve değişken komşuluk arama melezi) |
| Choi and Lee, 2009 | $FF2(Pm)$ | U_j | Dal ve sınır, sezgisel |
| Figielska, 2009 | $FF2(Rm_1) prmp $ | C_{max} | Metasezgisel (genetik algoritma ve benzetimli tavlama) |
| Jougllet vd. 2009 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Metasezgisel (memetik algoritma) |
| Jungwattanakit vd. 2009 | $FFc(Rm) s_{jk} $ | C_{max} ve U_j | Karma tamsayı programlama, sezgisel ve metasezgisel (benzetimli tavlama, tabu arama ve genetik algoritma) |
| Karimi vd. 2009 | $FFc(Pm) s_{jk} $ | Çok amaçlı C_{max} ve $\sum w_j T_j$ | Metasezgisel (genetik algoritma) |
| Kim vd. 2009 | $FF2(Pm_1) r_j $ | C_{max} | Sezgisel |
| Naderi vd. 2009 | $FFc(Pm) s_{jk} $ taşıma zamanı | $\sum w_j T_j$ | Karma tamsayı lineer programlama ve metasezgisel (elektromanyetizma algoritması) |
| Tavakkoli-Moghaddam vd. 2009 | $FFc(Pm) block $ | C_{max} | Metasezgisel (memetik algoritma – genetik algoritma ve değişken |

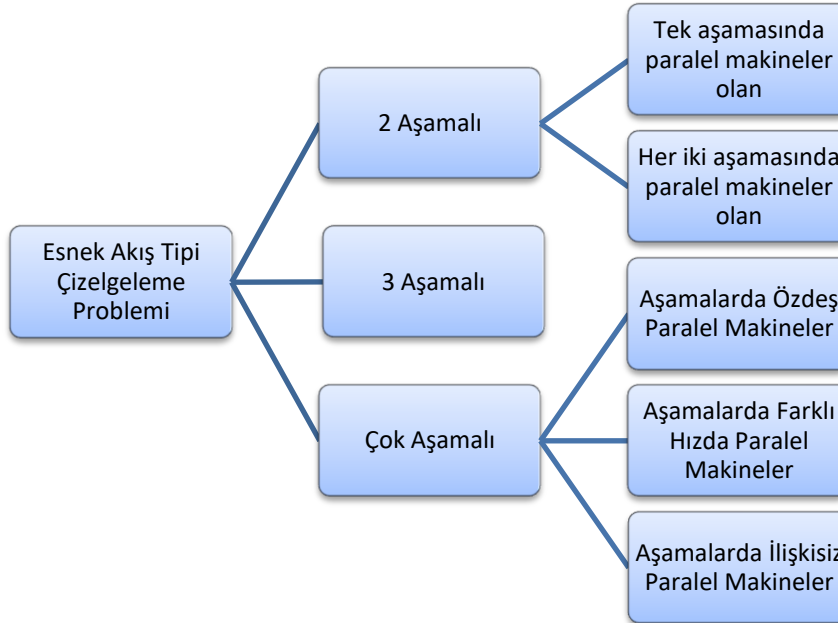
| | | | |
|----------------------------------|--|--|---|
| | | | komşuluk arama melezi) |
| Zandieh and Gholami, 2009 | $FFc(Pm)$ $ brkdown, s_{jk} $ | C_{max} | Metasezgisel (bağışıklık algoritması) |
| Khalouli vd. 2010 | $FFc(Pm)$ | $\sum(E_j+T_j)$ | Metasezgisel (karınca kolonisi optimizasyonu) |
| Urlings vd. 2010 | $FFc(Rm)$ $ r_j, prec,$ $s_{jk}, M_j $ | C_{max} | Metasezgisel |
| Behnamian and Fatemi Ghomi, 2011 | $FFc(Rm)$ $ s_{jk} $ | C_{max} ve toplam kaynak tahsis maliyeti (çok amaçlı) | Metasezgisel (genetik algoritma ve değişken komşuluk arama melezi) |
| Behnamian and Zandieh, 2011 | $FFc(Pm)$ $ s_{jk} $ Sınırlı bekleme süresi | Erken tamamlanma ve karesel geç bitirme cezaları | Karma tamsayı doğrusal programlama ve metasezgisel (kesikli koloni rekabetçi algoritma) |
| Choong vd. 2011 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Metasezgisel (parçacık sürü optimizasyonu, benzetimli tavlama ve tabu arama melezi) |
| Hidri and Haouari, 2011 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Hmida vd. 2011 | $FF2(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Yang, 2011 | $FF2$ $ M_j $ | C_{max} | Sezgisel |
| Carpov vd. 2012 | $FF2(Pm_2)$ $ nwt $ | C_{max} | Sezgisel |
| * Gicquel vd. 2012 | $FF4(Pm)$ $ block,$ $nwt $ | $\sum w_j T_j$ | Karma tamsayı doğrusal programlama |
| Liao vd. 2012 | $FFc(Pm)$ | C_{max} | Metasezgisel (parçacık sürü optimizasyonu ile darboğaz sezgiseli melezi, yerel optimumdan kaçınmak için benzetimli tavlama) |
| Niu vd. 2012 | $FFc(Pm)$ | Ortalama akış zamanı | Metasezgisel (bağışıklık ve quantum algoritmaları melezi) |
| Attar vd., 2013 | $FFc(Rm)$ $ r_j $ sınırlı bekleme zamanı | C_{max} | Metasezgisel (biyocoğrafya tabanlı optimizasyon) |
| Dai vd. 2013 | $FFc(Rm)$ | Çok amaçlı | Matematiksel model ve |

| | | | |
|-------------------------|---|--|--|
| | | C_{\max} ve enerji tüketimi | genetik algoritma benzetimli tavlama melezi |
| Jolai vd. 2013 | $FF2(Pm) /nwt/$ | C_{\max} ve T_{\max} | Benzetimli tavlama temelli yöntemler |
| Mirabi vd 2013 | $FF2(Pm_2) /brkdown/$ | C_{\max} | Sezgisel |
| Tadayon ve Salmasi 2013 | $FFc / r_j, M_j /$ | düzensiz; iş gruplarının toplam tamamlanma zamanı ve grup içinde işin bekleme zamanı | Matematiksel model ve metasezgisel (parçacık sürü optimizasyonu) |
| Wang and Liu, 2013a | $FF2(Pm_2) M_j $ | C_{\max} | Sezgisel (dal ve sınıra dayalı) |
| Wang and Liu, 2013b | $FF2(Pm_2) nwt/$ | C_{\max} | Metasezgisel (genetik algoritma) |
| Asefi vd., 2014 | $FFc(Pm) s_{jk}, nwt $ | Çok amaçlı C_{\max} ve ortalama gecikme | Metasezgisel (NSGA-II ve VNS) |
| Jolai vd. 2014 | $FFc(Pm) /r_j, s_{jk},$ yeniden işleme, taşıma zamanı / | C_{\max} | Metasezgisel |
| Marichelvam vd. 2014 | $FFc(Pm)$ | Çok amaçlı C_{\max} ve ortalama akış zamanı | Metasezgisel (ateşböceği algoritması) |
| Pan vd. 2014 | $FFc(Pm)$ | C_{\max} | Metasezgisel (yapay arı kolonisi) |
| Rabiee vd. 2014 | $FF2(Rm) /r_j, nwt,$ $s_{jk} /$ | C_{\max} | Metasezgisel (benzetimli tavlama, değişken komşuluk arama ve genetik algoritma melezi) |
| Keshavarz vd. 2015 | $FFc(Pm) /s_{jk}/$ | $\sum C_j$ | Matematiksel model ve memetik algoritma |
| Li ve Pan 2015 | $FFc(Rm)$ sınırlı ara stok | C_{\max} | Metasezgisel (yapay arı kolonisi ve tabu arama melezi) |
| * Lin ve Chen 2015 | $FFc(Rm)$ | Akış zamanı | Simülasyon ve genetik algoritma |
| Zandieh ve Hashemi 2015 | $FFc(Pm)$ $/brkdown, s_{jk}/$ | Ortalama tamamlanma zamanı | Simülasyon ve genetik algoritma |
| Adressi vd. 2016 | $FFc(Pm)$ $/brkdown, nwt/$ | C_{\max} | Metasezgisel (genetik algoritma ve benzetimli |

| | | | tavlama) |
|--------------------------|---|--|--|
| Tang vd. 2016 | $FFc(Rm)$ /brkdn/ dinamik | Çok amaçlı; C_{max} ve enerji tüketimi | Parçacık sürü optimizasyonu |
| Tyagi vd. 2016 | $FF4(Pm)$ | C_{max} | Sezgisel |
| Ahonen ve Alvarenga 2017 | $FFc(Rm)$ /rcrc/ sıra bağımlı işlem süreleri | C_{max} | Matematiksel model, benzetimli tavlama ve tabu arama |
| Zhang vd. 2017 | $FFc(Pm)$ partilere ayırma | Toplam akış zamanı | Göçmen kuşlar optimizasyonu |

* uygulamalı çalışmalar

Tablo 1’de verilmiş olan literatürdeki çalışmalardan Şekil 4’teki aşama sayıları ve paralel makine durumuna göre yapılmış sınıflandırma esas alınarak kısaca bahsedilecektir.



Şekil 4: Literatür Sınıflandırması

2.1. İki Aşamalı Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Çalışmaları

2.1.1. Tek Aşamasında Paralel Makineler Olan İki Aşamalı Çalışmalar

İlk olarak iki aşamalı, yalnız bir aşamasında özdeş paralel makineler bulunan problemler ele alınacaktır. Hoogeveen vd. (1996), iki aşamalı ve aşamalarının en az birinde iki özdeş paralel makine olan işlem bölmeli esnek akış tipi çizelgeleme probleminin güçlü anlamda NP-zor olduğunu göstermişlerdir.

$FF2(Pm_1) \mid \mid C_{max}$ Caricato vd. (2007), ilk aşamasında paralel özdeş iki makine, ikinci aşamasında tek makine olan iki aşamalı esnek akış tipi çizelgeleme problemi için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan bazı sezgisel yöntemlerin performansını karma tamsayı programlama ile elde ettikleri optimal çözümlerle karşılaştırmışlardır. Kim vd. (2009), iki aşamalı, ilk aşamasında paralel özdeş makineler, ikinci aşamasında tek makine olan ve hazır olma zamanı ile ürün karması oranı sınırları bulunan bir akış tipi çizelgeleme problemi için maksimum

tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan sezgisel yöntemler geliştirmişlerdir. Chen (1995), ilk aşamasında özdeş paralel makineler olan, ikinci aşamasında tek makine bulunan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için bazı sezgisel yöntemleri karşılaştıran bir çalışma yapmıştır. Gupta vd. (1997), aynı problem için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeye çalışan dal ve sınır algoritması, bu algoritmanın yetmediği yerler için de iki sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Figielska (2009), kaynak kısıtlı, iki aşamalı, ilk aşamasında ilişkisiz paralel makineler bulunan, ikinci aşamasında tek makine bulunan, işlem bölmenin olduğu, esnek akış tipi çizelgeleme problemi için tamamlanma zamanını minimize etmeye çalışan bir genetik algoritma ve benzetimli tavlama algoritması geliştirmiştir.

Vignier vd. (1996a), iki aşamalı, ilk aşamasında paralel özdeş makineler olan, ikinci aşamasında tek makine olan, maksimum gecikmeyi minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için iki sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. İlk sezgiselde tüm makineler müsait olduğu durum, ikincisinde ise bakım politikaları dikkate alınarak paralel makinelerden birinin zaman zaman müsait olmadığı durum ele alınmıştır.

$FF2(Pm_2) \mid C_{max}$ Gupta ve Tunc (1991), ikinci aşamasında özdeş paralel makineler bulunan esnek akış tipi çizelgeleme problemine sezgisel yöntemlerle çözüm aramışlardır. İkinci aşamadaki makinelerin sayısı toplam iş sayısına eşit veya ondan daha fazla olduğu durumlarda En Uzun İşlem Zamanı (LPT) kuralının optimum sonuç verdiği ifade edilmiştir. Makine sayısının iş sayısından az olduğu durumlar için iki sezgisel algoritma önerilmiş ve maksimum tamamlanma zamanını minimize etme performansına göre değerlendirilmiştir. Aynı yazarlar başka bir çalışmalarında (1994), iki aşamalı, ayrı hazırlık zamanları olan esnek akış tipi çizelgeleme problemine sezgisel yöntemlerle çözüm getirmişlerdir. Problemin ilk aşamada tek makine, ikinci aşamada ise iş sayısından daha fazla paralel özdeş makine olması durumunda optimal çözüm veren bir algoritma geliştirmişlerdir. İkinci aşamadaki paralel makine sayısının iş sayısından daha az olduğu durumlar için sezgiselleri kullanmışlardır. Li (1997), uçak motorları üreten bir işletmedeki gerçek bir uygulama probleminden yola çıkarak, iki aşamalı, ilk aşamasında tek makine, ikinci aşamasında özdeş paralel makineler bulunan, ürün aileleri, hazırlık zamanları, yığın işleme ve partilere ayırma bulunan esnek akış tipi çizelgeleme problemine sezgisel yöntemlerle çözüm getirmiştir. Allaoui ve Artiba (2006), aynı tip probleme arızalar ve bakımlardan dolayı makinelerin müsait olmama durumlarını ekleyerek maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan küçük çaplı problemler için dal ve sınır algoritması geliştirmişler; büyük problemler için ise üç sezgisel yöntemin en kötü durum performanslarını (worst case performance bound) incelemişlerdir. Tseng vd. (2008) iki aşamalı, ilk aşamasında tek makine, ikinci aşamasında özdeş paralel makineler olan, bazı işlerin ilk aşamayı atladığı, bir çelik fabrikasındaki esnek akış tipi çizelgeleme problemine belli bir permutasyon çizelgeyi permutasyon olmayan çizelgeye çeviren ve maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Yang (2011), iki aşamalı, ilk aşamasında tek makine, ikinci aşamasında tahsis edilmiş iki makine bulunan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan iki sezgisel yöntem geliştirmiş ve en kötü durum sınırları bulmuştur. Carpov vd. (2012), iki aşamalı, ilk aşamasında tek, ikinci aşamasında özdeş paralel makineler bulunan, beklemeli ve beklemez iki esnek akış tipi çizelgeleme problemi için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Wang ve Liu (2013a), iki aşamalı, ilk aşamasında tek, ikinci aşamasında ise işlere tahsis edilmiş paralel makineler bulunan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan dal ve sınır temelli bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Sezgiselin 60 saniye içinde optimale %2 yaklaşan çözümler bulabildiği ifade edilmektedir. Aynı problemin ilk aşamasında tek makine ikinci aşamasında özdeş paralel makineler olan beklemez bir türü için (Wang and Liu, 2013b) maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Lin ve Liao (2003), etiket üreten bir tesisinin iki aşamalı, ilk aşamada sıra bağımlı hazırlık zamanı olan, ikinci aşamada tahsis edilmiş makineleri olan esnek akış tipi çizelgeleme problemine sezgisel bir yöntemle çözüm getirmişlerdir. Amaç ağırlıklı maksimum gecikmeyi minimize edecek şekilde günlük ürün karmasını çizelgelemektir. Sezgisel yöntem ilk aşamada toplam hazırlık zamanı, ikinci aşamada ilk giren ilk çıkar kuralının birleşiminden oluşmaktadır. Sezgisel yöntemin performansı küçük çaplı problemlerin optimal çözümleriyle ve işletmenin mevcut çizelgeleme yönteminin sonucuyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Huang ve Li (1998), Li (1997) çalışmasındaki probleme çok benzer iki aşamalı, ilk aşamasında tek, ikinci aşamasında farklı hızlı

paralel makineler bulunan, ürün aileleri olan ve bunlar arasında hazırlık süreleri olan maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için iki sezgisel, sekiz tane de sıralama kuralını karşılaştırmışlardır. Narasimhan ve Panwalkar (1984), iki aşamalı, ilk aşamasında tek makine, ikinci aşamasında ilişkisiz paralel makineler olan (kablo üretim tesisinde uygulaması olan), ikinci aşamada makinelerin ve işlerin bekleme sürelerini minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için farklı sıralama kurallarını karşılaştırmışlardır. Uetake vd. (1995), iki aşamalı, ilk aşamasında tek makine, ikinci aşamasında ise ilişkisiz paralel makineler bulunan, maksimum tamamlanma zamanı ve ara stok miktarının minimize edilmesinin amaçlandığı esnek akış tipi çizelgeleme problemi için sıralama kurallarının etkisini karşılaştırmışlardır. Mirabi vd. (2013), arızaların olduğu 2. aşamasında özdeş paralel makineler olan 2 aşamalı bir esnek akış tipi çizelgeleme problemi için problemi akış tipi çizelgeleme problemine indirgeyip optimal çözümü bulmuşlar, sonrasında 2. aşamadaki makinelerdeki çizelgeleme için bir sezgisel yöntem kullanmışlardır.

2.1.2. Her İki Aşamasında Paralel Makineler Olan Çalışmalar

İki aşamalı, her iki aşamasında da özdeş paralel makineler olan maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemlerini ($FF2(Pm) || C_{max}$) ele alan çalışmalara aşağıda değinilmiştir.

Gupta (1988), iki aşamalı, her aşamada çoklu makine olan esnek akış tipi çizelgeleme problemini ele almış ve bu problemin NP-complete olduğunu ifade etmiştir. Srisankarajah ve Sethi (1989), bu problem için sezgisel yöntemler geliştirmişlerdir. Lee ve Vairaktarakis (1994), bu iki aşamalı problem için bir sezgisel yöntem, ikiden daha fazla aşamalı problemler için bu sezgisel üzerinden başka bir sezgisel yöntem daha geliştirmişlerdir. Lee ve Vairaktarakis (1998), her iki aşamasında da özdeş paralel makineler bulunan problemin yanında sadece ilk aşamasında ve sadece ikinci aşamasında özdeş paralel makineler bulunan iki aşamalı esnek akış tipi çizelgeleme problemleri için de sezgisel yöntemler geliştirmişlerdir. Guinet vd. (1996), bu problem için karma tamsayılı programlama modeli kurmuşlar, fakat problem güçlü anlamda NP-zor olduğu için ilk aşamada sıralama, ikinci aşamada ise makinelere atama yapan bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir.

Xie ve Wang (2005), iki aşamalı, aşamalarında özdeş paralel makineler olan, makinelerin bakım arıza gibi nedenlerden her zaman müsait olmadığı esnek akış tipi çizelgeleme probleminin karmaşıklığını ele alıp, sezgisel algoritmaların en kötü durum sınırlarını bulmuşlardır. İki aşamalı, aşamalarının herhangi birinde özdeş paralel makineler bulunan esnek akış tipi çizelgeleme problemi NP-zor olduğu için, bu probleme bir de makinelerin müsait olma durumu eklendiğinde güçlü anlamda NP-zor hale gelmektedir. Bu problem tipi için Haouri vd. (2006), bir dal ve sınır algoritması; Hmida vd. (2011) ise Johnson Kuralı'na dayanan bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir.

Oğuz ve Ercan (1997), aynı tipte birim işlem süresine sahip problemler için sezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir. Koulamas ve Kyparisis (2000), iki ve üç aşamalı, aşamalarında özdeş paralel makineler bulunan ve maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemleri için sezgisel yöntemler geliştirmişler ve bu yöntemlerin iş sayısı arttıkça sonuçların optimale yaklaştığını ifade etmektedirler. Wang vd. (2005), iki aşamalı, ilk aşamasında m , ikinci aşamasında $m+1$ özdeş paralel makine olan, beklemesiz ve ikinci aşamada makinelerin atıl beklemesinin olmadığı esnek akış tipi çizelgeleme problemi için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir.

İki aşamalı, aşamalarında özdeş paralel makineler olan maksimum tamamlanma zamanı dışında bir kriteri minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemlerini ($FF2(Pm) | \dots | \dots$) ele alan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Narasimhan ve Mangiameli (1987), beş farklı kriteri (siparişlerin bekleme zamanı ve makine atıl zamanları toplamı, siparişlerin bekleme zamanı, makine atıl zamanı, tamamlanma zamanı ve ortalama makine tamamlanma zamanı) minimize etmeyi amaçlayan bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem daha önce Narasimhan ve Panwalkar'ın (1984) kullandığı sezgiselin geliştirilmiş halidir ve diğer sezgisellere göre tüm kriterler açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. Choi ve Lee (2009), geciken iş sayısını minimize etmeyi amaçlayan küçük çaplı problemler için dal ve sınır algoritması, büyük çaplı problemler için ise sezgisel model geliştirmişlerdir.

Soewandi ve Elmaghraby (2003), n iş, iki aşamalı, her aşamasında farklı hızda paralel makineler bulunan esnek akış tipi çizelgeleme problemini için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan sezgisel yöntemler geliştirmişlerdir. Bunlardan birisi en kötü durum performans sınırı oluşturmaktadır. Kyparisis ve Koulamas (2006b), iki aşamalı, aşamalarında farklı hızlı paralel makineler bulunan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan Soewandi ve Elmaghraby'nin (2003) sezgiselini temel alan makine hızına bağımlı ve makine hızından bağımsız sezgisel yöntemler geliştirmişlerdir.

Tsubone; Ohba; Takamuki et al. (1993), fotoğraf filmi üretiminde uygulaması olan iki aşamalı esnek akış tipi çizelgeleme problemi için hazırlık zamanının işlem zamanına oranı, ulaşılabilen üretimin planlanan üretime oranı ve ara stokları azaltmayı amaçlayan bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Sonuçta her üç kriter açısından da iyileşme elde etmişlerdir. Bunun yanında eskiden 2 gün olan çizelge oluşturmak için harcanan zaman yarım güne düşürülmüştür.

Jolai vd. (2013) beklemez ve aşamalarından özdeş paralel makineler olan maksimum tamamlanma ve maksimum gecikmeyi minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için benzetimli tavlama temelli yöntemler geliştirmişlerdir. Rabiee vd. (2014), beklemez, hazır olma zamanı, sıra bağımlı hazırlık zamanı ve aşamalarında ilişkisiz paralel makineler olan maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan 2 aşamalı esnek akış tipi çizelgeleme problemi için melez bir metasezgisel algoritma

2.1.3. Üç Aşamalı Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Çalışmaları

Wittrock (1985), PCB üreten bir tesiste üç aşamalı, aşamalarında paralel özdeş makineler bulunan, aşama atlamalı, maksimum tamamlanma zamanını ve ara stok miktarını minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için üç aşamalı bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. İlk aşama makine tahsisi, ikinci aşama sıralama, üçüncü aşama ise zamanlamadır. Periyodik çizelgeleme yapılmıştır, işlerin küçük bir kümesi bir defa çizelgelenip, bu çizelge defalarca tekrarlanmıştır. Yine benzer problem bu sefer periyodik değil normal bir çizelgeleme ile benzer üç aşamalı yöntemle çözülmüştür (Wittrock, 1988).

Adler; Fraiman; Kobacker et al. (1993), esnek akış tipi ortama uyan bir paketleme tesisi için çizelgeleme destek sistemi geliştirmişlerdir. Öncelikli amaç toplam gecikmeyi minimize etmek, ikincil amaç toplam hazırlık zamanlarını minimize etmek, üçüncül amaç ise ara stok miktarını minimize etmektir. Üç aşamalı ve aşamalarında ilişkisiz ve farklı sayıda paralel makineler bulunan problemde her iş her aşamada işlem görmemektedir (aşama atlama) ve sıra bağımlı hazırlık zamanları vardır.

Sawik (1995), üç aşamalı ve aşamalarında özdeş paralel makineler olan, ara stok olmayan, makine bloke etmeli, maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için sezgisel bir yöntem geliştirmiştir. Aynı yazar buna benzer başka bir çalışmada (2000), sınırlı ara stoklu ve ara stoksuz, makine bloke etmeli esnek akış tipi çizelgeleme problemi için karma tamsayı programlama modeli geliştirmiştir. Ara stoksuz model için 3 aşamalı, sınırlı ara stoklu model için 5 aşamalı bir probleme çözüm getirmiştir. Diğer bir çalışmada ise (Sawik, 2002), sınırlı ara stoklu, yığın çizelgeleme yaptığı tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemine karma tamsayı programlama ile çözüm getirmiştir. Jin vd. (2002), ilk aşamasında 6, ikinci aşamasında 10, üçüncü aşamasında 13 özdeş paralel makine bulunan 3 aşamalı baskı devre üreten bir tesisteki esnek akış tipi çizelgeleme problemine genetik algoritma ile çözüm getirmişlerdir.

Jayamohan ve Rajendran (2000) akış zamanı ve gecikme kriterlerinin minimize edilmesinin amaçlandığı üç aşamalı esnek akış tipi çizelgeleme problemi için sıralama kurallarına bağlı iki yaklaşım geliştirmişlerdir. Birinde her aşamada farklı bir sıralama kuralı kullanılırken, diğerinde her aşama için aynı sıralama kuralı kullanılmıştır. Soewandi ve Elmaghraby (2001), n iş, üç aşamalı ve her aşamada paralel özdeş makineler olan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan sezgisel yöntemler geliştirip, bunları karşılaştıran bir çalışma yapmışlardır. Üç aşamalı problemi, iki aşamalı esnek akış tipi ve son aşamayı da paralel makinelerden oluşan tek aşama şeklinde iki parçaya ayıran atölye ayırma (shop partitioning) olarak adlandırdıkları sezgisel bir yöntem kullanmışlardır. Bunun haricinde önce problemi üç aşamalı bir akış tipi problem olarak ele alıp işleri sıralayan, sonra bu işleri her aşamada makinelere dağıtan bir sezgisel yöntem kullanmışlardır.

Alisantoso vd. (2003), baskı devre üreten bir tesiste uygulaması olan aşamalarında özdeş paralel makineler bulunan 4 aşamalı esnek akış tipi çizelgeleme problemi için ortalama gecikmeyi minimize etmeyi amaçlayan bir bağışıklık algoritması geliştirmişlerdir. Gicquel vd. (2012) biyosüreç endüstrisinde (antibiyotik, antikor, enzim üretimi) 4 aşamalı, aşamalarında özdeş paralel makineler olan, bazı aşamalar arasında beklemesiz, bir aşamada ise sınırlı bekleme süresi olan bir esnek akış tipi çizelgeleme problemi için toplam ağırlıklı gecikmeyi minimize etmeyi amaçlayan karma tamsayı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Tyagi vd. (2016) aşamalarında özdeş paralel makineler bulunan 4 aşamalı esnek akış tipi çizelgeleme problemi için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan bir sezgisel geliştirmişlerdir.

2.2. Çok Aşamalı Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Çalışmaları

2.2.1. Özdeş Paralel Makineli Çalışmalar

Aşamalarında özdeş paralel makineler bulunan ve maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan çok aşamalı esnek akış tipi çizelgeleme çalışmaları $FFc(Pm) | \dots | C_{max}$ aşığıda verilmiştir.

Barh ve Hunsucker (1991), Rajendran ve Chaudhuri (1992b), Vignier vd. (1997), Carlier ve Neron (2000) ve Moursli ve Pochet (2000), aşamalarında özdeş paralel makineler olan esnek akış tipi çizelgeleme problemleri için tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan dal ve sınır algoritmasına dayalı çözümler geliştirmişlerdir. Vignier vd.nin (1997) geliştirdiği yöntem aynı zamanda alt sınırların bulunmasında da kullanılmıştır. Neron vd. (2001), aynı tip problemde dal ve sınır algoritması için iyileştirmeler geliştirmişlerdir.

Ding ve Kittichartphayak (1994), aynı problem için üç ayrı sezgisel yöntemi karşılaştırmışlardır. Bu üç sezgiselin kombinasyonu ile oluşturulan sezgisel yöntem optimale yakın sonuçlar vermektedir. Bu yöntemle traktör imalatı ile ilgili bir uygulama problemini de çözmüşlerdir. Santos vd. (1995), aynı amaç için optimal sonucu bilinmeyen esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinde sezgisel yöntemlerin etkinliğinin belirlenmesinde kullanılacak küresel alt sınırlar bulmuşlardır. Başka bir çalışmada farklı sezgiselleri karşılaştırmışlardır (Santos vd. 1996). Portmann vd. (1998), dal ve sınır algoritması ile genetik algoritmayı kullanarak alt sınırlarda iyileştirme sağlamışlardır. Pek çok durumda genetik algoritma optimal sonucun bulunmasına yardımcı olmuştur. Negenman (2001), yerel arama prosedürlerini (benzetimli tavlama, tabu arama, değişken-derin arama ve literatürde kullanılmış bazı algoritmalar) karşılaştırmıştır. Wang ve Li (2002), genetik algoritma ile; Kurz ve Askin 2003 ve 2004 tarihli iki ayrı çalışmalarında, sıra bağımlı hazırlık zamanlı, aşama atlamalı esnek akış tipi çizelgeleme problemi için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan sezgisel yöntemleri karşılaştırmışlardır. Engin and Döyen (2004), aynı problem için; Zandieh vd. (2006), aynı problemin sıra bağımlı hazırlık zamanlı hali için; Zandieh ve Gholami (2009) ise sıra bağımlı hazırlık zamanlarına ek olarak makine arızaları ve bakımlardan dolayı stokastik ve deterministik şekilde makinelerin müsait olmama durumunun olduğu problem için bir yapay bağışıklık algoritması geliştirmişlerdir. Oğuz ve Ercan (2005) genetik algoritma geliştirmişler; Jouglet vd. (2009), aynı problem için genetik algoritma, genetik algoritmanın yerel aramasında kullanılan kısıt tabanlı bir dal ve sınır algoritması ve bir memetik algoritmayı karşılaştırmışlardır. Paternina-Arboleda vd. (2008) darboğaz temelli sezgisel bir yöntemle çözüm getirmişlerdir. Tavakkoli-Moghaddam vd. (2009), ara stok olmayan, makine bloke etmeli probleme genetik algoritma ve değişken komşuluk aramanın birleştirildiği melez bir memetik algoritma geliştirmişlerdir. Choong; Phon-Amnuaisuk; Alias (2011) parçacık sürü optimizasyonu, benzetimli tavlama ve tabu arama melezi bir metasezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Hidri ve Haouari (2011) bu problem için alt sınırlar belirlemişler ve iki aşamalı bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Liao vd. (2012) parçacık sürü optimizasyonu ve darboğaz sezgiseli melezi bir algoritma geliştirmişler, yerel optimumlardan kaçınmak için benzetimli tavlama dayalı bir mekanizma kullanmışlardır. Pan vd. (2014) yapay arı kolonisi ile çözüm getirmişlerdir.

Logendran vd. (2005), esnek atölye tipi ortamda grup çizelgeleme ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. İki aşamanın ilkinde aynı gruptaki işler arasında bir sıralama, sonra gruplar arasında bir sıralama yapmış, iki farklı senaryo denemişlerdir. Bir gruba ait işin bir aşamada belli bir makinede işlem görmesi durumunu *tekli hazırlık*, o aşamadaki diğer makinelerde de işlem görebilmesini *çoklu*

hazırlık olarak tanımlamışlardır. Sonuçta iş sayısı arttıkça (problem çapı büyüdükçe) grup içindeki sıralama, gruplar arası sıralamadan daha önemli hale gelmektedir. Bunun yanında çoklu hazırlık durumu tekli hazırlıktan daha kötü değil ve hatta bazı durumlarda daha iyi bulunmuştur. Logendran vd. (2006), sıra bağımlı hazırlık zamanlı esnek atölye tipi ortamda grup çizelgeleme için bir tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Küçük, orta ve büyük çaplı problemler için farklı algoritmalar, başlangıç çözümü için farklı mekanizmalar denemişlerdir. Maksimum tamamlanma zamanı ve hesaplama zamanı kriterlerine göre karşılaştırma yapmışlardır. Adressi vd. (2016) beklemez ve tesadüfi arızaların olduğu esnek akış tipi grup çizelgeleme problemine benzetimli tavlama ve genetik algoritma ile çözüm getirmişlerdir.

Aşamalarında özdeş paralel makineler olan, fakat maksimum tamamlanma zamanı dışında başka bir amacı (da) minimize etmeye çalışan çalışmalar $FFc(Pm) | \dots | C_{max} / \dots$ aşağıda verilmiştir.

Kochhar ve Morris (1987) ortalama akış süresini (işlerin sistem içinde geçirdiği sürenin ortalaması) minimize etmeyi amaçladıkları, sınırlı ara stok alanından dolayı makine bloke etmenin, makine arızalarının ve hazırlık sürelerinin olduğu bir esnek akış tipi çizelgeleme problemi için sezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir. Rajendran ve Chaudhuri (1992a) esnek akış tipi çizelgeleme problemi için toplam akış zamanını minimize etmeye çalışan dal ve sınır algoritması ile optimale yakın sonuç veren bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Luss ve Rosenwein (1993) teslim tarihi belirleme algoritması geliştirmişlerdir. Buna göre oluşturulan çizelge ilk geleni ilk atama yapan sezgisel göre toplam ağırlıklı gecikme kriterinde önemli bir gelişme sağlamıştır. Chang ve Liao (1994), erken tamamlanma ve gecikmeden kaynaklanan cezaları ve ara stokları minimize etmeyi amaçlayan problem için optimale yakın sonuçlar veren Lagrange gevşetmesi temelli bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Hunsucker ve Shah (1994) sistem içindeki iş sayısının belli bir sayıyla sınırlı olduğu ve tamamlanma zamanı, ortalama ve maksimum akış zamanını minimize etmeyi amaçlayan farklı öncelik/sıralama kurallarını simülasyonla karşılaştırmışlardır. Guinet ve Solomon (1996), maksimum gecikmeyi ve maksimum tamamlanma zamanını minimize etme amaçlı çeşitli sezgisel yöntemler geliştirmişlerdir. Bu sezgisel modelleri ürettikleri 10, 20, 30 iş, 3 ve 5 aşama ve aşamalarda 2 ve 5 makine olan test problemlerinde karşılaştırmışlardır. Vignier vd. (1996b), toplam tamamlanma zamanını minimize etme amaçlı dal ve sınır algoritması temelli bir çözüm geliştirmişlerdir. Agnetis vd. (1997) bir otomobil montaj fabrikasındaki esnek akış tipi çizelgeleme problemine, geciken iş sayısı ve ara stoğu minimize etmeyi amaçlayan sezgisel bir yöntemle çözüm getirmişlerdir. Yang (1998) makine uygunluk kısıtları olan, toplam ağırlıklı gecikmeyi minimize etmeye çalışan üç ayrı sezgiseli karşılaştırmıştır. Bunların yanında küçük çaplı problemler için bir de dal ve sınır algoritması geliştirmiştir, bu yöntem 5 aşamalı, 10 işli problemleri makul sürelerde çözebilmektedir. Brah ve Loo (1999) iş sayısı, aşama sayısı, aşamalardaki makine sayısı gibi problem karakteristiklerinin esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanılan beş farklı sezgiselin performansına etkilerini regresyonla incelemişlerdir. Problem karakteristikleri, performanstaki değişimin çoğunu açıklasa da sezgisel yöntemin de etkisi olduğunu ve NEH sezgiselinin daha tutarlı sonuçlar verdiğini ifade etmektedirler. Botta-Genoulaz (2000) öncelik kısıtları ve sıralamadan bağımsız hazırlık zamanları olan, maksimum gecikmeyi minimize etmeyi amaçlayan problem için farklı sezgisel yöntemleri karşılaştırmıştır. Liu ve Chang (2000), sıra bağımlı hazırlık zamanlı probleme Lagrange gevşetmesi temelli bir sezgiselle çözüm getirmişlerdir. Amaç erken tamamlanma ve gecikmeye ceza vererek müşterilere teslim tarihini karşılamak, ara stokları ve makine hazırlık maliyetlerini azaltmaktır. Yang vd. (2000), toplam ağırlıklı gecikmeyi minimize etmeyi amaçlayan üç sezgisel yöntem geliştirmiş ve bunları karşılaştırmışlardır. Birisi problemin aşamalarını ayrı ayrı tek aşamalı alt problemlere ayıran ayrışma algoritması (decomposition), diğeri yerel aramaya dayalı bir algoritma, üçüncüsü ise bu ikisinin melezidir. Azizoğlu vd. (2001) toplam akış zamanını minimize etmeyi amaçlayan sezgisel yöntemlerde başlangıç çözümü oluşturan bir dal ve sınır algoritması geliştirmişlerdir. Yöntem orta büyüklükte problemler için makul zamanlarda optimal çözüm elde edebilmektedir. Cheng vd. (2001) maksimum gecikmeyi minimize etmeyi amaçlayan değişken darboğaz prosedürüne dayalı bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Yöntem, problemi m adet paralel makine problemine ayırıp her aşamayı ayrı ayrı çözmektedir. Test problemleri üzerinde diğer bazı sezgisel yöntemlerle yaptıkları karşılaştırmada geliştirdikleri sezgiselin kısa sürede optimale yakın sonuçlar verdiğini ifade etmektedirler. Kyparisis ve Koulamas (2001) toplam ağırlıklı tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan bir sezgisel yöntem geliştirmişler ve en kötü durum performans sınırları belirlemişlerdir. Gupta vd. (2002) atanabilir teslim tarihleri, alt ve üst değerler arasında değişken işlem süreleri olan permutasyon esnek

akış tipi çizelgeleme problemi için erken tamamlanma ve gecikme cezaları, ağırlıklı tamamlanma zamanları ve teslim tarihi atama maliyetlerinin toplamını minimize etmeyi amaçlayan sezgisel yöntemler geliştirmişlerdir.

Akrami vd. (2006), sınırlı ara stoklu ve makine bloke etmeli tipte bir problem için hazırlık, ara stok ve bitmiş ürün stok maliyetlerini minimize etmeyi amaçlayan karma tamsayı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirmişlerdir. Fakat problemin karmaşıklığından dolayı genetik algoritma ve tabu arama yöntemlerine dayalı çözümler de geliştirmişlerdir. Janiak vd. (2007), işlerin hazır olma zamanları ve teslim tarihleri belli olan bir problem için toplam ağırlıklı erken tamamlanma, toplam ağırlıklı gecikme ve toplam ağırlıklı bekleme sürelerini minimize etmeyi amaçlayan sezgisel ve metasezgisel (tabu arama ve benzetimli tavlama) yöntemler geliştirmişlerdir. Karimi; Zandieh; Kar-Amooz (2009), sıra bağımlı hazırlık zamanlı problem için maksimum tamamlanma zamanı ve toplam ağırlıklı gecikmeyi eşzamanlı olarak minimize etmeyi amaçlayan bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Naderi vd. (2009), sıra bağımlı hazırlık zamanları ve taşıma zamanları olan bir problem için toplam ağırlıklı gecikmeyi minimize etmeyi amaçlayan karma tamsayı doğrusal programlama (küçük çaplı problemler için) ve bir metasezgisel algoritma (elektromanyetizma algoritması) geliştirmişlerdir. Khalouli vd. (2010), erken tamamlanma ve geç bitirme cezalarını minimize etmeyi amaçlayan bir karınca kolonisi optimizasyonu algoritması geliştirmişlerdir. Behnamian ve Zandieh (2011), sıra bağımlı hazırlık zamanlı ve sınırlı bekleme süreli bir problem için erken tamamlanma ve karesel geç bitirme cezaları toplamını minimize etmeyi amaçlayan bir karma tamsayı doğrusal programlama modeli ve kesikli koloni rekabetçi algoritma (discrete colonial competitive algorithm) geliştirmişlerdir. Niu vd. (2012) ortalama akış zamanını minimize etmeyi amaçlayan bağımsızlık algoritması ve kuantum algoritmasının geliştirilmiş şekilde melezlenmesiyle elde edilen bir metasezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Asefi vd. (2014) maksimum tamamlanma zamanı ve ortalama gecikmeyi minimize etmek için NSGA-II ve değişken komşuluk arama algoritmasını birlikte kullanmışlardır. Jolai vd. (2014) olası yeniden işleme, taşıma süreleri, hazır olma zamanları, sıra bağımlı hazırlık zamanları olan bir problem için metasezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir. Marichelvam vd. (2014) çok amaçlı (maksimum tamamlanma zamanı ve ortalama akış zamanı) bir probleme ateş böceği algoritması ile literatürdeki pek çok metasezgiselden daha iyi çözüm getirmişlerdir. Keshavarz vd. (2015) sıra bağımlı hazırlık zamanları olan bir problemi için toplam tamamlanma zamanını minimize etmek için karma tamsayı doğrusal programlama modeli ile memetik algoritma kullanmışlardır.

Shiau vd. (2008), oransal esnek akış tipi çizelgeleme (proportionate flexible flowshop) olarak adlandırdıkları (bir işin her aşamadaki işlem süresinin aynı olması durumu) problem için toplam ağırlıklı tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan genetik algoritma ve tabu arama melez bir yöntem geliştirmişlerdir. Zandieh ve Hashemi (2015) sıra bağımlı hazırlık zamanları, tesadüfi arızalar olan bir esnek akış tipi grup çizelgeleme problemine simülasyon ve genetik algoritma ile çözüm getirmişlerdir. Zhang vd. (2017) partilere ayırmanın olduğu aşamalarında bir problemi için göçmen kuşlar optimizasyonu (migrating birds optimization) yöntemini kullanmışlardır.

2.2.2. Farklı Hızda Paralel Makineli Çalışmalar

Aşamalarında farklı hızda paralel makineler olan ve maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemi çalışmaları $FFc(Qm) | \dots | C_{max}$ aşağıda verilmiştir.

Verma ve Dessouky (1999), işlerin özdeş olduğu, aşamalarında farklı hızda paralel makinelerin bulunduğu maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeye çalışan sıralama kuralları ile sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Üç farklı sezgisel, farklı problem koşullarında öne çıkmaktadır, bu yüzden üçünün karışımı bir sezgisel geliştirmişlerdir. Crowder (2006), aşamalarında farklı hızlarda paralel makineler bulunan ve aşamalar arasında sınırlı ara stok olan makine bloke etmeli ve sıra bağımlı hazırlık zamanlı maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan esnek akış tipi çizelgeleme problemi için başlangıç çözümü oluşturan iki sezgisel geliştirmiş, devamında başlangıç çözümünü geliştirmek için benzetimli tavlama yöntemini kullanmıştır. Kyparisis ve Koulamas (2006a) maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan sezgisel yöntemler geliştirmişlerdir. Amin-Naseri ve Beheshti-Nia (2009), yığın işleme yapabilen (bir makinede eşzamanlı olarak birden fazla işin işlenebilmesi) bir problem için maksimum tamamlanma zamanını

minimize etmeyi amaçlayan karma tamsayı programlama, sezgisel ve metasezgisel yöntemler geliştirmişlerdir.

2.2.3. İlişkisiz Paralel Makineli Çalışmalar

Aşamalarında ilişkisiz paralel makineler olan esnek akış tipi çizelgeleme problemi çalışmaları $FFc(Rm) | \dots | C_{max}$ aşağıda verilmiştir.

Ruiz ve Maroto (2006), seramik üretiminde uygulaması olan maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan, aşamalarında ilişkisiz paralel makineler bulunan, sıra bağımlı hazırlık zamanlı esnek akış tipi çizelgeleme problemine genetik algoritma ile çözüm getirmişlerdir. Ruiz vd. (2008) gerçek hayat problemine uygun olacak şekilde esnek akış tipi problemine sıra bağımlı hazırlık zamanları, aşama atlama, makine uygunluk ve öncelik kısıtları, aşamalarda ilişkisiz paralel makineler özelliklerini eklemiştir. Bu problem için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan bir karma tamsayı programlama modeli geliştirmiş ve sezgisel yöntemleri karşılaştırmışlardır. Urlings vd. (2010), öncelik kısıtlamaları, sıra bağımlı hazırlık zamanları ve makine uygunluk kısıtları olan bir problemi için maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlayan bir metasezgisel algoritma geliştirmişlerdir.

Jenabi vd. (2007), toplam hazırlık ve stoksuz kalmayacak şekilde stok maliyetini minimize edecek bir karma 0-1 doğrusal olmayan matematiksel model, büyük çaplı problemler için de melez bir genetik algoritma ve benzetimli tavlama algoritması geliştirmişlerdir. Çözüm kalitesi açısından melez genetik algoritma daha iyi iken hesaplama zamanı açısından benzetimli tavlama daha iyi bulunmuştur. Jungwattanakit vd. (2009), aşamalarında ilişkisiz paralel makineler olan sıra bağımlı hazırlık zamanlı esnek akış tipi çizelgeleme problemi için maksimum tamamlanma zamanı ve geciken iş sayısını minimize etmeyi amaçlayan karma tamsayı programlama, sezgisel ve metasezgisel yöntemler (benzetimli tavlama, tabu arama ve genetik algoritma) geliştirmişlerdir. Behnamian ve Fatemi Ghomi (2011), sıra bağımlı hazırlık zamanlı bir problem için tamamlanma zamanı ve toplam kaynak tahsis maliyetini minimize etmeyi amaçlayan (çok amaçlı) genetik algoritma ve değişken komşuluk arama melezi bir metasezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Attar vd. (2013) sınırlı bekleme zamanı ve hazır olma zamanı olan bir probleme biyocoğrafya temelli optimizasyon ile çözüm getirmişlerdir. Dai vd. (2013) maksimum tamamlanma zamanı ile birlikte enerji tüketimini minimize etmeye çalışmışlar, bunun için matematiksel model ile birlikte genetik algoritma ve benzetimli tavlama melezi bir yöntem kullanmışlardır. Tadayon ve Salmasi (2013) hazır olma zamanı, makine uygunluk kısıtları olan ve işlerin gruplar halinde olduğu bir problem için parçacık sürü optimizasyonu algoritmasını kullanmışlardır. Li ve Pan (2015) sınırlı ara stok olan problem için tabu arama ve yapay arı kolonisi melezi bir yöntem geliştirmişlerdir. Lin ve Chen (2015) aşamalarında hem özdeş hem de ilişkisiz makineler bulunan bir gerçek hayat esnek akış tipi çizelgeleme problemi için simülasyon ve genetik algoritma ile çözüm geliştirmişlerdir. Ahonen ve Alvarenga (2017), yeniden dolaşım ve sıra bağımlı işlem sürelerinin olduğu bir probleme matematiksel model, benzetimli tavlama ve tabu arama ile çözüm getirmişlerdir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar dışında aşamalarındaki paralel makinelerin özdeş, farklı hızda veya ilişkisiz olma durumu net olarak belirtilmemiş çalışmalar da bulunmaktadır: Randhawa vd. (1994), bir gıda işletmesinde esnek akış tipi çizelgeleme problemi için çeşitli sezgisel yöntemleri maksimum tamamlanma zamanı, makine kullanım oranı ve gecikme gibi belli performans kriterlerine göre karşılaştırmışlardır. Aşamalarındaki paralel makinelerin özdeş olmadığı belirtilmiş fakat farklı hızda mı yoksa ilişkisiz mi olduğu net olarak belirtilmemiştir. Yu vd. (1999), CORBA (Common Object Request Broker Architecture) olarak adlandırdıkları, iletişim ve çizelgeleme ajanları bulunan bir yöntemle çözüm getirmişlerdir. Quadts ve Kuhn (2007a), hazırlık maliyetlerini ve ortalama akış zamanını minimize etmeyi amaçlayan bir metasezgisel (genetik algoritma) geliştirmişlerdir. Tüm aşamalarda tüm işler aynı işlem süresine sahiptir. 100 işten oluşan bir problemin bir dakika gibi kısa bir sürede çizelgelenebildiğinden gerçek hayat uygulamalarında kullanılabileceği ifade edilmiştir. Behnamian vd. (2009), sıra bağımlı hazırlık zamanlı bir problem için maksimum tamamlanma zamanı ve erken tamamlanma ve gecikmelerin toplamını minimize etmeyi amaçlayan benzetimli tavlama ve değişken komşuluk arama melezi bir metasezgisel algoritma geliştirmişlerdir.

3. ÇIKARIMLAR / BULGULAR

Bu literatürdeki taraması kapsamında ulaşılan çalışmalar aşama sayıları, aşamalarındaki paralel makinelerin durumları, iş karakteristikleri, amaç fonksiyonları ve kullanılan yöntemlere göre incelenmiş ve aşağıdaki çıkarımlarda bulunulmuştur.

İncelenen çalışmaların 38'i 2 aşamalı, 11'i 3 aşamalı, 3'ü 4 aşamalı ve 80'i çok aşamalıdır. Çalışmaların 100'ünde aşamalarda paralel makineler özdeş, 7'sinde farklı hızda, 17'sinde ilişkisiz ve 8'inde net olarak belirtilmemiştir. Çalışmaların 23'ünde sıra bağımlı hazırlık zamanları, 8'inde bloke etme, 8'inde arızalar, 8'inde hazır olma zamanları, 8'inde bekleme olmama durumu, 7'sinde aşama atlama, 5'inde makine uygunluk, 3'ünde öncelik kısıtları, 2'sinde işlem bölme, 2'sinde ürün aileleri, 2'sinde yığın işleme, 2'sinde sınırlı bekleme, 1'inde permütasyon, 1'inde yeniden dolaşım ve 1'inde taşıma zamanları iş karakteristikleri olarak belirtilmiştir. 132 çalışmanın 77'sinde amaç fonksiyonu tek başına maksimum tamamlanma zamanı (C_{max}), 14'ünde C_{max} ile birlikte diğer amaçlar (4'ünde akış zamanı, 4'ünde maksimum/ağırlıklı toplam veya ortalama gecikme, 3'ünde ara stoklar, 2'sinde enerji tüketimi ve 1'inde geciken iş sayısı), 6'sında toplam ağırlıklı gecikme ($\sum w_j T_j$), 5'inde maksimum ağırlıklı gecikme, 6'sında toplam veya ortalama akış zamanı, 4'ünde toplam ağırlıklı veya ortalama tamamlanma zamanı, 1'inde erken tamamlanma ve gecikme toplamları şeklinde belirlenmiştir. Yöntemlere göre 61 çalışmada sezgisel yöntem, 8 çalışmada dal ve sınır, 7 çalışmada dal ve sınır ile sezgisel, 3'ünde karma tamsayı programlama, 15 çalışmada matematiksel modele ek olarak sezgisel veya metasezgisel, 2 çalışmada doğrusal olmayan programlama ve metasezgisel, toplam 62 çalışmada ise çeşitli metasezgiseller (17 genetik algoritma, 12 benzetimli tavlama, 7 tabu arama, 5 değişken komşuluk arama, 4 parçacık sürü optimizasyonu, 3 yapay bağışıklık, 2 arı kolonisi ve geriye kalan quantum, biyocoğrafya, ateşböceği, göçmen kuşlar, karınca kolonisi gibi diğer algoritmalar) kullanıldığı belirlenmiştir. Amaç fonksiyonları çok amaçlı olan çalışmalardan ve yöntemler bazı yöntemlerin birlikte kullanılmasından dolayı incelenen çalışma sayısından daha çok olabilir.

SONUÇ

Esnek akış tipi çizelgeleme problemleri birbirine seri aşamaları olan ve aşamalarının en az birinde paralel makinelerin olduğu problemlerdir. Bu çalışmada esnek akış tipi çizelgeleme problemi üzerine yapılmış erişilebilen 132 çalışma yayımlandıkları yıla, süreç karmaşıklığına, çizelgeleme kriterine ve çözümde kullanılan yöntem(ler)e göre sıralanmış, 2, 3 ve çok aşamalı olarak sınıflandırılmıştır. Çok aşamalı esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinin çoğunlukta olduğu, en çok kullanılan iş karakteristiğinin sıra bağımlı hazırlık zamanları olduğu, en sık kullanılan amaç fonksiyonunun maksimum tamamlanma zamanı olduğu (C_{max}) ve sezgisel / metasezgisel yöntemlerin yoğun olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Özellikle güncel çalışmalarda göçmen kuşlar optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu, yapay bağışıklık, yapay arı kolonisi gibi yeni metasezgisel yöntemlerin denendiği ve mevcut yöntemlere göre daha iyi sonuçlar alındığı görülmektedir.

KAYNAKÇA

- Adler, L., Fraiman, N., Kobacker, E., Pinedo, M., Plotnicoff, J.C. and Wu, T.P. (1993). BPSS: A scheduling support system for packing industry, *Operations Research*, 41(4), 641-648.
- Adressi, A., Hassanpour, S., & Azizi, V. (2016). Solving group scheduling problem in no-wait flexible flowshop with random machine breakdown. *Decision Science Letters*, 5(1), 157-168.
- Agnetis, A., A. Pacifici, F. Rossi, M. Lucertini, S. Nicoletti, F. Nicolo, G. Oriolo, D. Pacciarelli and E. Pesaro. (1997). Scheduling of flexible flow lines in an automobile assembly plant, *European Journal of Operational Research*, 97, 348-362.
- Ahonen, H., & de Alvarenga, A. G. (2017). Scheduling flexible flow shop with recirculation and machine sequence-dependent processing times: formulation and solution procedures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(1-4), 765-777.
- Akrami, B., B. Karimi and S.M.M. Hosseini. (2006). Two metaheuristic methods for the common cycle economic lot sizing and scheduling in flexible flow shops with limited intermediate buffers: The finite horizon case, *Applied Mathematics & Computation*, 183, 634-645.
- Alisantoso, D., L.P. Khoo and P.Y. Jiang. (2003). "An immune algorithm approach to the scheduling of a flexible PCB flow shop", *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 22, 819-827.

- Allaoui, H. and A. Artiba. (2006). "Scheduling two-stage hybrid flow shop with availability constraints", *Computers & Operations Research*, 33, 1399-1419.
- Amin-Naseri, M.R. and M.A. Beheshti-Nia. (2009). "Hybrid flow shop scheduling with parallel batching", *International Journal of Production Economics*, 117, 185-196.
- Arthanary, T.S. and K.G. Ramaswamy (1971), An extension of two machines sequencing problem, *Opsearch*, 8, 10-22.
- Asefi, H.; F. Jolahi, M. Rabice, M.E. Tayebi Araghi (2014). "A hybrid NSGA-II and VNS for solving a bi-objective no-wait flexible flowshop scheduling problem", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,
- Attar, S. F., Mohammadi, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). Hybrid flexible flowshop scheduling problem with unrelated parallel machines and limited waiting times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(5-8), 1583-1599.
- Azizoğlu, M., E. Çakmak and S. Kondakci. (2001). "A flexible flowshop problem with total flow time minimization", *European Journal of Operational Research*, 132, 528-538.
- Baker, K.R. and D. Trietsch. (2009). *Principles of Sequencing and Scheduling*. New Jersey: Wiley.
- Behnamian, J., S.M.T. Fatemi Ghomi and M. Zandieh. (2009). "A multi-phase covering Pareto-optimal front method to multi-objective scheduling in a realistic hybrid flowshop using a hybrid metaheuristic", *Expert Systems with Applications*, 36, 11057-11069.
- Behnamian, J., S.M.T. Fatemi Ghomi. (2011). "Hybrid flowshop scheduling with machine and resource-dependent processing times", *Applied Mathematical Modelling*, 35, 1107-1123.
- Behnamian, J. and M. Zandieh. (2011). "A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties", *Expert Systems with Applications*, 38, 14490-14498.
- Botta-Genoulaz, V. (2000). "Hybrid flow shop scheduling with precedence constraints and time lags to minimize maximum lateness", *International Journal of Production Economics*, 64, 101-111.
- Brah, S.A. and J.L. Hunsucker. (1991). "Branch and bound algorithm for the flow shop with multiple processors", *European Journal of Operational Research*, 51, 88-99.
- Brah, S.A. and L.L. Loo. (1999). "Heuristics for scheduling in a flow shop with multiple processors", *European Journal of Operational Research*, 113, 113-122.
- Caricato, P., A. Grieco and D. Serino. (2007). "Tsp-based scheduling in a batch-wise hybrid flow-shop", *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, 23, 234-241.
- Carlier, J. and E. Neron. (2000). "An exact method for solving the multi-processor flow-shop", *RAIRO Operations Research*, 34, 1-25.
- Carpov, S., J. Carlier, D. Nace and R. Sirdey. (2012). "Two-stage hybrid flow shop with precedence constraints and parallel machines at second stage", *Computers & Operations Research*, 39, 736-745.
- Chen, B. (1995). "Analysis of classes of heuristics for scheduling a two-stage flow shop with parallel machines at one stage", *Journal of Operations Research Society*, 46, 234-244.
- Chang, S. and D. Liao. (1994). "Scheduling flexible flow shops with no setup effects", *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 10(2), 112-122
- Cheng, J., Y. Karuno and H. Kise. (2001). "A shifting bottleneck approach for a parallel-machine flowshop scheduling problem", *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 44(2), 140-156.
- Choi, H. and D. Lee. (2009). "Scheduling algorithms to minimize the number of tardy jobs in two-stage hybrid flow shops", *Computers & Industrial Engineering*, 56, 113-120.
- Choong, F., S. Phon-Amnuaisuk and M.Y. Alias. (2011). "Metaheuristic methods in hybrid flow shop scheduling problem", *Expert Systems with Applications*, 38, 10787-10793.
- Crowder, B. (2006). *Minimizing the Makespan in a Flexible Flowshop with Sequence Dependent Setup Times, Uniform Machines, and Limited Buffers*, Thesis of Master of Science in Industrial Engineering, College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University. West Virginia
- Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M. A., & Li, W. D. (2013). Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(5), 418-429.
- Ding, F. and D. Kittichartphayak. (1994). "Heuristics for scheduling flexible flow lines", *Computers & Industrial Engineering*, 26(1), 27-34.
- Engin, O. and A. Döyen. (2004). "A new approach to solve hybrid flow shop scheduling problems by artificial immune system", *Future Generation Computer Systems*, 20, 1083-1095.

- Figielska, E. (2009). "A genetic algorithm and a simulated annealing algorithm combined with column generation technique for solving the problem of scheduling in the hybrid flowshop with additional resources", *Computers & Industrial Engineering*, 56, 142-151.
- French, S. (1982). *Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job-Shop*, Chichester, UK, Ellis Horwood.
- Gicquel, C., L. Hege, M. Minoux and W. Canneyt. (2012). "A discrete time exact solution approach for a complex hybrid flow-shop scheduling problem with limited-wait constraints", *Computers & Operations Research*, 39, 629-636.
- Guinet, A.G.P. and M.M. Solomon (1996). "Scheduling hybrid flowshops to minimize maximum tardiness or maximum completion time", *International Journal of Production Research*, 34(6), 1643-1654.
- Guinet, A., M.M. Solomon, P.K. Kedia and A. Dussauchoy. (1996). "A computational study of heuristics for two-stage flexible flowshops", *International Journal of Production Research*, 34(5), 1399-1415.
- Gupta, J.N.D. (1988). "Two-stage, hybrid flowshop scheduling problem", *The Journal of Operational Research Society*, 39(4), 359-364.
- Gupta, J.N.D. and E.A. Tunc. (1991). "Schedules for a two-stage hybrid flowshop with parallel machines at the second stage", *International Journal of Production Research*, 29(7), 1489-1502.
- Gupta, J.N.D. and E.A. Tunc. (1994). "Scheduling a two-stage hybrid flowshop with separable setup and removal times", *European Journal of Operational Research*, 77, 415-428.
- Gupta, J.N.D., A.M.A. Hariri and C.N. Potts. (1997). "Scheduling a two-stage hybrid flow shop with parallel machines at the first stage", *Annals of Operations Research*, 69, 171-191.
- Gupta, J.N.D., K. Krüger, V. Lauff, F. Werner and Y.N. Sotskov. (2002). "Heuristics for hybrid flow shops with controllable processing times and assignable due dates", *Computers & Operations Research*, 29, 1417-1439.
- Haouari, M., L. Hidri and A. Gharbi. (2006). "Optimal scheduling of a two-stage hybrid flow shop", *Mathematical Methods of Operations Research*, 64, 107-124.
- Hidri, L. and M. Haouari. (2011). "Bounding strategies for the hybrid flow shop scheduling problem", *Applied Mathematics & Computation*, 217, 8248-8263.
- Hmida, A.B, M. Haouari, M. Huguet and P. Lopez. (2011). "Solving two-stage hybrid flow shop using climbing depth-bounded discrepancy search", *Computers & Industrial Engineering*, 60, 320-327.
- Hoogeveen, J.A., J.K. Lenstra and B. Veltman. (1996). "Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard", *European Journal of Operational Research*, 89, 172-175.
- Huang, W. and S. Li. (1998). "A two-stage hybrid flowshop with uniform machines and setup times", *Mathematical & Computer Modelling*, 27(2), 27-45.
- Hunsucker, J.L. and J.R. Shah. (1994). "Comparative performance analysis of priority rules in a constrained flow shop with multiple processors environment", *European Journal of Operational Research*, 72, 102-114.
- Janiak, A., E. Kozan, M. Lichtenstein and C. Oğuz. (2007). "Metaheuristic approach to the hybrid flow shop scheduling problem with a cost-related criterion", *International Journal of Production Economics*, 105, 407-424.
- Jayamohan, M.S. and C. Rajendran. (2000). "A comparative analysis of two different approaches to scheduling in flexible flow shops", *Production Planning & Control*, 11(6), 572-580.
- Jenabi, M., S.M.T. Fatemi Ghomi, S.A. Torabi and B. Karimi. (2007). "Two hybrid meta-heuristics for the finite horizon ELSP in flexible flow lines with unrelated parallel machines", *Applied Mathematics & Computation*, 186, 230-245.
- Jin, Z.H., K. Ohno, T. Ito and S.E. Elmaghraby. (2002). "Scheduling hybrid flowshops in printed circuit board assembly lines", *Production and Operations Management*, 11(2), 216-230.
- Jolai, F., Asefi, H., Rabiee, M., & Ramezani, P. (2013). Bi-objective simulated annealing approaches for no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem. *Scientia Iranica*, 20(3), 861-872.
- Jolai, F., Tavakkoli-Moghaddam, R., Rabiee, M., & Gheisariha, E. (2014). An enhanced invasive weed optimization for makespan minimization in a flexible flowshop scheduling problem. *Scientia Iranica. Transaction E, Industrial Engineering*, 21(3), 1007.
- Jouglet, A., C. Oğuz and M. Sevaux. (2009). "Hybrid flow-shop: A memetic algorithm using constraint-based scheduling for efficient search", *Journal of Mathematical Modelling & Algorithms*, 8, 271-292.
- Jungwattanakit, J., M. Reodecha, P. Chaovaitwongse and F. Werner. (2009). "A comparison of scheduling algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times and dual criteria", *Computers & Operations Research*, 36, 358-378.
- Karimi, N., M. Zandieh and R. Kar-Amooz. (2009). "Bi-objective group scheduling in hybrid flexible flowshop: A multi-phase approach", *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4024-4032.

- Keshavarz, T., Salmasi, N., & Varmazyar, M. (2015). Minimizing total completion time in the flexible flowshop sequence-dependent group scheduling problem. *Annals of Operations Research*, 226(1), 351-377.
- Kim, Y., B. Joo and J. Shin. (2009). "Heuristics for a two-stage hybrid flowshop scheduling problem with ready times and a product mix ratio constraint", *Journal of Heuristics*, 15, 19-42.
- Kis, T. and E. Pesch. (2005). "A review of exact solution methods for the non-preemptive multiprocessor flowshop problem", *European Journal of Operational Research*, 164, 592-608.
- Khalouli, S., F. Ghedjati and A. Hamzaoui. (2010). "A meta-heuristic approach to solve a JIT scheduling problem in hybrid flow shop", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23, 765-771.
- Kochhar, S. and R.J.T. Morris. (1987). "Heuristic methods for flexible flow line scheduling", *Journal of Manufacturing Systems*, 6(4), 299-314.
- Koullamas C. and G.J. Kyparisis. (2000). "Asymptotically optimal linear time algorithms for two-stage and three-stage flexible flow shops", *Naval Research Logistics*, 47(3), 259-268.
- Kurz, M.E. and R.G. Askin. (2003). "Comparing scheduling rules for flexible flow lines", *International Journal of Production Economics*, 85, 371-388.
- Kurz, M.E. and R.G. Askin. (2004). "Scheduling flexible flow lines with sequence-dependent setup times", *European Journal of Operational Research*, 159, 66-82.
- Kyparisis, G.J. and C. Koullamas. (2001). "A note on weighted completion time minimization in a flexible flow shop", *Operations Research Letters*, 29, 5-11.
- Kyparisis, G.J. and C. Koullamas. (2006a). "Flexible flow shop scheduling with uniform parallel machines", *European Journal of Operational Research*, 168, 985-997.
- Kyparisis, G.J., and C. Koullamas. (2006b). "A note on makespan minimization in two-stage flexible flowshops with uniform machines", *European Journal of Operational Research*, 175, 1321-1327.
- Lee, C. and G.L. Vairaktarakis. (1994). "Minimizing makespan in hybrid flowshops", *Operations Research Letters*, 16, 149-158.
- Lee, C. and G.L. Vairaktarakis. (1998). "Performance comparison of some classes of flexible flow shops and job shops", *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 10, 379-405.
- Li, S. (1997). "A hybrid two-stage flowshop with part family, batch production, major and minor setups", *European Journal of Operational Research*, 102, 142-156.
- Li, J. Q., & Pan, Q. K. (2015). Solving the large-scale hybrid flow shop scheduling problem with limited buffers by a hybrid artificial bee colony algorithm. *Information Sciences*, 316, 487-502.
- Liao, C. J., Tjandradjaja, E., & Chung, T. P. (2012). An approach using particle swarm optimization and bottleneck heuristic to solve hybrid flow shop scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 12(6), 1755-1764.
- Lin, H. and C. Liao, (2003). "A case study in a two-stage hybrid flow shop with setup time and dedicated machines", *International Journal of Production Economics*, 86, 133-143.
- Lin, J. T., & Chen, C. M. (2015). Simulation optimization approach for hybrid flow shop scheduling problem in semiconductor back-end manufacturing. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 51, 100-114.
- Linn, R. and W. Zhang, (1999). "Hybrid Flow Shop Scheduling: A Survey", *Computers & Industrial Engineering*, 37, 57-61.
- Liu, C. and S. Chang, (2000). "Scheduling flexible flow shops with sequence-dependent setup effects", *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 16(4), 408-419.
- Logendran, R., S. Carson and E. Hanson. (2005). "Group scheduling in flexible flow shops", *International Journal of Production Economics*, 96, 143-155.
- Logendran, R., P. deSzoek and F. Barnard. (2006). "Sequence-dependent group scheduling problems in flexible flow shops", *International Journal of Production Economics*, 102, 66-86.
- Luss, H. and M.B. Rosenwein. (1993). A due date assignment algorithm for multiproduct manufacturing facilities, *European Journal of Operational Research*, 65, 187-198.
- Marichelvam, M. K., Prabakaran, T., & Yang, X. S. (2014). A discrete firefly algorithm for the multi-objective hybrid flowshop scheduling problems. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 18(2), 301-305.
- Mirabi, M., Ghomi, S. F., & Jolai, F. (2013). A two-stage hybrid flowshop scheduling problem in machine breakdown condition. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(1), 193-199.
- Moursli, O. and Y. Pochet. (2000). "A branch-and-bound algorithm for the hybrid flowshop", *International Journal of Production Economics*, 64, 113-125.
- Naderi, B., Zandieh and M.A.H.A. Shirazi. (2009). "Modeling and scheduling a case of flexible flowshops: Total weighted tardiness minimization", *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1258-1267.

- Narasimhan, S.L. and S.S. Panwalkar. (1984). "Scheduling in a two-stage manufacturing process", *International Journal of Production Research*, 22(4), 555-564.
- Narasimhan, S.L. and P.M. Mangiameli. (1987). "A comparison of sequencing rules for a two-stage hybrid flow shop", *Decision Sciences*, 18(2), 250-265.
- Negenman, E.G. (2001). "Local search algorithms for the multiprocessor flow shop scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 128, 147-158.
- Neron, E., P. Baptiste and J.N.D. Gupta. (2001). "Solving hybrid flowshop problem using energetic reasoning and global operations", *Omega The International Journal of Management Science*, 29, 501-511.
- Niu, Q., T. Zhou, M. Fei and B. Wang. (2012). "An efficient quantum immune algorithm to minimize mean flow time for hybrid flow shop problems", *Mathematics & Computers in Simulation*, 84, 1-25.
- Oğuz, C. and M.F. Ercan. (1997). "Scheduling multiprocessor tasks in a two-stage flow-shop environment", *Computers & Industrial Engineering*, 33(1-2), 269-272.
- Oğuz, C. and M.F. Ercan. (2005). "A genetic algorithm for hybrid flow-shop scheduling with multiprocessor tasks", *Journal of Scheduling*, 8, 323-351.
- Pan, Q. K., Wang, L., Li, J. Q., & Duan, J. H. (2014). A novel discrete artificial bee colony algorithm for the hybrid flowshop scheduling problem with makespan minimisation. *Omega*, 45, 42-56.
- Paternina-Arboleda, C.D., J.R. Montoya-Torres, M.J. Acero-Dominguez and M.C. Herrera-Hernandez. (2008). "Scheduling jobs on k-stage flexible flow-shops", *Annals of Operations Research*, 164, 29-40.
- Pinedo, M.L. (2008). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems* (3rd Ed.). New York: Springer.
- Portmann, M., A. Vignier, D. Dardilhac and D. Dezalay. (1998). "Branch and bound crossed with GA to solve hybrid flowshops", *European Journal of Operational Research*, 107, 389-400.
- Quadt, D. and H. Kuhn. (2007a). "Batch scheduling of jobs with identical process times on flexible flow lines", *International Journal of Production Economics*, 105, 385-401.
- Quadt, D. and H. Kuhn. (2007b). "A taxonomy of flexible flow line scheduling", *European Journal of Operational Research*, 178, 686-698.
- Rabiee, M., Rad, R. S., Mazinani, M., & 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(5-8), 1229-1245.
- Rajendran, C. and D. Chaudhuri. (1992a). "A multi-stage parallel processor flowshop problem with minimum flowtime", *European Journal of Operational Research*, 57, 111-122.
- Rajendran, C. and D. Chaudhuri. (1992b). "Scheduling in n-job, m-stage flowshop with parallel processors to minimize makespan", *International Journal of Production Economics*, 27, 137-143.
- Randhawa, S.U., C. Jowono and S. Burhanuddin. (1994). "Scheduling in multistage flowshop systems: An application in the food processing industry", *Industrial Management & Data Systems*, 94(5), 16-24.
- Ribas, I., R. Leisten and J.M. Framinan. (2010). "Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective", *Computers & Operations Research*, 37, 1439-1454.
- Ruiz, R. and C. Maroto. (2006). "A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility", *European Journal of Operational Research*, 169, 781-800.
- Ruiz, R., F.S. Şerifoğlu and T. Urlings. (2008). "Modeling realistic hybrid flowshop scheduling problems", *Computers & Operations Research*, 35, 1151-1175.
- Ruiz, R. and J.A. Vazquez-Rodriguez. (2010). "The hybrid flow shop scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 205(1), 1-18.
- Salvador, M. S. (1973). A solution to a special case of flow shop scheduling problems. In *Symposium of the Theory of Scheduling and Applications* (pp. 83-91). Springer, New York.
- Santos, D.L., J.L. Hunsucker and D.E. Deal. (1995). "Global lower bounds for flow shops with multiple processors", *European Journal of Operational Research*, 80, 112-120.
- Santos, D.L., J.L. Hunsucker and D.E. Deal. (1996). "An evaluation of sequencing heuristics in flow shops with multiple processors", *Computers & Industrial Engineering*, 30(4), 681-692.
- Sawik, T. (1995). "Scheduling flexible flow lines with no in-process buffers", *International Journal of Production Research*, 33(5), 1357-1367.
- Sawik, T. (2000). "Mixed integer programming for scheduling flexible flow lines with limited intermediate buffers", *Mathematical & Computer Modelling*, 31, 39-52.
- Sawik, T. (2002). "An exact approach for batch scheduling in flexible flow lines with limited intermediate buffers", *Mathematical & Computer Modelling*, 36, 461-471.

- Shiau, D., S. Cheng and Y. Huang. (2008). "Proportionate flexible flow shop scheduling via a hybrid constructive genetic algorithm", *Expert Systems with Applications*, 34, 1133-1143.
- Soewandi, H. and S.E. Elmaghraby. (2001). "Sequencing three-stage flexible flowshops with identical machines to minimize makespan", *IIE Transactions*, 33, 985-993.
- Soewandi, H. And S.E. Elmaghraby. (2003). "Sequencing on two-stage hybrid flowshops with uniform machines to minimize makespan", *IIE Transactions*, 35, 467-477.
- Sriskandarajah, C. and S.P. Sethi. (1989). "Scheduling algorithms for flexible flowshops: Worst and average case performance", *European Journal of Operational Research*, 43, 143-160.
- Tadayon, B., & Salmasi, N. (2013). A two-criteria objective function flexible flowshop scheduling problem with machine eligibility constraint. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-15.
- Tang, D., Dai, M., Salido, M. A., & Giret, A. (2016). Energy-efficient dynamic scheduling for a flexible flow shop using an improved particle swarm optimization. *Computers in Industry*, 81, 82-95.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., N. Safaesi and F. Sassani. (2009). "A memetic algorithm for the flexible flow line scheduling problem with processor blocking", *Computers & Operations Research*, 36, 402-414.
- Tseng, C., C. Liao and T. Liao. (2008). "A note on two-stage hybrid flowshop scheduling with missing operations", *Computers & Industrial Engineering*, 54, 605-704.
- Tsubone, H., M. Ohba, H. Takamuki and Y. Miyake. (1993). "A production scheduling system for a hybrid flow shop – a case study", *Omega International Journal of Management Science*, 21(2), 205-214.
- Tyagi, N., Tripathi, R. P., & Chandramouli, A. B. (2016). Flexible flowshop scheduling model with four stages. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(42).
- Uetake, T., H. Tsubone and M. Ohba. (1995). "A production scheduling system in a hybrid flow shop", *International Journal of Production Economics*, 41, 395-398.
- Urlings, T., R. Ruiz and T. Stützle. (2010). "Shifting representation search for hybrid flexible flowline problems", *European Journal of Operational Research*, 207, 1086-1095.
- Verma, S. and M. Dessouky. (1999). "Multistage hybrid flowshop scheduling with identical jobs and uniform parallel machines", *Journal of Scheduling*, 2, 135-150.
- Vignier, A., J. Billaut, C. Proust and V. T'kindt. (1996). "Resolution of some 2-stage hybrid flowshop scheduling problems", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 4, 2934-2941.
- Vignier, A., D. Dardilhac, D. Dezalay and C. Proust. (1996). "A branch and bound approach to minimize the total completion time in a k-stage hybrid flowshop", *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 1, 215-220.
- Vignier, A., P. Commandeur and C. Proust. (1997). "New lower bound for the hybrid flowshop scheduling problem", *6th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 446-451.
- Wang, L. and D. Li. (2002). "A scheduling algorithm for flexible flowshop problem", *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Shanghai, China.
- Wang, H. (2005). "Flexible flowshop scheduling: optimum, heuristics and artificial intelligence solutions", *Expert Systems*, 22(2), 78-85.
- Wang, Z., W. Xing and F. Bai. (2005). "No-wait flexible flowshop with no-idle machines", *Operations Research Letters*, 33, 609-614.
- Wang, S. and M. Liu. (2013a). "A heuristic method for two-stage hybrid flow shop with dedicated machines", *Computers & Operations Research*, 40, 438-450.
- Wang, S. and M. Liu. (2013b). "A genetic algorithm for tow-stage no-wait hybrid flow shop scheduling problem", *Computers & Operations Research*, 40, 1064-1075.
- Wittrock, R.J. (1985). "Scheduling algorithms for flexible flow lines", *IBM Journal of Research & Development*, 29(4), 401-412.
- Wittrock, R.J. (1988). "An adaptable scheduling algorithm for flexible flow lines", *Operations Research*, 36(3), 445-453.
- Xie, J. and X. Wang. (2005). "Complexity and algorithms for two-stage flexible flowshop scheduling with availability constraints", *Computers & Mathematics with Applications*, 50, 1629-1638.
- Yang, Y. (1998). *Optimization and Heuristic Algorithms for flexible Flow Shop Scheduling*, Thesis of PhD in the Graduate School of Arts and Science, Columbia University. Columbia.
- Yang, Y., S. Kreipl and M. Pinedo. (2000). "Heuristics for minimizing total weighted tardiness in flexible flow shops", *Journal of Scheduling*, 3, 89-108.
- Yang, J. (2011). "Minimizing total completion time in two-stage hybrid flow shop with dedicated machines", *Computers & Operations Research*, 38, 1045-1053.

- Yu, L., A. Ohsato, T. Kawakami and T. Sekiguchi. (1999). "COBRA-based design and development of distributed scheduling systems: An application to flexible flowshop scheduling systems", *IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics*, Niigata.
- Zandieh, M., S.M.T. Fatemi Ghomi and S.M. Moattar Husseini. (2006). "An immune algorithm approach to hybrid flow shop scheduling with sequence-dependent setup times", *Applied Mathematics & Computation*, 180, 111-127.
- Zandieh, M. and M. Gholami. (2009). "An immune algorithm for scheduling a hybrid flow shop with sequence-dependent setup times and machines with random breakdowns", *International Journal of Production Research*, 47(24), 6999-7027.
- Zandieh, M., & Hashemi, A. R. (2015). Group scheduling in hybrid flexible flowshop with sequence-dependent setup times and random breakdowns via integrating genetic algorithm and simulation. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 21(3), 377-394.
- Zhang, B., Pan, Q. K., Gao, L., Zhang, X. L., Sang, H. Y., & Li, J. Q. (2017). An effective modified migrating birds optimization for hybrid flowshop scheduling problem with lot streaming. *Applied Soft Computing*, 52, 14-27.