



HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/humder>

Çok Amaçlı Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Çözümünde Meta Sezgisel Yöntemlerin Kullanımı

Use of Meta-Heuristic Methods to Solve the Multi-Objective Flexible Job Shop Scheduling Problems

Yazar(lar) (Author(s)): Serkan KAYA, Nilgün FİĞLALİ

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kaya S., Fığlalı N., “Çok Amaçlı Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Çözümünde Meta Sezgisel Yöntemlerin Kullanımı”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3): 222-233, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/humder/archive>

Çok Amaçlı Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Çözümünde Meta Sezgisel Yöntemlerin Kullanımı

Serkan Kaya¹, Nilgün Fiğlalı²

¹Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

e-posta: serkankaya@harran.edu.tr

²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.

e-posta: figlalin@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi: 11.12.2018

Kabul Tarihi: 28.12.2018

Özet

Esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri işlerin makinelere atanması ve sıralanması alt problemlerinden oluşmaktadır. Bu tür problemlerin çözümü için literatürde hiyerarşik ve bütünlük olmak üzere iki tür çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Hiyerarşik çözüm yaklaşımında işlerin atama ve sıralama alt problemleri birbirinden bağımsız gerçekleştirilirken, bütünlük yaklaşımında bu iki alt problem eş zamanlı çözülmektedir. Çok amaçlı Esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri üzerine literatürde sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu tür problemleri yüksek hesaplama karmaşasından dolayı geleneksel optimizasyon yöntemleriyle çözmek, optimal sonuçlarını elde etmek oldukça zordur. Bu tür problemlerin çözümünde sıklıkla meta sezgisel yöntemlere başvurulmaktadır. Bu çalışmada çizelgeleme alanının en zor problem sınıfından olan esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin meta sezgisel yöntemler ile çözümüne yönelik önerilerde bulunulmuştur. Meta sezgisel yöntemlere en kısa işlem zamanı gibi basit sıralama kuralları ve yerel arama algoritmalarının melezlenmesi uygulamalı olarak verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Esnek Atölye tipi çizelgeleme, Meta Sezgisel Yöntemler, Yerel Arama, Çok Amaçlı Optimizasyon

Use of Meta-Heuristic Methods to Solve the Multi-Objective Flexible Job Shop Scheduling Problems

Abstract

Flexible job shop scheduling problems consist of two sub-problems which are the assignment of operations to suitable machines and the sequencing of the operations on the machines. In order to solve such problems, two kinds of solution approaches, hierarchical and integrated, have been developed in the literature. In the hierarchical solution approach, the subproblems of the assignment and sequencing are performed independently of each other, while in the integrated approach, these two subproblems are resolved simultaneously. There are a limited number of studies on multi-objective flexible job shop scheduling problems in the literature. It is very difficult to solve such problems with traditional optimization methods due to the complexity of high computation and to obtain optimal results. Meta-heuristics methods are often used to solve such problems. In this study, proposals have been made to solve flexible job shop scheduling problems which are the most difficult problem class of scheduling domain through meta-heuristic methods. The hybridization of a meta-heuristic method of simple dispatching rules such as the shortest processing time and local search algorithms is given with application.

Keywords: Flexible Job Shop Scheduling, Meta Heuristic Methods, Local Search, Multi Objective Optimization

1. Giriş

İşletmelerin üretim ortamları, üretilen ürünün özellikleri, makine yerleşimleri, işletmede uygulanan üretim tiplerine v.b. nedenlere bağlı olarak farklılıklar gösterir. Bundan dolayı farklı üretim ortamlarına bağlı olarak farklı çizelgeleme problemleri ortaya çıkar. Çizelgeleme problemleri içerisinde basit yapısından dolayı tek makine problemleri ilk ele alınan problem türü olmuştur. Atölye tipi üretim ortamında her işin kendine ait rotası bulunmaktadır. Paralel makineli çizelgeleme problemlerinde, gelen

işler makinelerden herhangi birinde işlem görebilmektedir. Atölye tipi üretim ortamına paralel makinelerin eklenmesiyle esnek atölye tipi çizelgeleme (EATÇ) problemleri ortaya çıkar. Bu ortamların her birinde benzer makinelerin olduğu iş istasyonları yer almakta ve her işin kendi rotası bulunmaktadır. Atölye tipi çizelgeleme (ATÇ) problemlerinde, n iş sayısı, m makine sayısı olmak üzere $(n!)^m$ sayıda mümkün çözüm vardır[1]. Örneğin atölye tipi üretim ortamında 3 iş ve 3 makineden oluşan bir çizelgeleme problemi için $(3!)^3=216$ adet

mümkün çizelge sayısı vardır. Aynı üretim ortamı için 5 iş 3 makineden oluşan bir çizelgeleme probleminde olası çizelge sayısı $(5!)^3 = 1.728.000$ adet olur. EATÇ Problemi, klasik ATÇ probleminin bütün zorluklarını ve karmaşıklığını barındırmanın yanı sıra işlerin makinelere atanması sorunu da söz konusu olduğundan çok daha karmaşık bir problem halini alır. Gerçek yaşam çizelgeleme problemlerinde ise iş ve makine sayıları arttıkça çizelgeleme problemleri daha zor bir hal almaktadır. İş sayısındaki bir birimlik artış bile olası çizelge sayısında oldukça fazla bir artışa neden olmaktadır. Çizelgeleme problemleri kombinatoriyal eniyileme problemleri sınıfından olduğu için en iyi çözümlerini bulmak oldukça zordur. Genellikle küçük boyutlu ve tek ölçütlü problemler için en iyi çözümler bulunabilir [2].

Çoğu mühendislik problemlerinin çözümünde meta sezgisel yöntemlerin kullanımı son yıllarda önemli bir oranda artmıştır. Matematiksel modelinin çıkarılamadığı, model kurmanın çok maliyetli olduğu optimizasyon problemlerine, meta sezgisel yöntemlerin kolaylıkla uygulanabilir olması, iyi bir hesaplama gücünün olması, bu yöntemlerin uygulamasının kolay olması, tatmin edici sonuçlar alınabilmesi ve bir problem için geliştirilen meta sezgiselin başka bir probleme de uygulanabilir olması gibi nedenlerden dolayı problem çözümünde tercih edilme sebepleri olmuştur.

Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında diğer çizelgeleme problemlerine göre EATÇ üzerine yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Bu problemler üzerine yapılan çalışmalar genellikle tek amaçlı olarak çözülmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada çok amaçlı EATÇ problemlerinin meta sezgisel yöntemler ile çözümüne ilişkin önerilerde bulunulmuştur. Gerçek üretim sistemlerinde geniş bir uygulama alanına sahip EATÇ problemleri yine pratik hayatta uygulanabilirliği olduğu için çok amaçlı olarak ele alınmıştır. Çalışmanın başında konu üzerine yapılmış literatür taramasına yer verilmiştir. Problemin matematiksel modeli sunulduktan sonra, meta sezgisel yöntemler ile çözüme ilişkin önerilerde bulunulmuştur. Bu tür problemlerin meta sezgisel yöntemlere uyarlanması parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması üzerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçların daha da geliştirilebilmesi için basit sıralama kuralları ve yerel arama (YA) algoritmasının meta sezgisel yöntemlere melezlenmesi aynı şekilde PSO algoritması üzerinde

uygulamalı olarak gösterilmiştir. Çalışmanın son kısmında sonuçlar verilmiştir.

2. Literatür Taraması

EATÇ Problemlerinin meta sezgisel yöntemler ile çözümünde Gao ve diğ. [3] melez genetik algoritma sunmuşlardır. Yazarlar, her bir çözüm için 2 vektör tanımlamışlardır. Genetik algoritmada bireyler arasındaki arama yeteneğini geliştirmek için 2 adet YA prosedürü tanımlamışlardır. Chiang ve Lin [4] sadece 2 parametreye ihtiyaç duyan, popülasyon çeşitliliğine sahip evrimsel bir algoritma geliştirmişlerdir. Li ve diğ. [5] başlangıç popülasyonuna YA prosedürünü adapte ettikleri sıçrayan kurbaga algoritması Li ve Pan [6] bakım kısıtı altında çok amaçlı EATÇ problemlerinin çözümü için etkin kimyasal reaksiyon algoritması sunmuşlardır. Her bir kimyasal molekülün bir çözümü temsil ettiği algoritmada 4 temel reaksiyon çaprazlama fonksiyonu tanımlamışlar ve algoritmalarına YA algoritmasını adapte etmişlerdir. Wang ve diğ. [7] çeşitli komşuluk yapılarını tanımladıkları pareto tabanlı yapay arı kolonileri algoritması, Li ve diğ. [8] etkin çaprazlama operatörü ekledikleri yapay arı kolonileri algoritması geliştirmişlerdir. Bagheri ve diğ. [9] yeni bireyler oluşturmak için çeşitli mutasyon operatörü tanımladıkları yapay bağışıklık tabanlı bütünleşik bir algoritma sunmuşlardır. Li ve diğ. [10] etkin komşuluk yapısına sahip tabu aramaları algoritması geliştirmişlerdir. Rajkumar ve diğ. [11] bakım kısıtı altında çok amaçlı EATÇ problemlerinin çözümü için açgözlü rastsal uyarlamalı arama algoritması, Wang ve Yu [12] ise sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir. Zhang ve diğ. [13] PSO ve tavlama benzetimi algoritmalarını melezlemişler, Xing ve diğ. [14] çift katmanlı karınca kolonileri algoritması sunmuşlardır. Ho ve Tay [15] yakınsama sürecini hızlandıran güdümlü YA algoritmasını evrimsel algoritma ile birleştirerek melez bir yaklaşım sunmuşlardır. Jia ve diğ. [16] global arama yapabilme kabiliyetine sahip PSO algoritmasına YA algoritmasını adapte etmişlerdir. Xia ve Wu [17] aynı problem setlerinin çözümü için PSO ve tavlama benzetimi algoritmalarını melezleyerek yeni bir algoritma sunmuşlardır. Amiri ve diğ. [18] sıralı komşuların yerini değiştirmek suretiyle daha iyi sonuçlara ulaşmayı hedefleyen algoritma sunmuşlardır. Yazarlar çalışmalarında iki tür komşuluk yapısını ele alan yöntem geliştirmişlerdir. Kaplanoğlu [19]

nesneye yönelik tavlama benzetimi algoritması sunmuştur. Literatürdeki çözüm yaklaşımları genellikle 2 dizeli kodlama ile gerçekleştirilmiştir. Ancak yazarın çalışması tek dizeli kodlama ile etkin sonuçlar almayı sağlamıştır. Buraya kadar sunulan çalışmalarda yazarlar amaç fonksiyonu olarak maksimum tamamlanma zamanı (C_{max}), toplam makine iş yükü (W_t) ve maksimum iş yükü (W_m) olmak üzere 3 amaçlı olarak ele almışlardır.

EATÇ Problemlerinin meta sezgisel yöntemler ile çözümünde Tamaki ve diğ. [20] tam sayılı doğrusal programlama geliştirmişler aynı zamanda büyük boyutlu EATÇ problemlerinin çözümü için genetik algoritma sunmuşlardır. Yazarlar performans ölçütü olarak, C_{max} ve toplam gecikme süresini minimize etmeyi amaçlamışlardır. Vilcot ve Billaut [21] C_{max} ve maksimum gecikmenin minimize edilmesi amaçlı EATÇ problemleri için genetik algoritma ve tabu aramalarının melezlenmesiyle yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Fattahi ve Fallahi [22] dinamik EATÇ probleminin çözümü için genetik algoritmaya 4 kural melezleyerek yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak C_{max} ve toplam sapma cezası ile başlama zamanlarındaki sapmanın en küçüklenmesi olarak ele almışlardır. Gholami ve Zandieh [23] aynı şekilde dinamik EATÇ problemlerinin çözümü için tavlama benzetimi ve genetik algoritmayı melezleyerek yöntem geliştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak, C_{max} ve ortalama gecikmenin minimize edilmesi olarak ele almışlardır. Sundukları algoritmayı çeşitli problem setleriyle test etmişler ve makinelerin ortalama tamir süresinin ve makine arıza seviyelerinin çizelgeleme verimi üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Sreekara Reddy ve diğ. [24] bozulma kısıtı altında EATÇ problemlerinin çözümü için çok amaçlı model sunmuşlardır. Amaç fonksiyonu olarak C_{max} ve W_t olmak üzere iki amaçlı ele almışlardır. Yazarlar öncelikle makine bozulma kısıtını dikkate almadan problemin çözümü için karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli sunmuşlardır. İkinci olarak yazarlar makine bozulma kısıtını göz önünde bulundurarak problemi çözmüşlerdir. Daha sonra öğrenme tabanlı evrimsel bir optimizasyon algoritması sunmuşlardır. Karaçizmeli ve Oğulata [25], esnek atölye tipi üretim ortamlarında enerji verimliliğini artırmak için çizelge maliyetini minimize edecek bir karışık tam sayılı doğrusal

programlama modeli sunmuşlardır. Yazarlar, hem makinelerdeki boş bekleme sürelerini azaltmışlar hem de makinelerde operasyondan operasyona geçerken gerçekleşen ısıtma-soğutma durumlarını optimize etmişlerdir.

3. Problem Tanımı

Klasik ATÇ problemlerinde her bir operasyonun işlem göreceği makine tektir. EATÇ Problemleri, ATÇ problemlerinin genel bir halidir. EATÇ Problemlerinde her bir operasyon belirlenmiş bir makine grubu içerisinde yer alan makinelerden herhangi birinde işlem görebilir. Yani her operasyon için alternatif makine seçimi vardır. Genel olarak EATÇ Problemleri; toplam ve kısmi esnekliğe sahip olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Toplam esneklikte her bir operasyon tüm makineler üzerinde işleme tabi tutulabilirler. Kısmi esneklik durumunda ise işlerin bir kısmı sadece bir grup makine üzerinde işleme tabi tutulabilirler. Kacem ve diğ. [26-28], aynı makine ve operasyon sayısı için kısmi EATÇ problemlerinin çözümünün toplam EATÇ problemleri çözümüne göre daha zor olduğunu belirtmişlerdir.

EATÇ Problemi, operasyonların aday makinelerden herhangi birisine atanması ve bu makine grubunda işlerin sıralanması alt problemlerinden oluşmaktadır. Probleme ait matematiksel model aşağıda sunulmuştur.

EATÇ Probleminde varsayımlar ve başlangıç koşulları aşağıdaki gibidir:

- Problemden her bir iş için proses alternatifler söz konusudur.
- Her bir prosesdeki operasyonlar ve bunların sıraları belirlidir.
- Her bir iş farklı operasyonlardan oluşabilir.
- Her bir operasyon için en az bir tane olmak üzere birden fazla makine alternatifi vardır.
- Her bir operasyonun bütün makine alternatiflerindeki işlem süreleri farklıdır ve önceden belirlidir.
- İşlere ait operasyonlar tüm makine grubunda işlenebiliyorsa tam esneklik, aksi halde kısmi esneklik söz konusudur.
- Bir operasyonun bir makine üzerinde işlenemeyeceği durumda, o makine için ilgili

operasyonun işlem zamanı çok büyük bir değer atanır.

Parametreler:

n : Toplam iş sayısı

m : Toplam makine sayısı

i : İşlerin indisi $i = 1, 2, \dots, n$;

j : Makine indisi, $j = 1, 2, \dots, m$;

k : Operasyonların indisi $k = 1, 2, \dots, k_i$

h : Öncelik indisi $h = 1, 2, \dots, h_i$

J_i : i . İş

k_i : J_i işine ait toplam operasyonların sayısı

O_{ik} : i işinin k . operasyonu

M_j : j . Makine

P_{ijk} : O_{ik} Operasyonunun j . makine üzerindeki işlem süresi

t_{ik} : O_{ik} Operasyonunun başlama zamanı

T_{mjh} : h . Önceliğe sahip j . makinenin başlama zamanı

U : m Boyutundaki makine seti

U_{ik} : O_{ik} Operasyonu için kullanılabilir makine seti

Ps_{ik} : O_{ik} Operasyonun makine seçildikten sonraki işlem süresi

C_{ik} : O_{ik} Operasyonunun tamamlanma zamanı

C_{max} : En son biten operasyonunun tamamlanma zamanı

W_j : M_j Makinesinin iş yükü (toplam işlem süresi)

W_t : M_m Makine setinin toplam iş yükü (toplam işlem süresi)

a_{ijk} : O_{ik} Operasyonunu işleyebilen U_{ijk} makine seti

Karar Değişkenleri:

$$a_{ijk} = \begin{cases} 1 & O_{ik} \text{ işi için } j \text{ makinesi seçilecekse} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

$$y_{jik} = \begin{cases} 1 & O_{ik} \text{ operasyonu için } j \text{ makinesi seçilecekse} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

$$x_{jikl} = \begin{cases} 1 & O_{ik} \text{ operasyonun } l \text{ sırada işlenmesi için } j \text{ makinesi seçilecekse} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

EATÇ Problemi modeli aşağıdaki gibidir:

Amaç Fonksiyonları:

$$\min C_{max} = \max_i \max_k \{C_{ik}\} \quad (1)$$

$$\min W_M = \max_j \{W_j\} \quad (2)$$

$$\min W_T = \sum_{j=1}^m W_j \quad (3)$$

Kısıtlar:

$$\sum_j y_{jik} \cdot P_{jik} = Ps_{ik} \quad i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, k_j \quad (4)$$

$$t_{ik} + Ps_{ik} \leq t_{i,k+1} \quad i=1, 2, \dots, n; h=1, 2, \dots, h_{i-1} \quad (5)$$

$$T_{mj,h} + Ps_{ik} \cdot x_{jikh} \leq T_{mj,h+1} \quad (6)$$

$$T_{mj,h} \leq t_{i,k} + (1 - x_{j,i,k,h}) \cdot L \quad (7)$$

$$T_{mj,h} + (1 - x_{j,i,k,h}) \cdot L \quad (8)$$

$$Y_{j,i,k} \leq a_{j,i,k} \quad (9)$$

$$\sum_k \sum_j x_{j,i,k,h} = 1 \quad (10)$$

$$\sum_j y_{j,i,k} = 1 \quad (11)$$

$$\sum_h x_{j,i,k,h} = y_{j,i,k} \quad (12)$$

$$t_{i,k} \geq 0 \quad (13)$$

$$Ps_{i,k} \geq 0 \quad (14)$$

$$T_{mj,h} \geq 0 \quad (15)$$

$$x_{j,i,k,h} \in \{0, 1\} \quad (16)$$

$$y_{j,i,k} \in \{0, 1\} \quad (17)$$

Amaç fonksiyonu olarak; Kısıt (1) C_{max} , son işin sistemi terk ettiği süreyi, kısıt (2) W_m , en yüklü durumdaki makinenin iş yükünü vermektedir. Kısıt (3) ise W_t bütün makinelerdeki toplam iş yükünü hesaplar. Kısıt (2) ve (3) göz önüne alındığında amaç, tüm makinelerin iş yükünü dengelemektir.

Eşitlik (4), O_{ik} operasyonunun işlenmek üzere seçilen k makinesindeki işlem süresini belirleyen kısıttır. Eşitlik (5) her işe ait operasyonlar arasındaki öncelik kısıtıdır. Eşitlik (6) her makineye aynı anda sadece bir operasyon atanacağını belirleyen kısıttır. Eşitlik (7), O_{ik} operasyonunun atandığı k makinesi boşa çıktığında işleme tabi tutulacağını belirler. Eşitlik (8), O_{ik} operasyonunun kendinden önce gelen aynı işe ait operasyonun $O_{i,k-1}$ tamamlandıktan sonra işleme tabi tutulacağını belirler. Eşitlik (9) operasyonun işlenebilecek makineler tarafından işlenmesini sağlarken, Eşitlik (10) operasyonun makineye atanmasını ve işlerin makine üzerindeki sırasını belirlemektedir. Eşitlik (11) operasyonun bir makinede işleneceğini sınırlayan kısıttır. Eşitlik (12) her işe ait operasyonların öncelik kısıtın da işlenmesini sağlar. Eşitlik (13), (14) ve (15) değişkenlerin sıfırdan büyük eşit olmasını sağlar. Eşitlik (16) ve (17), operasyonların makine atama ve sıralamasını belirleyen değişkenlerini 0 veya 1 olmaya zorlayan kısıtlardır.

4. Çok Amaçlı Optimizasyon

Performans kriterinde birden fazla amacın sistematik ve eş zamanlı olarak optimize edilmesi çok amaçlı optimizasyon olarak adlandırılır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan klasik yöntemlerden bir tanesi, performans kriterinde amaçların birleştirilmesidir. Farklı amaçlar, bir değerde birleştirilerek çok amaçlı problem, tek amaçlı problem haline getirilerek çözüm yapılır. Tek performans altında toplamak için en çok kullanılan yöntem ise, her bir amacın ağırlıklandırılarak tek amaç fonksiyonu haline getirilmesidir. Çok amaçlı problemlerin çözümünde kullanılan ikinci yöntem olarak, amaçların her seferinde değiştirilerek çözümler elde edilmesidir. Her çözümde amaç fonksiyonu değiştirilerek, kalan diğer amaçların kısıt haline getirilmesi ile tek amaçlı problem gibi çözümlenir. Amaçlar arasındaki tercih sırasının doğru belirlenmesi, çözüm sürecini etkileyeceğinden dolayı önemlidir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde kullanılan üçüncü yöntem ise pareto optimal yöntemidir. Burada, tüm amaçları içeren bir vektör ve çözümler arasında tercih yapmayı sağlayan baskınlık kavramı ortaya çıkmaktadır [29].

Örneğin; U ve V iki amaçlı minimizasyon probleminin iki farklı çözüm vektörü olmak üzere:

- Eğer $V_i < U_i$, $i=1,2,\dots,j$ ise V vektörü U vektörüne baskındır.
- Eğer $V_i \leq U_i$, $i=1,2,\dots,j$ ve en az bir i için $V_i < U_i$ ise V vektörü U vektörüne baskındır.
- Eğer $V_i > U_i$, $i=1,2,\dots,j$ ise V vektörü U vektörüne göre basılgındır.
- Eğer V_i vektörü U_i vektörüne baskın değil ve/veya U_i vektörü V_i vektörüne baskın değilse U_i ve V_i vektörleri karşılaştırılmaz.

Pareto optimal cephe, çok amaçlı çözüm uzayında bulunan, diğer çözümler tarafından baskılanmamış yani baskın çözümleri kapsar. Pareto optimizasyon, pareto optimal cephenin ve buna en yakın komşuların bulunmasını amaçlar. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde pareto optimizasyonun kullanılmasının sebebi; problemlerin, sadece bir tek global optimuma sahip olmaması ve amaçlarla ilgili tercihlere arama prosesinden önce karar verilememesidir. Pareto optimizasyonda amaçlara ilişkin tercihler değişse bile, karar mekanizmasının elinde birden fazla alternatif olması seçimi kolaylaştırmaktadır. Çok

amaçlı optimizasyonda göz önüne alınması gereken bir diğer durum ise bir problemde birbirleri ile çelişen amaçların yer almasıdır. Ancak çelişen amaçlara rağmen, pareto'ya dayalı modern sezgisel yöntemler, bütün kriterler için ideal çözümler bulabilmektedirler [30].

5. Meta Sezgisel Yöntemler ile Çözüm Yaklaşımları

Meta sezgisel yöntemler zor ve karmaşık optimizasyon problemlerde kaliteli çözümlere ulaşabilmek için sezgisel yaklaşımları kullanan tasarımlar olarak da adlandırılabilir [31]. Çözüm uzayının büyüklüğü ya da optimizasyon modelindeki değişken ve kısıt sayılarının fazlalığı nedeniyle kesin sonuç alınan yöntemlerin kullanılmadığı durumlarda, uygulamaya elverişli olmayan problemlerin çözümünde, meta sezgisellerin kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Kesin sonuçların alındığı yöntemlerden farklı olarak meta sezgiseller, optimum yerine optimuma yakın çözümler elde edilmesini sağlar [32]. Meta sezgisel yöntemlerin klasik sezgisel yöntemlere göre en büyük avantajı, meta sezgisel yöntemlerin temel adımlarının genel olarak tanımlanmış olması, probleme özgü tasarlanmamış olmaları ve her türlü optimizasyon problemlerine uygulanabilir olmalarıdır. Ancak meta sezgisel yöntemlerin sezgisel yöntemler gibi en iyi sonucu garanti etmemeleri meta sezgisel yöntemlerin en önemli dezavantajıdır.

5.1. Çok Amaçlı Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri Çözüm Yaklaşımları

EATÇ Problemleri işlerin en iyi sırada işlenmesinin belirlenmesinin yanı sıra hangi işin hangi makinede işleneceğinin belirlenmesi alt problemlerini içermektedir. Literatürde bu iki alt problemin çözülmesine ilişkin, bütünleşik ve hiyerarşik olmak üzere iki tür çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Pezzella ve diğ. [33] bütünleşik yaklaşımın diğer yaklaşıma göre daha zor olmasına rağmen, daha iyi sonuçlara ulaşabildiğini belirtmişlerdir.

Hiyerarşik yaklaşımda işlerin makinelere atanması ve işlenme sıralarının belirlenmesi ayrı ayrı gerçekleştirilmektedir. İşlerin sıralanması ayrı gerçekleştirilmekte, sonra sıralanan işlere makine atamaları yapılmakta daha sonra da bu iki alt problem birleştirilmektedir. Makine atamaları ve işlem sıralamasında birbirine müdahale

olmamaktadır. Bu yaklaşımı ilk defa Brandimarte [34] sonra da Zribi ve diğ. [35] çalışmalarında kullanmışlardır. Bu yaklaşımın ana fikri, EATÇ problemlerinde iş sıralaması ve makine atamaları alt problemlerinin birbirinden ayrıştırılarak, problemin karmaşıklığının daha da azaltılabileceğidir.

Bütünleşik yaklaşımda işlerin sıralanması ve makine atamaları birbirinden bağımsız değildir ve eş zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir. Çözüm sürecinde öncelikle işlerin sıralanması gerçekleştirilmekte, hemen ardından bu işleri işleyecek makineler belirlenmektedir. İşlerin sıralaması yapılırken bu işleri işleyecek makinelerde bellidir.

EATÇ Problemlerinin çözümünde meta sezgisel yöntemlerin kullanımı PSO yöntemi ile detaylandırılacaktır. PSO diğer evrimsel ve matematiksel temelli algoritmalara göre, fazla hafıza gerektirmeyen, etkili hesaplama kabiliyetine sahip, uygulaması kolay ve hızlı yakınsama özelliklerine sahip bir algoritmadır.

PSO algoritması rastgele çözümler içeren bir popülasyonla başlatılmakta ve bu çözümler güncellenerek optimum çözüm araştırılmaktadır. Parçacık olarak adlandırılan aday çözümler, kuşların yiyecek ararken yiyeceğe en yakın kuşu takip etmeleri gibi, o andaki optimum parçacığı izleyerek problem uzayında dolaşmaktadırlar. Parçacık hareket ettiğinde, kendi koordinatlarını bir fonksiyona göndermekte, böylece parçacığın uygunluk değeri yani yiyeceğe ne kadar uzaklıkta olduğu ölçülmektedir. Bir parçacığa ait hız ve yön bilgisinin her seferinde nasıl değişeceği, kendi koordinatları ile komşu parçacıkların en iyi koordinatlarının birleşimi ile belirlenmektedir. Parçacıkların kendi tecrübelerine ve komşu parçacıkların tecrübelerine göre hareket etmeleriyle parçacıklar arasında bilgi paylaşımı sağlanmaktadır.

PSO Algoritması çözüm adımları 3 iş 4 makine ve toplam 8 operasyondan oluşan tam esnekliğe sahip problem üzerinde ayrıntılı verilmiştir. Problem verileri rastsal oluşturulmuştur. Probleme ait işlem süreleri Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Örnek problem işlem süreleri.

		M1	M2	M3	M4
J ₁	O ₁₁	4	7	3	2
	O ₁₂	3	1	3	5
	O ₁₃	4	5	6	7

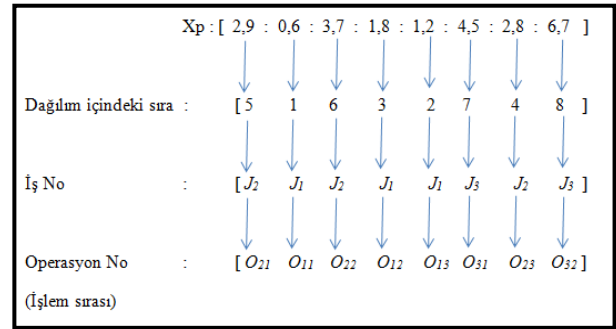
J ₂	O ₂₁	1	3	4	6
	O ₂₂	4	5	3	2
	O ₂₃	6	2	1	3
J ₃	O ₃₁	8	3	4	5
	O ₃₂	4	3	6	2

Pozisyon Vektörü:

k . İterasyondaki i . parçacığın pozisyon vektörü X_i^k ile temsil edilir ve problem boyutu kadar eleman içerir. Denklem (18)' de verildiği gibi gösterilir.

$$X_i^k = [x_{i1}^k, x_{i2}^k, x_{i3}^k, \dots, x_{ij}^k] \quad (i=1,2,\dots,p) \quad (18)$$

Burada, x_{i1}^k , k . iterasyonda i . parçacığın pozisyon vektöründeki birinci elemanını, p , parçacık sayısını ifade eder. Burada problem boyutu n adet iş ve m adet makineden oluşan problem için, $j=n \times m$ kadardır. EATÇ Problemleri operasyonların hem makine üzerinde sıralanması hem de işlenmek üzere makinelere atanması alt problemlerinden oluştuğu için problemin çözümünde, pozisyon vektörü olarak her parçacık için 2 tane vektör oluşturulmaktadır. Bunlardan birincisi, X_p^k vektörü işlerin sıralama vektörüdür. X_p vektörü oluşturulurken D , operasyon sayısını temsil etmek üzere $[-D,D]$ aralığında rastsal üretilmektedir.



Şekil 1. X_p vektör temsili.

Başlangıç popülasyonunda 1. parçacık için X_p vektörünü Şekil 1.'deki gibi rastsal oluşturulmuştur. Bu vektörün operasyon temsilleri için, X_p vektöründeki rakamlar küçükten büyüğe doğru sıralanır. Dağılım içindeki sıra satırı, rakamların küçükten büyüğe doğru sıralanışını göstermektedir. Vektörde en küçük rastsal değer 0,6 olduğu için 1. sırayı, 1,2 değeri 2. sırayı alır. Örnek problemde J_1 işinin 3 operasyonu olduğu için X_p vektöründeki ilk üç rakam J_1 işi olarak atanır. İş no satırı, işlerin sıralanmasını göstermektedir. Her bir işe ait operasyonlar arasında işlem öncelik kısıtı olduğundan dolayı X_p vektörünün

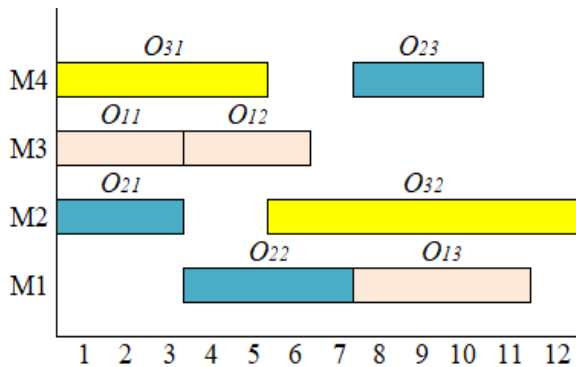
J_1 işine ait ilk üç rakamı 1. operasyondan başlanarak atanır. Operasyon no satırı da operasyonların sıralanmış halini göstermektedir. Bu durumda X_p vektörüne ait işlem sırası $X_p = \{O_{21}, O_{11}, O_{22}, O_{12}, O_{13}, O_{31}, O_{23}, O_{32}\}$ şeklinde olur.

EATÇ Problemlerinin PSO ile çözümü gerçekleştirilirken oluşturulan 2. pozisyon vektörü ise, X_m^k makine atama vektörüdür. X_m vektörü oluşturulurken M makine sayısını temsil etmek üzere $[0, M]$ aralığında oluşturulur. X_p Vektörü ile işlem sıraları tespit edilmişti. Şekil 2.'de verilen X_m vektörünü X_p vektöründe olduğu gibi rastsal oluşturulmuş. Bu durumda 2. işin 1. operasyonu 2 nolu makineye, 1. işin 1. operasyonu 3 nolu makineye şeklinde makine atamaları gerçekleştirilir.

İşlem Sırası	:	$[O_{21}$	O_{11}	O_{22}	O_{12}	O_{13}	O_{31}	O_{23}	$O_{32}]$
		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
X_m vektörü	:	$[2$	3	1	3	1	4	4	$2]$
		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Atandığı Makine	:	$[M_2$	M_3	M_1	M_3	M_1	M_4	M_4	$M_2]$

Şekil 2. X_m vektör temsili.

İşlem sıra ve makine atamaları yapılmış başlangıç popülasyonu 1. parçacığına ait çözüm $X_1^1 = \{O_{212}, O_{113}, O_{221}, O_{123}, O_{131}, O_{314}, O_{234}, O_{322}\}$ şeklinde olur. 1. Parçacık Gantt şeması Şekil 3.'teki gibi gerçekleşir. Amaç fonksiyonu olarak $C_{max}=12$, $W_t=32$ ve $W_m=10$ olarak elde edilir.

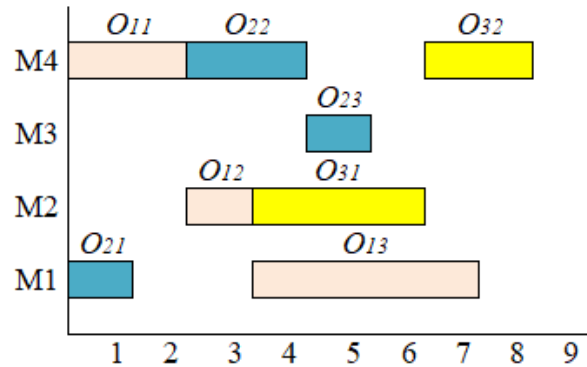


Şekil 3. Başlangıç popülasyonu 1. parçacık Gantt şeması.

Çizelgeleme problemlerinde sıralama yapılırken göz önünde bulundurulmuş basit kurallar öncelik kuralları olarak adlandırılırlar. Bu kurallara göre işlerin makinede sıralanması yapılır. Öncelik kuralları çizelgeleme problemlerine kolaylıkla

uygulanabilmeleri ve uzun hesaplama süresi gerektirmediğinden dolayı tercih edilirler. Küçük boyutlu problemler için tatmin edici sonuçlar vermelerine rağmen, problem boyutu büyüdükçe bu kurallar iyi sonuç vermezler. Bu kuralların avantajı olarak, anlaşılması ve uygulanmasının kolay olması söylenebilir. Dezavantajı olarak, en iyi çözümü garanti etmedikleri söylenebilir. Farklı çizelgeleme amaçları için farklı kurallar geliştirilmiştir.

PSO ile çözüm gerçekleştirilirken başlangıç popülasyonunda X_p ve X_m vektörlerinin basit sıralama kuralları göz önünde bulundurularak oluşturulması algoritmanın ilerleyen iterasyonlarında daha etkin sonuçlara ulaşmasını sağlamaktadır. Problem üzerinde başlangıç popülasyonuna ait 2. parçacık en kısa işlem zamanı kuralına göre oluşturulduğunda $X_p = \{O_{21}, O_{11}, O_{12}, O_{22}, O_{23}, O_{31}, O_{32}, O_{13}\}$ ve $X_m = \{M_1, M_4, M_2, M_4, M_3, M_2, M_4, M_1\}$ şeklinde olur. Bu durumda en kısa işlem zamanı kuralına göre işlem sıra ve makine atamaları yapılmış başlangıç popülasyonu 2. parçacığına ait çözüm $X_2^1 = \{O_{211}, O_{114}, O_{122}, O_{224}, O_{233}, O_{312}, O_{324}, O_{131}\}$ şeklinde olur. 2. Parçacık Gantt şeması Şekil 4.'te verildiği gibi gerçekleşir. Amaç fonksiyonu olarak $C_{max}=8$, $W_t=16$ ve $W_m=6$ olur.



Şekil 4. Başlangıç popülasyonu 2. parçacık Gantt şeması.

Hız Vektörü:

PSO parçacıklar arasındaki bilgi paylaşımını esas almaktadır. Her bir parçacık yeni pozisyonunu, önceki tecrübelerinden ve sürüdeki en iyi pozisyonu dikkate alarak bulur. Global komşular, her bir iterasyonda sürü içerisindeki tüm parçacıklar arasından en iyi uygunluk fonksiyonu değerini veren parçacığın değeridir. Yerel komşular ise, ilk iterasyonda her bir parçacığın pozisyon değeri olmak üzere, her

iterasyonda parçacık sayısı kadar yerel en iyi değer ortaya çıkar. Her bir parçacık, yerel ve global komşu değerlerini kullanarak bir sonraki iterasyonda yeni konumunu belirler. Durdurma kriteri ise genellikle istenen amaç fonksiyonu değerine veya iterasyon sayısına ulaşılmasıdır.

Hız vektörü, parçacığın bir sonraki konumunu belirleyen parametrelerden biridir ve V_i^k ile ifade edilir. Denklem (19) sürü içerisindeki bir parçacığın hız vektörünü temsil eder. Burada v_{i1}^k , k . iterasyondaki i . parçacığa ait hız vektörünün 1. elemanını temsil etmektedir.

$$V_i^k = [v_{i1}^k, v_{i2}^k, v_{i3}^k, \dots, v_{i(nxm)}^k] \quad (19)$$

$$V_i^{k+1} = W * V_i^k + c_1 * Rand_1^{k*} (Pbest_i^k - x_i^k) + c_2 * Rand_2^{k*} (Gbest^k - x_i^k) \quad (20)$$

$$W = W_{max} - \frac{W_{max} - W_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (21)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (22)$$

Denklem (20)'de bir sonraki iterasyon için yeni konum vektörünün hızının hesaplanması verilmiştir. $Rand_1^k$ ve $Rand_2^k$ her iterasyonda [0,1] arasında düzgün dağılımlı rastsal değerlerdir. c_1 ve c_2 sabitleri öğrenme faktörleridir. c_1 Sabiti parçacığın kendi en iyi pozisyonuna doğru hareket etmesini sağlar. c_2 Sabiti sürüdeki diğer parçacıkların en iyi pozisyonuna göre hareket etmesini sağlar. Literatürde genelde $c_1 = c_2 = 2$ alındığı görülmektedir. w Atalet ağırlığı, bir önceki iterasyona ait hız vektörünün mevcut iterasyondaki hız vektörü üzerindeki etkisini kontrol eden parametredir. Atalet ağırlığı, parçacığın yerel ve global araştırma kabiliyeti arasında değişim etkisi vardır. Atalet ağırlığının büyük bir değer seçilmesi global aramada iyileşmeyi, küçük bir değer seçilmesi ise yerel aramada iyileşmeyi sağlar. İterasyonlar boyunca atalet ağırlığı Denklem (21)'de verilen formülasyonla hesaplanır. P_{best} Bir parçacığın mevcut iterasyona kadar elde ettiği en iyi değeri ifade eder. G_{best} Değeri ise, popülasyon içindeki tüm parçacıklar içinde en iyi değere sahip parçacığın aldığı değerdir. Bir çözüm uzayında en fazla iterasyon sayısı kadar G_{best} vardır. Ancak çok amaçlı problemlerin optimizasyonunda G_{best} sayısı iterasyon sayısını geçebilir. Bu durumda amaç fonksiyonları arasında en iyilenmesi düşünülen amaç fonksiyonuna sahip

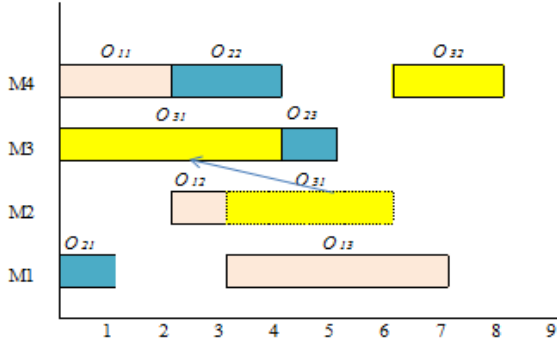
olan G_{best} alınır. Denklem (22) parçacığın bir sonraki iterasyonda gideceği konumu vermektedir.

5.2. Yerel Arama Algoritması

YA, çizelgeleme alanında özellikle EATÇ problemlerinde sıklıkla uygulanan sezgisel tekniklerdendir. Kaya ve Fiğlalı [36] EATÇ problemlerinin meta sezgisel yöntemler ile çözümünde araştırmacıların kullandıkları yönteme en çok YA algoritmasını melezlediklerini söylemişlerdir. YA algoritmasında, bir başlangıç çizelgesinden hareketle, bu çizelgedeki işlerin yerlerinin belirli kurallara göre değiştirilmesi ile yeni komşu çizelgeler elde edilir, bu süreç belli bir ölçüt sağlanıncaya kadar devam ettirilir ve bu ölçüt sağlandığında algoritma sonlandırılır. Elde edilen yeni çizelgeler daha iyi uygunluk değerine sahip ise çözüm kümesi güncellenir.

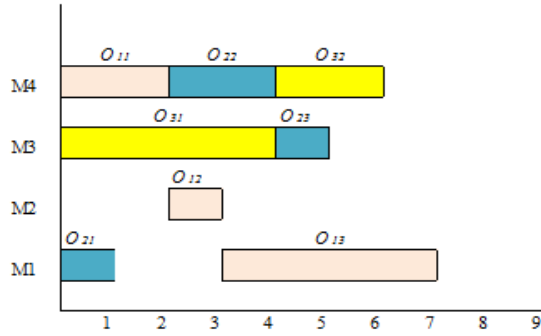
Bir YA algoritmasının etkili olabilmesi için hem yeni arama uzaylarını keşfedebilmesi hem de bilinen arama uzayında olabilecek çözümleri gezebilmesi gerekmektedir. Bu iki ihtiyaç birbiri ile çelişmektedir. Bu sebeple iyi bir YA algoritması bu ikisini dengeleyebilmelidir. Sadece rastgele arama yapan bir algoritma yeni yerler keşfedebilirken, sadece tepe tırmanma algoritması yapan bir arama algoritması bilinen alanlarda gezmektedir [37].

Örnek problem üzerinde YA algoritmasının uygulanması aşağıdaki gibi gerçekleştirilir. Başlangıç popülasyonu 2. parçacığa ait çözüm $X_2^1 = \{O_{211}, O_{114}, O_{122}, O_{224}, O_{233}, O_{312}, O_{324}, O_{131}\}$ şeklinde elde edilmişti. Bu çözüme ait Gantt şeması Şekil 4. 'te verilmiştir. Gantt şeması göz önüne alındığında en son biten operasyon O_{32} 'dir. Bu operasyonun bağlı olduğu J_3 işine ait ilk operasyon O_{31} belirlendikten sonra bu operasyonun daha erken işlenebileceği boş makine arayalım. O_{31} operasyonu normalde 2 no'lu makinede 3 birim zamanda işlemi biterken, 3 no'lu makinede işlem görmesi durumunda 4 birim zaman işlem görmesi gerekiyor. 3 No'lu makine 5. birim zamana kadar boşluğu olduğundan dolayı O_{31} operasyonunun 3 no'lu makinede işlenmesi 3. işin daha erken bitebileceğine işaret etmektedir. Şekil 5.'te görüldüğü gibi O_{31} operasyonu 2 nolu makineden 3 no'lu makineye kaydırılabilir.



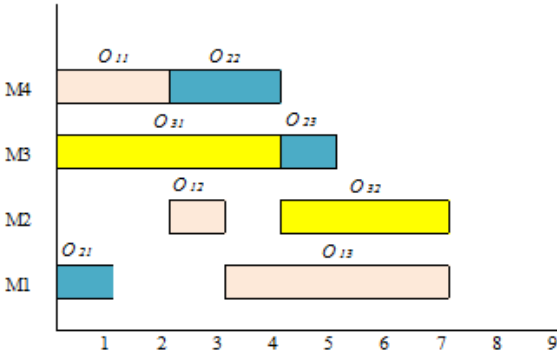
Şekil 5. YA Algoritma Uygulaması.

3 No'lu işe ait 1. Operasyon (O_{31}), 3 no'lu makineye atandıktan sonra, 2. operasyon (O_{32}) için iki alternatif söz konusu olmaktadır. Normalde 4 No'lu makinede 2 birim zaman işlem gören O_{32} operasyonu 2 birim zaman sola kaydırılarak operasyon tamamlanabilir. Bu durumda Şekil 6.'da verilen Gantt şeması elde edilir. Amaç fonksiyonu, $C_{max}=7$, $W_t=17$ ve $W_m=6$ olur.



Şekil 6. YA Algoritması 1. Alternatif Uygulaması.

Diğer alternatif O_{32} operasyonu 4 no'lu makine yerine 2 no'lu makinede 3 birim zaman işlem görür. Bu durumda Şekil 7.'deki Gantt şeması elde edilir. Bu duruma göre amaç fonksiyonu, $C_{max}=7$, $W_t=18$ ve $W_m=5$ şeklinde olur.



Şekil 7. YA Algoritması 2. Alternatif Uygulaması.

Örnek problem üzerinde rastsal oluşturulan X_p sıralama vektörü ve X_m atama vektörlerine göre amaç fonksiyon değerleri $C_{max}=12$, $W_t=32$ ve $W_m=10$ şeklinde sonuç elde edilmişti. En kısa işlem zamanı kuralına göre elde edilen 2. parçacık çözümüne göre amaç fonksiyon değerleri, $C_{max}=8$, $W_t=16$ ve $W_m=6$ şeklinde gerçekleşti. YA Algoritması 1. alternatif uygulamasına göre elde edilen amaç fonksiyon değerleri, $C_{max}=7$, $W_t=17$ ve $W_m=6$ şeklinde gerçekleşir. YA Algoritması 2. alternatif uygulamasına göre elde edilen amaç fonksiyon değerleri ise, $C_{max}=7$, $W_t=18$ ve $W_m=5$ şeklinde oldu. Elde edilen bütün sonuçlar toplu halde Tablo 2.'de verilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde amaçların ağırlıklandırılarak tek amaç fonksiyonu haline getirilmesi durumunda örnek problemde elde edilen 3 sonuç yerine tek bir sonuç söz konusu olurdu. Çok amaçlı problemlerin çözümünde kullanılan özellikle pareto optimal sonuçları veren algoritmalar örnek problemde de görüldüğü gibi karar verici tarafından tercih edilebilecek 3 alternatif sonuç vermiştir.

Tablo 2. Sonuçların Karşılaştırılması.

Amaç Fonksiyonları	Standart PSO Sonucu	En Kısa İşlem Zamanı Sonucu	YA 1. Alternatif Uygulama Sonucu	YA 2. Alternatif Uygulama Sonucu	Pareto Baskın Çözümler		
C_{max}	12	8	7	7	8	7	7
W_t	32	16	17	18	16	17	18
W_m	10	6	6	5	6	6	5

Amiri ve diğ. [18] tarafından verilen 4 iş 4 makine 10 operasyondan oluşan probleme ait işlem süreleri Tablo 3.'te verilmiştir.

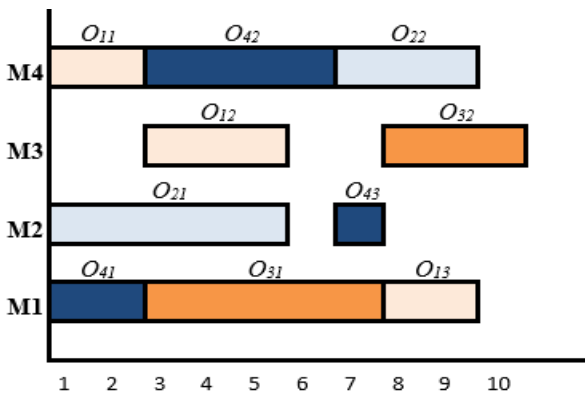
Tablo 3. Problem işlem süreleri.

		M1	M2	M3	M4
J ₁	O ₁₁	4	3	5	2
	O ₁₂	8	6	3	7
	O ₁₃	2	3	4	3
J ₂	O ₂₁	6	5	7	6
	O ₂₂	5	7	5	3
J ₃	O ₃₁	5	8	7	6
	O ₃₂	6	5	3	4
J ₄	O ₄₁	2	4	3	6
	O ₄₂	9	8	5	4
	O ₄₃	3	1	4	2

Tablo 4. Sonuçların Karşılaştırılması.

Amaç Fonksiyonları	Amiri ve diğ. (2009)	Standart PSO Sonucu	En Kısa İşlem Zamanı Sonucu	YA Uygulama Sonucu	Pareto Baskın Çözümler
C_{max}	15	13	14	10	10
W_t	30	31	30	30	30
W_m	9	9	9	9	9

Problem öncelikle standart PSO ile çözülmüş ve $C_{max}=13$, $W_t=31$ ve $W_m=9$ şeklinde sonuç alınmıştır. Daha sonra standart PSO ile elde edilen sonucu geliştirmek için algoritmaya YA algoritması adapte edilerek $C_{max}=10$, $W_t=30$ ve $W_m=9$ şeklinde sonuç elde edilmiştir. Ayrıca Klasik çözüm yöntemlerinden olan en kısa işlem zamanı yöntemi ile çözüm yapılarak $C_{max}=14$, $W_t=30$ ve $W_m=9$ sonucu alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.'te toplu halde verilmiştir. PSO algoritmasına YA algoritması adapte edilerek geliştirilen melez algoritma ile Amiri ve diğ. [18] ile standart PSO ve en kısa işlem zamanı kuralının uygulanması ile elde edilen sonuçlara göre pareto baskın çözüm elde edilmiştir. Elde edilen pareto baskın çözümüne ait Gantt diyagramı Şekil 8.' de verilmiştir.



Şekil 8. Pareto Baskın Çözüm Gantt Diyagramı.

6. Sonuçlar

EATÇ problemleri NP-zor sınıfındadır. Bu nedenle bu problemlerin optimal sonuçlarını bulmak oldukça zordur. Küçük boyutlu problemler için optimal sonuç

bulunabilmektedir. Ancak orta ve büyük boyuttaki problemlerin optimal sonuçlarını bulmak oldukça zordur. Ayrıca gerçek üretim sistemlerinde genellikle daha büyük boyutlu problemlerle karşılaşmaktadır. Bu tür problemleri çözmek için etkin meta sezgisel yöntemlere ihtiyaç duyulur. Meta sezgisel yöntemler, özellikle zor kombinatoryal problemlere uygulanan, en iyiye yakın sonuçlar veren pratik ve etkin yöntemlerdir. Problemlerin optimal çözümleri bulunamadığında veya optimal çözümleri bulmak için oldukça fazla bir zamana ihtiyaç olduğunda bu yöntemlere başvurulur.

Bu çalışmada orta ve büyük boyutlu EATÇ problemlerini çözmek için çizelgeleme alanında başarıyla uygulanan PSO algoritmasına YA algoritmasının melezlenmesiyle yeni bir yaklaşım önerisinde bulunulmuştur. Araştırmacıların çizelgeleme problemlerine meta sezgisel yöntemler ile çözüm ararken karşılaştıkları en büyük problemlerden biri olan problemin çözüm algoritmalarına uyarlanması uygulamalı olarak sunulmuştur. Kullanılan meta sezgisel yöntemlere basit sıralama kurallarının melezlenmesiyle algoritmanın ilerleyen iterasyonlarda daha iyi sonuçlara ulaşacağı gösterilmiştir. Ayrıca çok amaçlı EATÇ problemlerinin klasik meta sezgisel yöntemlerle çözümünde YA algoritmasının adapte edilerek pareto optimal sonuçlara ulaşılması daha kolaylık sağlamaktadır.

EATÇ Problemleri diğer çizelgeleme problemleri kadar geniş bir literatür alt yapısına sahip değildir. Bu problem türünün, atölye tipi çizelgeleme problemlerine göre daha karmaşık bir yapıya sahip olması ve bilgisayar hesaplama kapasitelerinin yeterli hızlara yeni yeni ulaşması v.b. nedenlerden dolayı literatürün kısıtlı kalmasına neden olmuştur. EATÇ problemlerinin değişik varyasyonları göz önünde bulundurularak çalışmalar yapılması önerilmektedir.

Kaynaklar

- [1] H. Liu, A. Abraham and Z. Wang, "A Multi-swarm approach to multi-objective flexible Job-shop scheduling problems," *Fundamental Informatics*, Vol 95, 2009, ppç 465–489.
- [2] T. Eren and E. Güner, "A Literature Survey for Multicriteria Scheduling Problems on Single and Parallel Machines," *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol 17, No 4, 2002, pp. 37-69.
- [3] J. Gao, L. Sun and M. Gen, "A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible

- job shop scheduling problems," *Computers & Operations Research*, Vol. 35, 2008, pp. 2892 – 2907.
- [4] T.C. Chiang and H.J. Lin, "A simple and effective evolutionary algorithm for multiobjective flexible job shop scheduling," *International Journal of Production Economics*, Vol. 03, 2012, pp. 1-12.
- [5] J. Li, Q. Pan and S. Xie, "An effective shuffled frog-leaping algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problems," *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 218, 2012, pp. 9353-9371.
- [6] J. Li and Q. Pan, "Chemical-reaction optimization for flexible job-shop scheduling problems with maintenance activity," *Applied Soft Computing*, Vol. 12, 2012, pp. 2896–2912.
- [7] L. Wang, G. Zhou, Y. Xu and M. Liu, "An enhanced Pareto-based artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible job-shop scheduling," *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 60, 2012, pp. 1111–1123.
- [8] J.Q. Li, Q.K. Pan and K.Z. Gao, "Pareto-based discrete artificial bee colony algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problems," *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 10, 2011 pp. 1-11.
- [9] A. Bagheri, M. Zandieh, I. Mahdavi and M. Yazdani, "An artificial immune algorithm for the flexible job-shop scheduling problem," *Future Generation Computer Systems*, Vol. 26, 2010, pp. 533-541.
- [10] J. Li, Q. Pan and Y.C. Liang, "An effective hybrid tabu search algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problems," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 59, 2010, pp. 647–662.
- [11] M. Rajkumar, P. Asokan and V. Vamsikrishna, "A GRASP algorithm for flexible job-shop scheduling with maintenance constraints," *International Journal of Production Research*, Vol. 48, No 22, 2010, pp. 6821 – 6836.
- [12] S. Wang and J. Yu, "An effective heuristic for flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 59, 2010, pp. 436–447.
- [13] G. Zhang, X. Shao, P. Li and L. Gao, "An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 56, 2009, pp. 1309–1318.
- [14] L.N. Xing, Y.W. Chen and K.W. Yang, "Double layer ACO algorithm for the multi-objective FJSSP," *New Generation Computing*, Vol. 26, 2008, pp. 313-327.
- [15] N.B. Ho and J.C. Tay, "Solving Multiple-Objective Flexible Job Shop Problems by Evolution and Local Search," *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics—Part C: Applications And Reviews*, Vol. 38, No 5, 2008, pp. 1094-6977.
- [16] Z. Jia, H. Chen and J. Tang, "An Improved Particle Swarm Optimization for Multi-objective Flexible Job-shop Scheduling Problem," *IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services*, Nanjing, China, 18-20 November 2007, pp. 1587-1592.
- [17] W. Xia and Z. Wu, "An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 48, 2005, pp. 409–425.
- [18] M. Amiri, M. Zandieh, M. Yazdani and A. Bagheri, "A variable neighbourhood search algorithm for the flexible job-shop scheduling problem," *International Journal of Production Research*, Vol. 48, 2010, pp. 5671-5689.
- [19] V. Kaplanoğlu, "An object-oriented approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problem," *Expert Systems With Applications*, Vol. 45, 2016, pp. 71–84.
- [20] H. Tamaki, T. Ono, H. Murao and S. Kitamura, "Modeling and genetic solution of a class of flexible job shop scheduling problems," *IEEE International Conference*, Vol. 01, 2001, pp. 7241-7248.
- [21] G. Vilcot and J.C. Billaut, "A tabu search and a genetic algorithm for solving a bicriteria general job shop scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, Vol. 190, 2008, pp. 398–411.
- [22] P. Fattahi and A. Fallahi, "Dynamic Scheduling in Flexible Job Shop Systems by Considering Simultaneously Efficiency and Stability," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 2, 2010, pp. 114–123.
- [23] M. Gholami and M. Zandieh, "Integrating simulation and genetic algorithm to schedule a dynamic flexible jobs shop", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 20, 2009, pp. 481–498.
- [24] M.B.S. Sreevara Reddy, Ch. Ratnam, G. Rajyalakshmi, V.K. Manupati, "An effective hybrid multi objective evolutionary algorithm for solving real time event in flexible job shop scheduling problem," *Measurement*, vol. 114, 2018, pp. 78–90.
- [25] İ.H. Karaçizmeli and S.N. Oğulata, "Energy Consumption Management in Textile Finishing Plants: A Cost Effective and Sequence Dependent Scheduling Model", *Tekstil ve Konfeksiyon*, Vol. 27, No 2, 2017, pp.145-152.
- [26] I. Kacem, S. Hammadi and P. Borne, "Approach by localization and genetic manipulation algorithm for flexible job-shop scheduling problem, *IEEE*, Vol. 01, 2001, pp. 2599-2604.
- [27] I. Kacem, S. Hammadi and P. Borne, "Approach by Localization and Multiobjective Evolutionary Optimization for Flexible Job-Shop Scheduling Problems," *IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part c: Applications and Reviews*, Vol. 32, No 1, 2002, pp. 1-13.
- [28] I. Kacem, S. Hammadi and P. Borne, "Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems: hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 60, 2002, pp. 245–276.

- [29] S. Kaya and N. Fiğlalı, "Çok Amaçlı Optimizasyon Problemlerinde Pareto Optimal Kullanımı," *Social Sciences Research Journal*, Vol. 5, 2016, pp. 9-18.
- [30] L. Özbakır, "Çok Objektifli Esnek Atölye Çizelgeleme Problemlerinin Sezgisel Yöntemlerle Modellenmesi, Analizi ve Çözümü," Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2004.
- [31] J. Kennedy, R.C. Eberhart and Y. Shi, "Swarm intelligence", *CA:Morgan Kaufmann Publishers*, San Francisco, 2001.
- [32] A. Aydın, "Metasezgisel Yöntemlerle Uçak Çizelgeleme Problemi Optimizasyonu", Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2009.
- [33] F. Pezzella, G. Morganti and G. Ciaschetti, "A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem," *Computers & Operations Research*, Vol. 35, 2008, pp. 3202-3212.
- [34] P. Brandimarte, "Routing and scheduling in a flexible job-shop by tabu search," *Annals of Operations Research*, Vol. 41, 1993, pp. 157-183.
- [35] N. Zribi, I. Kacem, A. El Kamel and P. Borne, "Assignment and Scheduling in Flexible Job-Shops by Hierarchical Optimization," *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics—Part C: Applications And Reviews*, Vol. 37, No 4, 2007, pp. 652-661.
- [36] S. Kaya and N. Fiğlalı, "Esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin meta sezgisel yöntemler ile çözümüne yönelik bir inceleme," *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Vol. 20, No 2, 2016, pp. 223-244.
- [37] S. Kaya, "Çok Amaçlı Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Geliştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Çözümüne Yönelik Model Önerileri," Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.