

HIZ DEĞİŞTİRME FAALİYETLİ TEK MAKİNELİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN EN KISA YOL TABANLI BİR ÇÖZÜM YÖNTEMİ

G. Didem BATUR SİR¹ (ORCID: 0000-0002-5226-2964)*

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Geliş / Received: 06.03.2019

Kabul / Accepted: 08.07.2019

ÖZ

Bu çalışmada, tek makineli bir sistemde hız değiştirme faaliyeti (HDF) ile birlikte işlerin çizelgelenmesi üzerinde durulmaktadır. Bir HDF, makinenin üretim hızının orijinal durumuna getirilmesi için uygulanan bir bakım faaliyeti olarak tanımlanmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, bir işin HDF'den önce veya sonra planlanması sonucunda, işlerin işlem zamanları farklı değerler almaktadır. Ele alınan problem, iş sırası ve bu iş sırası içindeki HDF konumunun belirlenmesidir. Çözümüne yönelik olarak şebeke gösterimine dayalı, en kısa yol tabanlı bir yöntem oluşturulmuştur. Önerilen yöntemde, ilk aşamada En Kısa İşlem Zamanı algoritması ile elde edilmiş iş sıralamasına göre bir şebeke oluşturulmaktadır. Daha sonra ilgili şebeke üzerinde en kısa yolu veren HDF ataması doğrusal programlama kullanılarak aranmakta ve bulunan yolun değeri makine için toplam tamamlanma zamanını vermektedir. Bundan sonra yerel arama prosedürü uygulanarak, her adımda iş sıralamaları üzerinde *swap* operasyonu (ikili değişim) kullanılmakta ve elde edilen yeni çözümler üzerinde yapılan sürekli karşılaştırmalar sonucu son çözüm elde edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Makine çizelgeleme, hız değiştirme faaliyeti, en kısa yol algoritması, tam sayılı programlama

A SHORTEST PATH BASED SOLUTION METHOD FOR SINGLE MACHINE SCHEDULING PROBLEM WITH RATE MODIFYING ACTIVITY

ABSTRACT

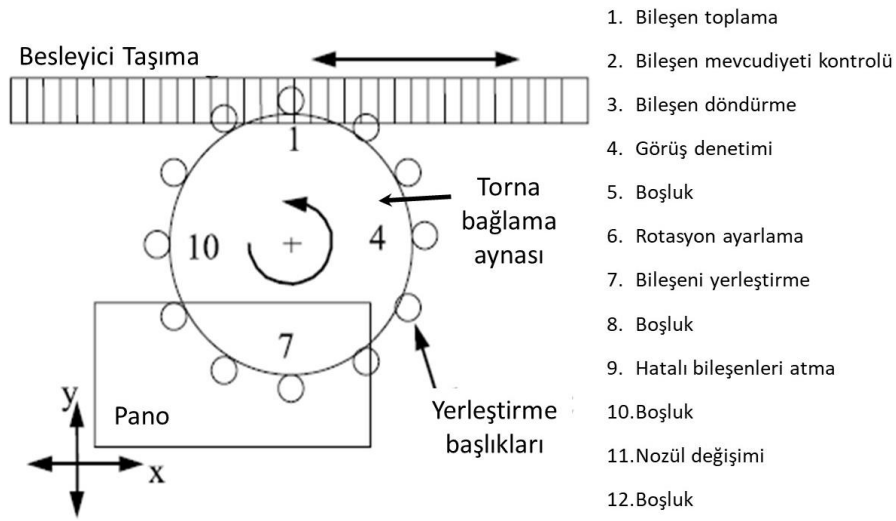
In this study, scheduling of jobs and a rate modifying activity (RMA) on a single machine system is considered. A RMA is defined as a maintenance activity applied to bring production speed of the machine back to its original state. From this point of view, when a job is planned before or after the RMA, processing times of the jobs become different. The problem addressed is determination of the job sequence and the position of the RMA in this sequence. A shortest path-based method which is based on network representation is developed for the solution. In the proposed method, a network is created in the first step according to the job sequence obtained by the Shortest Processing Time algorithm. RMA assignment that gives the shortest path on the network is then searched using linear programming and the value of the found path gives total completion time for the machine. After this, using local search procedure, *swap* operation (binary exchange) is applied on the job positions at each step and final solution is obtained as a result of continuous comparisons on new solutions obtained.

Keywords: Machine scheduling, rate modifying activity, shortest path algorithm, integer programming

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 312 582 38 04 ; e-mail / e-posta: dbatur@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ

Yaklaşık elli yıldır, çizelgeleme üzerine çalışan araştırmacılar bazı standart varsayımlardan yararlanmaktadır. Bunlardan biri ve belki de en yaygın olarak kullanılanı ise işlerin işlem zamanlarının sabit olduğu varsayımdır. Fakat gerçek hayatta, işlem zamanları makinelerde görülebilecek bozulma ve aşınma gibi çeşitli faktörler nedeniyle değişebilmektedir. Günümüz endüstrilerinde, bir makinenin belirli bir süre çalıştıktan sonra beklenen düzeyin altında çalışmaya başlaması çok yaygındır. Bu duruma yönelik olarak literatürde bulunan bir örnek Şekil 1’de sunulan elektronik montaj sistemlerinin yüzeye monte teknoloji hatlarında görülmektedir [1]. Bu hatlarda toplama ve yerleştirme nozüllerinin bazıları çalışmamakta; bu da makinenin daha az verimli bir hızda çalışmasına neden olabilmektedir. Bu noktada üretim planlama sorumlusu, makineyi durdurup tamir etmeye karar verebileceği gibi bekleyip daha sonra düzeltmeyi de tercih edebilir. Diğer yandan, eğer üretim planlama sorumlusu makineyi sabitlemeden çalıştırmaya devam ederse, makinenin parçalanması ve derhal tamir edilmesi gerekebilir. Bu gibi durumlarda uygulanan bakım ve onarım faaliyetleri, makine hızında farklılıklara sebep olduğu için literatürde hız değiştirme faaliyetleri (HDF) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1. Talaş atıcı yerleştirme makinesinin şeması [1]

İşlem sürelerinde farklılık olması, birçok durumda makine ayarlarındaki bozulmalardan kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, mevcut sabit işlem zamanlarının, HDF ile değiştirilebilmesi mümkündür. Bu faaliyetler ile bakımları yapılan makinelerdeki işlem zamanları önceki duruma kıyasla daha kısa olma eğilimindedir.

Uygulamada sıkça karşılaşılmamasına rağmen, bakım ve çizelgeleme problemlerinin birlikte ele alındığı çalışmalara çok sık rastlanmamaktadır. Bu tür problemler genel olarak, uygunluk kısıtlı çizelgeleme problemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Ancak, HDF çalışmalarında ele alınan problem, işlerin işlem sürelerinin, makinenin kullanılmayan süresinden önce veya sonra çizelgelenmesine bağlı olarak değişmesi bakımından farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, bu çalışmalarda HDF faaliyetinin başlangıç zamanı da bir karar değişkeni olarak ortaya çıkmaktadır.

Literatüre bakıldığında, ilk olarak, Whitaker [2] tek makinede tek bir HDF'nin çizelgelenmesi problemi üzerinde durmuş ve toplam tamamlanma zamanı minimizasyonu için dal-sınır tabanlı bir çözüm yöntemi önermiştir. Lee ve Leon [1], aynı probleme yönelik polinom zamanlı bir algoritma ile birlikte toplam tamamlanma zamanı, toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı ve maksimum tamamlanma zamanı gibi farklı amaç fonksiyonları için çözüm yöntemleri önermişlerdir. Lee ve Lin [3], maksimum tamamlanma zamanı, toplam tamamlanma zamanı, toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı ve maksimum gecikme amaçları ile tek makineli çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Önerdikleri modellerde sabit zamanlı HDF atamasının yanı sıra işlerin sıralanmasını değerlendirmiş, maksimum tamamlanma zamanı ve toplam tamamlanma zamanı minimizasyonu için polinom zamanlı algoritmalar önermişlerdir. Mosheiov ve Sidney [4], öğrenme etkisi ile HDF atamasını birlikte ele aldıkları çalışmalarında iş sıralamasında maksimum tamamlanma zamanının minimize edilmesini sağlayan polinom zamanlı bir algoritma geliştirmişlerdir. Mosheiov ve Oron [5], bakım faaliyeti çizelgelenmesi ve teslim zamanı atamasını birlikte ele almışlardır. Çalışmada farklı amaçlar altında polinom zamanlı algoritmalar sunulmuştur. Gordon ve Tarasevich [6], aynı problem için hız değiştirme oranının

HIZ DEĞİŞTİRME FAALİYETLİ TEK MAKİNELİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN EN KISA YOL TABANLI BİR ÇÖZÜM YÖNTEMİ

0 ila 1 arasında olduğu varsayımıyla problem çözümünde önerilen algoritmanın hızlandırılması için bazı özellikler sunmuşlardır. Wang ve Wang [7] tek makineli teslim tarihi atamalı çizelgeleme problemi için tek bir HDF'nin bulunduğu duruma yönelik polinom zamanlı bir algoritma sunmuşlardır. Mosheiov ve Sidney [8], bakım faaliyetinin gecikmesinin işlem zamanlarında artışa sebep olduğu durumu ele alarak tek makineli çizelgeleme probleminde farklı amaç fonksiyonları için polinom zamanlı çözüm yöntemleri geliştirmişlerdir. Zhao ve Tang [9], HDF ile birlikte zamanla işlem süreleri değişen işleri ele aldıkları çalışmalarında, zaman pencereli atama ile tek makineli çizelgeleme problemi üzerinde durmuş ve çözüme yönelik olarak polinom zamanlı bir algoritma önermişlerdir. Zhu ve ark. [10], işlem zamanlarının işin sırasına ve kaynak atama fonksiyonuna bağlı olarak değiştiği durumda, HDF ile tek makineli çizelgeleme problemini ele almış ve problem karmaşıklığı üzerine bulgular sunmuşlardır. Bai ve ark. [11], tek makineli RMA atama probleminde teslim zamanını dikkate alarak polinom zamanlı bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Yu [12], HDF ile birlikte işlem sürelerinde zamanla görülen yavaşlamanın birlikte ele alındığı tek makineli çizelgeleme problemi için optimal çizelgenin bulunmasına yönelik polinom zamanlı bir yöntem sunmuşlardır. Li ve ark. [13], tek makineli bir sistemde kontrol edilebilir işlem zamanları ve HDF'nin dikkate alınmasıyla farklı amaçlara yönelik polinom zamanlı algoritmalar sunmuşlardır. Chung ve ark. [14], hazırlık zamanlı ve pozisyona bağlı işlem zamanlarının dikkate alındığı tek makineli çizelgeleme problemini tamsayı programlama ile formüle etmiş ve çözüme yönelik olarak sezgisel algoritmalar geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada, tek makineli bir sistemde işlem görecektir olan işlerin ve bir HDF'nin çizelgelenmesi problemi üzerinde durulmaktadır. Bu problem ile elektronik montaj hatlarında yaygın olarak karşılaşılmakla birlikte, söz konusu faaliyet sistemdeki makinenin işlem hızını değiştirmektedir. Böyle bir durumda, HDF'den önce yapılan işlerin tamamlanması sonra yapılan işlerden daha uzun sürecektir. Çalışmada, HDF gerçekleşirken hiçbir işlem yapılmayacağı varsayılmaktadır.

Problem tanımlanmasında, Pinedo [15]'nin çizelgeleme literatüründe kullanılan standart notasyonu kullanılmıştır. Buna göre; ele alınan problem için $1/rm/\sum C_j$ gösterimi, bir HDF'nin bulunduğu tek makineli çizelgeleme problemini tanımlamaktadır. Çözüm aranan problem, ilgili işler için bir iş sıralaması ve HDF için uygun bir zaman belirlenmesi ile birlikte toplam tamamlanma zamanının minimize edilmesidir.

Söz konusu problem için literatürde önerilen farklı çözüm yaklaşımları bulunmaktadır. Probleme yönelik olarak kurulan bir şebeke yapısı Batur Sir [16] tarafından önerilmiş olup ilgili şebekenin çözümünde karışık tam sayılı bir matematiksel model kullanılmış, ancak yalnızca küçük boyutlu problemler için çözüm bulunabilmiştir. Öncekilerden farklı olarak bu çalışmada, ele alınan problemin büyük boyutları ile birlikte farklı kısıtların dikkate alındığı daha karmaşık yapılarda da kullanılabilir, içerisinde tam sayılı programlama ile birlikte yerel arama prosedürü barındıran şebeke tabanlı bir yaklaşım önerilmektedir.

Çalışmanın devamı şu şekildedir: Bir sonraki bölümde probleme yönelik gerekli tanımlamalar verilerek çözüm için önerilen En Kısa Yol algoritmasına dayalı yöntem, içerdiği matematiksel model ile birlikte sunulmuştur. Bölüm 3'te, ele alınan problem ve çözüm yöntemi bir örnek üzerinde detaylandırılmış, ayrıca üretilen test problemleri ile yöntemin etkinliği üzerinde analizler yapılmıştır. Bölüm 4, son açıklamalar ve elde edilen bulgulara ayrılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Ele alınan problem, n adet işin ve t süreli bir HDF'nin tek bir makine üzerinde çizelgelenmesidir. Her j işi ile ilişkili olarak, eğer iş HDF'den önce yapılırsa, sabit bir işlem süresi (p_j) bilinmektedir. Diğer yandan, eğer j işi, HDF'den sonra yapılırsa, işlem süresi $\alpha_j p_j$ olmaktadır, burada $\alpha_j > 0$ hız değiştirme oranını göstermektedir. Genel olarak, α_j değeri üzerinde bir kısıtlama olmamakla birlikte, $\alpha_j \leq 1$ için problemin başarılı uygulamalara sahip olduğu bilinmektedir. Problem varsayımları gereği; tüm işler $t = 0$ anında sistemde mevcuttur ve işlerin bölünmesine izin verilmemektedir.

Problem için temelde iki aşamadan oluşan bir çözüm algoritması kullanılmıştır. Bu yöntem ile ilk aşamada iş sıralamalarının, ikinci aşamada HDF'nin gerçekleştirileceği noktanın belirlenmesine çalışılmaktadır.

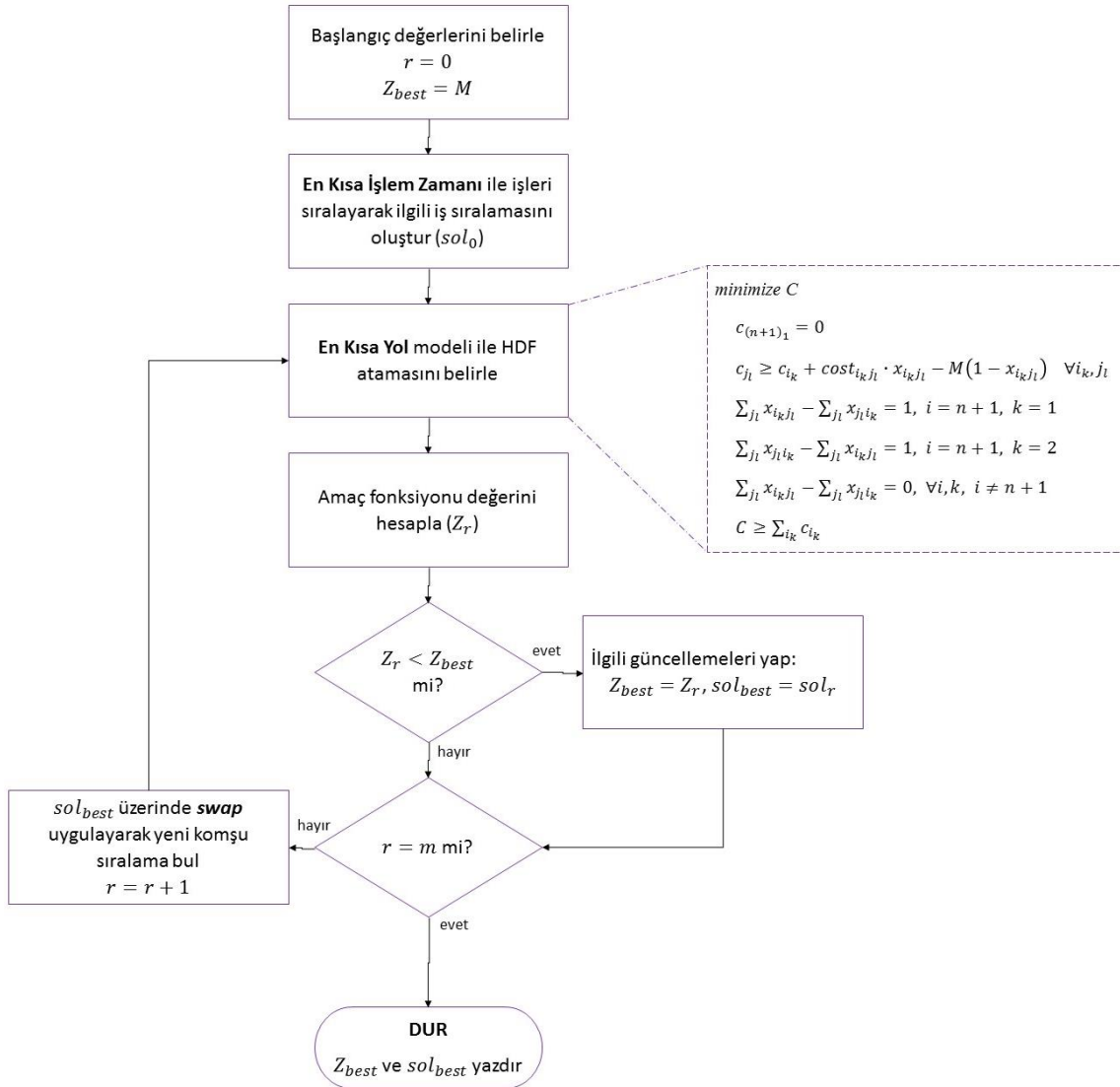
Uygulanan prosedüre göre; ilk olarak tek makineli çizelgeleme problemlerinde yaygın olarak kullanılan En Kısa İşlem Zamanı algoritması kullanılarak bir iş sıralaması elde edilmektedir.

İş sırasının belirlenmesinin ardından, Bölüm 2.1'de açıklandığı şekliyle bir şebeke oluşturulmakta ve bu şebeke üzerinde bulunacak en kısa yol ile HDF'nin yeri belirlenerek ilgili toplam tamamlanma zamanı değeri (Z_r) hesaplanmaktadır. Bu aşamadaki en kısa yol probleminin çözümünde optimum sonuç verecek olan matematiksel model kullanılmıştır. Elde edilen amaç fonksiyonu değeri mevcut en iyi çözümle (Z_{best}) karşılaştırılarak tamam/devam kararı verilmektedir. Çözümde iyileşme görüldüğü sürece mevcut sıralamanın değiştirilmesi ile komşu bir çözüm bulunması ve yeni HDF atamasının yapılması ile toplam tamamlanma zamanı

G.D. BATUR SİR

değeri hesaplama adımları tekrarlanarak sürdürülmektedir. Bu noktada komşu çözümün oluşturulması için bu gibi gösterimlerde ve yerel arama algoritmalarında sıklıkla kullanılan *swap* (ikili değişim) tekniğinden yararlanılmış; rasgele seçilmiş olan iki işin sıralamaları değiştirilmiştir. Bununla birlikte, önceden belirlenmiş olan bir sayı (*m*) kadar iterasyonda iyileşme görülmediği takdirde eldeki en iyi çözüm, problem sonucu olarak sunulmaktadır.

Bu şekilde sezgisel yerel arama algoritması ve matematiksel model birlikte kullanılarak çözüm bulunmaktadır. Önerilen çözüm yöntemine yönelik akış şeması Şekil 1’de verilmiş; kullanılan matematiksel model Bölüm 2.1’de açıklanmıştır.



Şekil 2. Çözümeye yönelik akış şeması

2.1. HDF ATAMASI İÇİN EN KISA YOL MODELİ

Problemin ikinci aşaması olarak tanımlanan, HDF atamasının yapılacağı kısımda kullanılmak üzere, bir karışık tamsayı programlama modeli oluşturulmuştur. Bu formülasyonda kullanılan temel tanım şudur:

Tanım: i_k düğümü; $i = 1, \dots, n$ pozisyonuna atanmış iş için işin HDF’den önce ($k = 1$) veya sonra ($k = 2$) gerçekleştirilme durumuna göre oluşturulmuş olan durumları tanımlamaktadır. Başlangıç ve bitiş düğümleri için, sırasıyla, $i_k = (n + 1)_1$ ve $i_k = (n + 1)_2$ düğümleri kullanılmaktadır.

Formülasyonda bir N düğüm kümesi ve bir A ark kümesi bulunmaktadır:

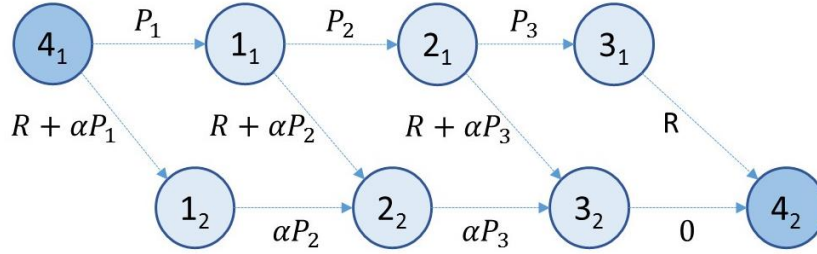
$$N = \{i_k; i = 1, 2, \dots, n, n+1, k = 1, 2\}$$

$$A = \{i_k j_l; i_k, j_l \in N \text{ ve } i_k \text{ düğümünden } j_l \text{ düğümüne hareket mümkün}\}$$

HIZ DEĞİŞTİRME FAALİYETLİ TEK MAKİNELİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN EN KISA YOL TABANLI BİR ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Problemde olası hareketler düğümler arasında tanımlanmıştır. Oluşturulan şebekede tek yönlü bir ark kümesi mevcut olup buna bağlı olarak ters yönlü hareketler engellenmiştir.

Şekil 2’de 3 işin bulunduğu varsayılan bir örnek için kurulan şebeke gösterimi verilmiştir. Şekilde üst sırada verilen düğümler HDF öncesi atamalara alt sırada verilen düğümler ise HDF sonrası pozisyon atamalarına karşılık gelmektedir. Şebekede 4_1 başlangıç düğümünü, 4_2 ise bitiş düğümünü belirtmektedir. $t = 0$ anında 1. pozisyona atanmış olan işin işlemine başlanacaksa 4_1 ’den 1_1 ’e gidilecek ve bu ark 1. sıradaki işin işlem zamanı (P_1) kadar zaman alacak; öncesinde bir HDF gerçekleştirilecekse 4_1 ’den 1_2 düğümüne geçilecek ve bu arkın kullanımı HDF zamanı ile 1. sıradaki işin işlem zamanı toplamı ($R + \alpha P_1$) kadar zaman gerektirecektir. 1_1 düğümüne gelindiği varsayırsa yine olası iki seçim 2_1 veya 2_2 düğümlerine geçiş olacak, bu geçişler ise sırasıyla P_2 veya $R + \alpha P_2$ kadar işlem süresi gerektirecektir. Son düğüme (4_2) varıldığında mutlaka bir noktada HDF gerçekleştirilmiş olması gerekmektedir. Anlaşılacağı üzere alt sıradaki düğümlerin herhangi birisine bir kez gelindiğinde HDF kısıtı ile ilgili durum aşılmış olmaktadır ve (3_2 ’den 4_1 ’e geçişi sağlayan) son ark 0 birim zamanlık süreye sahiptir. Ancak üst sıradaki pozisyonlardan devam edilmiş ve son atanan işten önce bir HDF gerçekleştirilmemişse, örnekte 3_1 olarak gösterilmiş son pozisyondan sonra HDF için r kadar bir süre eklenmektedir.



Şekil 3. Örnek şebeke gösterimi

İlgili şebeke üzerinde en kısa yolun bulunabilmesi için kullanılmak üzere bir matematiksel model oluşturulmuştur. Modelde aşağıdaki parametre ve değişkenler kullanılmaktadır:

Parametreler:

- n : Gerçekleştirilecek iş sayısı
- P_i : i işinin işlem zamanı
- R : HDF işlem zamanı

Karar değişkenleri:

- x_{ikjl} : $\begin{cases} 1 & i_k \text{ düğümünden } j_l \text{ düğümüne gidiliyorsa, } i, j = 1, \dots, n + 1, k, l = 1, 2 \\ 0 & \text{diğer durum} \end{cases}$
- $cost_{ikjl}$: i_k düğümünden j_l düğümüne giden ark maliyeti, $i, j = 1, \dots, n + 1, k, l = 1, 2$
- c_{ik} : i_k düğümünün bitiş zamanı, $i = 1, \dots, n + 1, k = 1, 2$
- C : Toplam tamamlanma zamanı

Parametre olarak tanımlanan $cost_{ikjl}$ değerleri, örnek şebeke üzerinde anlatıldığı şekliyle, tüm olası hareketler için tanımlanmıştır. Oluşturulan model şu şekildedir:

minimize C

$$c_{(n+1)_1} = 0 \tag{1}$$

$$c_{j_l} \geq c_{i_k} + cost_{ikjl} \cdot x_{ikjl} - M(1 - x_{ikjl}) \quad \forall i_k, j_l \tag{2}$$

$$\sum_{j_l} x_{ikjl} - \sum_{j_l} x_{jl i_k} = 1, \quad i = n + 1, k = 1 \tag{3}$$

$$\sum_{j_l} x_{jl i_k} - \sum_{j_l} x_{ikjl} = 1, \quad i = n + 1, k = 2 \tag{4}$$

$$\sum_{j_l} x_{ikjl} - \sum_{j_l} x_{jl i_k} = 0, \quad \forall i, k, i \neq n + 1 \tag{5}$$

$$C \geq \sum_{i_k} c_{i_k} \tag{6}$$

Eş.(1), şebekede $(n + 1)_1$ düğümünün başlangıç noktası olarak belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Eş.(2)’deki Miller-Tucker-Zemlin [17] tipi kısıtlar düğümlerin tamamlanma zamanlarının seçilen arklara ve düğümlerdeki zamanlara göre belirlenmesini sağlamaktadır. Şebeke gösterimi ile tutarlı olarak, başlangıç ve bitiş düğümlerini tanımlamak üzere Eş.(3) ve Eş. (4) kullanılmıştır. Tüm diğer düğümler için ise Eş. (5) geçerlidir. Problemde ele alınan amaç, toplam tamamlanma zamanının minimizasyonudur. Bu değerın tanımlanması için ise Eş. (6) kullanılmaktadır.

G.D. BATUR SİR

Önerilen model çözümünde girdi olarak verilen iş sıralamasına göre en uygun HDF zamanı belirlenmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere HDF öncesi ve sonrasındaki işlem zamanları farklı değerler ile tanımlanmakta ve HDF ataması, problemde minimize edilmeye çalışılan toplam tamamlanma zamanı üzerinde etkili olmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çözüm yönteminin daha iyi anlaşılması amacıyla açıklayıcı bir örnek üzerinden açıklama yapılacaktır. 3 işe ait işlemlerin yapılacağı tek makineli bir sistemdeki işlem zamanlarının şu şekilde olduğu varsayılmaktadır: $P_i = \{50, 60, 80\}$. İlgili sistemde $R = 20$ olan bir HDF sonrasında verilen işlem zamanlarında 20% iyileşme olmakta ($\alpha = 0.80$) ve yeni işlem zamanları $P_i = \{40, 48, 64\}$ olarak görülmektedir.

Bölüm 2’de verilen akış şeması takip edildiğinde ilk adımda işlem zamanlarına göre sıralama yapılarak 1 – 2 – 3 sırası elde edilmektedir. Bu sıralamaya göre Şekil 2’de verilen şebeke oluşturularak çözülen matematiksel model ile amaç fonksiyonu değeri 340 olarak bulunmuştur. Bir sonraki adımda rasgele yapılan seçim ile 2. ve 3. işlerin sırası değiştirilmiş ve ilgili HDF ataması ile birlikte yeni amaç fonksiyonu değeri 356 olarak hesaplanmıştır. Verilen adımların sürekli olarak sürdürülmesi sonucu Tablo 1’de verilen sonuçlar bulunmuştur.

Tablo 1. Örnek probleme yönelik sonuçlar

İterasyon	Sıralama	Amaç Fonk. Değeri	İyileşme
1	1-2-3	340	-
2	1-3-2	356	Yok, $m = 1$
3	1-2-3	340	Yok, $m = 2$
4	3-2-1	388	Yok, $m = 3$
5	2-3-1	380	Yok, $m = 4$
6	2-1-3	348	Yok, $m = 5$
7	3-1-2	372	Yok, $m = 6$
8	3-2-1	388	Yok, $m = 7$
9	3-1-2	372	Yok, $m = 8$
10	2-1-3	348	Yok, $m = 9$
11	3-1-2	372	Yok, $m = 10$

Tablo1’den görüleceği üzere, ilk adımda belirlenen amaç fonksiyonu üzerinde iyileşme sağlanamadığı süreçte m sayacı arttırılmakta ve 10 iterasyon boyunca iyileşme görülemediğinden algoritma sonlandırılmaktadır. Elde edilen en iyi çözüm değeri, 1 – 2 – 3 iş sıralaması ve ilgili HDF ataması için 340 olarak verilmiştir.

Önerilen çözüm yönteminin etkinliğinin ölçülmesi amacıyla test problemleri oluşturulmuş ve çözülmüştür. Probleme ait temel parametreler iş sayısı, işlere ait işlem zamanları, HDF zamanı ve değiştirme oranı değeri olarak bilinmektedir. Bu parametreler üzerinden üretilen test problemleri üzerinde yapılan gözlemlerde, farklı veri aralıklarında çözüm sürelerinde farklılıklar olduğu görülmüştür. Yapılan denemeler sonucunda Tablo 2’de verilen parametreler için sunulan küçük, orta ve büyük problem boyutu tanımlarının uygun olduğu belirlenmiştir. Bu sınıflandırmadan yola çıkılarak, ilgili parametrelerin kombinasyonları üzerinden elde edilen karşılaştırmalar Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 2. Test problemlerinde kullanılan parametreler

Parametre	Veri aralığı (küçük, orta, büyük)		
	İş sayısı (n)	3 - 100	100 - 300
Ortalama işlem zamanları ($ort(P_i), i = 1, \dots, n$)	50 - 100	100 - 500	500 - 1000
HDF zamanı (R)	$ort(P_i) * 0.25$	$ort(P_i) * 0.50$	$ort(P_i) * 0.75$
Değiştirme oranı (α)	0.20 - 0.30	0.30 - 0.40	0.40 - 0.50

Tablo 3. Problem boyutu bazında çalışma zamanları

Problem Boyutu	Küçük	Orta	Büyük
Çalışma zamanı (dakika:saniye)	0:48.873	3:51.59	17:03.710

HIZ DEĞİŞTİRME FAALİYETLİ TEK MAKİNELİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN EN KISA YOL TABANLI BİR ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Çözüm yöntemi, oluşturulan test problemleri üzerinde denenmiş ve kabul edilebilir sürelerde çözüm verdiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, tahmin edilebileceği üzere, büyük boyutlu problemlerde çözüm süresinin uzadığı görülmektedir. Ele alınan problemde optimumluğu ispatlanmış bir yöntem bulunmadığından, çözüm değeri üzerinden karşılaştırma yapılması mümkün olmamıştır. Buna karşın, Tablo 3'ten görüleceği üzere, 500 işin bulunduğu çok büyük boyutlu problemlerde bile ortalama 17 dk içerisinde çözüm bulunabilmektedir. Kullanılan yöntemin hızlı bir şekilde çözüme ulaşılması ve çok sayıda olası sıralamanın karşılaştırılabilmesine imkan vermesi, önemli avantajlar olarak öne çıkmaktadır.

4. SONUÇLAR

Çizelgeleme literatüründe kabul gören temel varsayımlardan biri olan işlem zamanlarının sabitliği, gerçek hayat problemlerinin çözümünde önemli kısıtlardan biri haline gelmiştir. Uygulamada, çeşitli nedenlerle işlem zamanları değişebilmekte ve bakım onarım çalışmaları ile iyileştirilebilmektedir. Mevcut sabit hızların veya sabit işlem zamanlarının değiştirilmesine imkan veren bu faaliyetler literatürde hız değiştirme faaliyetleri (HDF) olarak adlandırılmaktadır.

HDF gerçekleştirilen sistemlerde işlerin işlem zamanları, ilgili bakım faaliyetinden önce veya sonra çizelgelenmelerine bağlı olarak değişmekte; bu nedenle HDF faaliyetinin başlangıç zamanı bir karar değişkeni olarak ortaya çıkmaktadır. Genel olarak, HDF'den sonra çizelgelenmiş olan işlerin işlem zamanları önceki duruma kıyasla daha kısa olma eğilimindedir. Bu sistemlerde karşılaşılan temel problemler, iş sırası ve bu iş sırası içindeki HDF konumunun belirlenmesidir.

Bu çalışmada, farklı işlem zamanlarına sahip işlerin gerçekleştirildiği tek makineli bir sistem üzerinde durulmuş ve HDF ataması ile ilgili literatürde ilk defa olarak şebeke yapısı kullanılmıştır. Problem çözümünde farklı kısıtların dikkate alındığı daha karmaşık yapılarda da kullanılabilir, içerisinde tam sayılı programlama ile birlikte yerel arama prosedürü barındıran şebeke tabanlı bir yaklaşım oluşturulmuştur. Önerilen iki aşamalı algoritmanın ilk aşamasında oluşturulan iş sırasına göre kurulan şebeke üzerinde ikinci aşamada kullanılan doğrusal programlama ile HDF ataması yapılmakta ve toplam tamamlanma zamanı elde edilmektedir. Yerel arama prosedüründe, iş sıralarının güncellenmesi *swap* operasyonu (ikili değişim) ile sağlanmaktadır. Böylece, seçilen iki işin sıralarının değiştirilmesi ile elde edilen yeni çözümler üzerinde sürekli karşılaştırmalar yapılarak son çözüm elde edilmektedir.

Problemde iş sayısı, işlere ait işlem zamanları, HDF zamanı ve değiştirme oranı değeri olmak üzere dört temel parametre bulunmaktadır. Önerilen algoritmanın etkinliğinin gözlenebilmesi amacıyla her bir parametre için küçük, orta ve büyük boyutlu veriyi temsil eden test problemleri üretilmiştir. Üretilen test problemleri üzerinde çalıştırılan algoritmanın oldukça hızlı sonuç verdiği görülmüştür. Bununla birlikte, kullanılan yerel arama prosedürü, ilgili bitirme şartının değiştirilmesi ile çok daha fazla deneme yapmaya izin verebileceğinden daha iyi sonuçlar elde edilebilme olasılığı da bulunmaktadır.

Çalışmada önerilen çözüm yöntemi tek makineli ve tek HDF'nin bulunduğu duruma yönelik olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, birden fazla HDF kullanımının ve farklı hücre yapılarının dikkate alındığı çalışmalara da literatürde rastlanmaktadır. Sunulan yöntemin bu gibi problemlere uyarlanabilmesinin de mümkün olduğu öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] LEE C.Y., LEON V.J., "Machine Scheduling with a Rate Modifying Activity", European Journal of Operations Research, 128, 119-128, 2001.
- [2] WHITAKER, L.O., Integrated Production and Maintenance Activities, M.S. Thesis, Department of Industrial Engineering, Texas A&M University, College Station, TX, 1996.
- [3] LEE, C.Y., LIN, C.S., "Single Machine Scheduling with Maintenance and Repair Rate-Modifying Activities", European Journal of Operational Research, 135, 495-513, 2001.
- [4] MOSHEIOV, G., SIDNEY, J., "New Results on Sequencing with Rate Modification", Information Systems and Operational Research, 41(2), 155-163, 2003.
- [5] MOSHEIOV G., ORON D., "Due-Date Assignment and Maintenance Activity Scheduling Problem", Mathematics & Computer Modelling, 44, 1053-1057, 2006.
- [6] GORDON V.S., TARASEVICH A.A., "A Note: Common Due Date Assignment for a Single Machine Scheduling with the Rate-Modifying Activity", Computers & Operational Research, 36, 325-328, 2009.
- [7] WANG X.Y., WANG M.Z., "Single Machine Common Flow Allowance Scheduling with a Rate-Modifying Activity", Computers & Industrial Engineering, 59(4), 898-902, 2010.

G.D. BATUR SİR

- [8] MOSHEIOV G., SIDNEY J.B., “Scheduling a Deteriorating Maintenance Activity on a Single Machine”, *Journal of the Operational Research Society*, 61, 882-887, 2010.
- [9] ZHAO C., TANG H., “A note to due-window assignment and single machine scheduling with deteriorating jobs and a rate-modifying activity”, *Computers & Operations Research*, 39(6), 1300-1303, 2010.
- [10] ZHU Z., CHU F., SUN L., LIU M., “Single machine scheduling with resource allocation and learning effect considering the rate-modifying activity”, *Applied Mathematical Modelling*, 37, 5371-5380, 2013.
- [11] BAI, J., LI, Z.R., WANG, J.J., HUANG, X., “Single machine common flow allowance scheduling with deteriorating jobs and a rate-modifying activity”, *Applied Mathematical Modelling*, 38, 5431-5438, 2014.
- [12] YU, S., “An optimal single-machine scheduling with linear deterioration rate and rate-modifying activities”, *Journal of Combinatorial Optimization*, 30, 242-252, 2015.
- [13] LI, J., LI, X., LUO, W., “Single-machine scheduling with discretely controllable job processing times subject to a deteriorating rate-modifying activity”, *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, 35(3), 194-206, 2016.
- [14] CHUNG, T., GUPTA, J.N.D., QIU, M., “Single machine scheduling problem with batch setups involving positional deterioration effects and multiple rate-modifying activities”, *Engineering Optimization*, 1-18, 2018.
- [15] PINEDO, M.L., *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [16] BATUR SİR, G.D., “Hız değiştirme faaliyeti ile tek makineli çizelgeleme problemi için şebeke tabanlı bir matematiksel model”, *Proceedings of the International Conference on Mathematics – Engineering – Natural & Medical Sciences*, Adana, 142-147, Türkiye, 2019.
- [17] MILLER C., TUCKER A., ZEMLIN R., “Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems”, *Journal of the ACM*, 7(4), 326-329, 1960.