

## BİR İPLİK FABRİKASINDA SİPARİŞLERİN ÇİZELGELENMESİ

Çiğdem ŞENBAY<sup>1</sup>, Tuğba SARAÇ<sup>2</sup>, Ezgi AKTAR DEMİRTAŞ<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Endüstri Müh. Bölümü, ESKİŞEHİR

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-3414-6978>

<sup>2</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Endüstri Müh. Bölümü, ESKİŞEHİR

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-8115-3206>

<sup>3</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Endüstri Müh. Bölümü, ESKİŞEHİR

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-3762-6256>

### Anahtar Kelimeler

Paralel makine çizelgeleme,  
Sıra bağımlı hazırlık süresi,  
Çok amaçlı çizelgeleme,  
Tavlama benzetimi,  
Hızlı moda sektörü.

### Öz

*Bu çalışmada, iplik üretimi yapan bir tekstil firmasında yaşanan çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Firmada üretilen ürünler birbiri ile aynı özelliklere sahip makinalardan birisinde işlem görmek zorundadır. Üretim öncesinde makine temizliği yapılmakta, temizlik süresi önceki işin rengine bağlı olarak uzun ya da kısa sürebilmektedir. Söz konusu hızlı servis olduğu için, makinelerin temizlik sürelerinin azaltılması demek, hem su tüketiminin azaltılması hem de servis sürelerinin iyileştirilmesi anlamına gelmektedir. Bu problem literatürde sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş paralel makine çizelgeleme olarak adlandırılmaktadır. Tekstil firması, hızlı moda sektöründeki müşterilere hizmet verdiği için, servis göstergelerinde hız ön plana çıkmaktadır. Hızlı moda sektöründe, tasarımdan satışa sunum, üç hafta gibi kısa sürelerle düştüğü için, tüm siparişlerin kısa bir süre içinde tamamlanabilmesi kritik bir hal almakta ve her geciken sipariş, müşteri firmaların üretim hatlarında duruşlara veya müşteri kayıplarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada geç tamamlanan işlerin sayısının ve en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Problemin Np-zor doğası gereği kesin çözüm yöntemleri ile büyük boyutlu problemlere makul süreler içinde uygun bir çözüm bulabilmek güçtür. Bu nedenle, problemin çözümü için bir tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir. Önerilen algoritma Visual Basic ile kodlanarak firmanın günlük kullanımına uygun bir arayüz ile birlikte sunulmuştur. Önerilen yöntemle elde edilen çizelgeler, firmada kullanılmakta olan çizelgelerle karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.*

## SCHEDULING OF ORDERS IN A THREAD COMPANY

### Keywords

Parallel machine scheduling,  
Sequence dependent setup  
time,  
Multi-objective scheduling,  
Simulated annealing,  
Fast fashion.

### Abstract

*In this study, a scheduling problem which is experienced in a thread producer textile company is considered. The products must be processed in one of the identical machines. The machine is cleaned before production, and the cleaning time may take longer or shorter depending on the color of the previous job. As it is about fast service, reducing the cleaning times of the machines means both reducing water consumption and improving service times. Considered problem is called as parallel machine scheduling with sequence dependent setup times in the literature. Because that producer's main customers are fast fashion companies, in the service indicators, speed is becoming the most important factor. In the fast fashion industry, the time from design to stores are reduced to three weeks, so completing all jobs in a short time are becoming very critical and every delayed job may end with stoppage of customers' production lines or loss of customers. Therefore, in this study, it is aimed to minimize the makespan and the total number of tardy jobs. Due to the Np-hard nature of the problem, it is difficult to find an exact solution to large-sized problems in a reasonable time. Therefore, a simulated annealing algorithm is*

\* Sorumlu yazar; e-posta : [eaktar@ogu.edu.tr](mailto:eaktar@ogu.edu.tr)



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*proposed for the solution of the problem. The proposed algorithm was coded in Visual Basic and presented with an interface suitable for daily use of the company. The schedules obtained with the proposed method are compared with the schedules used in the company and the obtained results were interpreted.*

Araştırma Makalesi		Research Article	
Başvuru Tarihi	: 10.06.2020	Submission Date	: 10.06.2020
Kabul Tarihi	: 19.02.2021	Accepted Date	: 19.02.2021

## 1. Giriş

İşletmelere rekabet üstünlüğünü sağlayan üç temel unsur; zaman, kalite ve maliyettir. Pazarda yüksek kalitede ve düşük maliyetli üretim yapan firma sayısı arttıkça; pazar payını önemli ölçüde hız, yani siparişin alınışından teslim edilmesine kadar geçen sürenin kısalığı belirlemektedir. Bu nedenle, aldıkları siparişleri zamanında ve mümkün olduğunca kısa sürede teslim eden firmalar rekabet üstünlüğü sağlamaktadır. Ele alınan problemin yaşandığı tekstil sektöründe son dönemde gittikçe yaygınlaşan hızlı moda akımı ile ürün tasarımından başlayarak mağazalara ürünün teslim edilmesine kadar geçecek sürenin en fazla üç hafta olması beklenmekte ve bu durum hazır giyim tedarikçileri üzerinde ciddi bir zaman baskısı yaratmaktadır. Türkiye konum olarak, Avrupa pazarının en önemli tekstil tedarikçilerinden olup, Asya pazarına kıyasla termin konusunda daha hassas müşteriler tarafından tercih edilmektedir.

Pek çok tekstil firmasında ürünlerin, birbiri ile aynı özelliklere sahip makinalardan birisinde işlem görmesi gerekmektedir. Her yeni ürünün üretimi öncesinde ilgili makine temizlenmektedir. Makine temizliği için gerekli süre bir başka değişle hazırlık süresi makinada son yapılan işin rengine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle işlerin etkin bir şekilde sıralanması ile hazırlık sürelerinin dolayısıyla üretim sürelerinin kısaltılabilmesi mümkündür. Söz konusu hızlı servis olduğu için, hazırlık sürelerinin azaltılması demek, hem su tüketiminin azaltılması hem de üretim sürelerinin iyileştirilmesi anlamına gelmektedir. Bu problem literatürde sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş paralel makine çizelgeleme problemi olarak adlandırılmaktadır.

Literatürde genellikle tek amaçlı olarak karşımıza çıkan pek çok paralel makine çizelgeleme probleminden farklı olarak bu çalışmada, hem enbüyük tamamlanma süresinin hem de toplam geciken iş sayısının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Ele alınan problem için bir matematiksel model önerilmiştir. GAMS'in CPLEX çözücüsü ile çözülemeyen büyük boyutlu problemlerin çözülebilmesi için de bir tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiş ve bu algoritma Visual Basic ile kodlanarak günlük kullanıma uygun bir arayüz ile kullanıcılara sunulmuştur.

Çalışmanın izleyen bölümünde çizelgeleme problemleri ve literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ele alınan problem tanıtılmış ve problemin

matematiksel modeli verilmiştir. Dördüncü bölümde, geliştirilen tavlama benzetimi algoritması ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Beşinci bölümde, deneysel sonuçlar, son bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur.

## 2. Çizelgeleme Problemleri ve Literatür Araştırması

Bir çizelgeleme problemi literatürde  $\alpha / \beta / \gamma$  üçlü gösterimi kullanılarak tanımlanır. Bu gösterimde,  $\alpha$  makine ortamına,  $\beta$  işlem özelliklerine ve kısıtlara,  $\gamma$  ise ele alınan amaçlara karşı gelmektedir (Pinedo, 2002). Çizelgelemenin ne ölçüde başarılı olduğunu değerlendirmek için tek bir performans ölçütü kullanılabileceği gibi birden fazla ve birbirleriyle çelişen ölçütler de kullanmak mümkündür (Nelson, Sarin ve Daniels, 1986).

Paralel makine çizelgeleme problemleri tek makine çizelgeleme problemlerine göre oldukça zordur. Paralel makine çizelgeleme problemleri, aynı işi yapabilen  $m$  adet makinenin paralel olarak çalıştığı üretim sistemleriyle ilgilenir. Her iş yalnız bir operasyona sahiptir ve bu  $m$  makinenin herhangi birinde işlenebilir. Paralel makineler aynı hızda olabileceği gibi, farklı hızlarda da olabilir. Paralel makineli bir üretim sisteminde özdeş, düzgün ve bağımsız makinelerden söz edilebilir. Paralel makina çizelgeleme problemleri NP-zor problemler sınıfında yer almakta ve çözümleri için çoğunlukla sezgisel ya da meta-sezgisel yöntemler kullanılmaktadır (Akyol, 2013).

Sezgisel yöntemler, belirli bir yordamın izlenmesi ve belirli varsayımların yapılması yoluyla, problemin çözümüne yönelik yaklaşık sonuçlar verir. Kesin çözüm yöntemleri ise eniyi çözümü garanti edebilmekle birlikte NP-zor problemlerin büyük boyutlu olanlarına çözüm bulabilmeleri zordur. Sezgisel yöntemler basit sıralama kurallarının yanı sıra, genetik algoritma, karınca koloni algoritması, yasaklı arama, tavlama benzetimi gibi çeşitli meta-sezgisel yöntemlerden oluşmaktadır.

Paralel makine çizelgeleme problemleri, son yıllarda araştırmacılar tarafından yoğun olarak çalışılmıştır. Literatürde son işin tamamlanma zamanı ( $C_{enb}$ ) ve/veya toplam geciken iş sayısı ( $\sum U_i$ ) amaçlarını dikkate alan paralel makine çizelgeleme problemi konulu çalışmalardan erişilebilenler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'den de görülebileceği gibi çalışmaların önemli bir kısmında (Kaya ve Karaçizmeli, 2018; Akyol ve Saraç,

2017; Hamzadayı ve Yıldız, 2017; Lee, Lei ve Pinedo, 2012; Lin, Lee, Ying ve Lu, 2011; Kang ve Shin, 2010; Moghaddam, Taheri, Bazzazi, Izadi ve Sassani, 2009; Chen ve Powell, 2003; Gupta ve Torres, 2005; M'Hallah ve Bulfin, 2003; Lin ve Jeng, 2004) özdeş paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Dikkate aldıkları kısıtlar açısından incelendiğinde sıra bağımlı hazırlık sürelerini dikkate alan çalışmaların (Kaya ve Karaçizmeli, 2018; Akyol ve Saraç, 2017; Hamzadayı ve Yıldız, 2017, Lee ve diğ., 2012; Lin ve diğ., 2011; Kang ve Shin, 2010; Moghaddam, ve diğ., 2009; Chen ve Powell, 2003; Saricicek, 2020; Afzalirad ve Rezaeian, 2016; Chen ve Chen, 2008) çoğunlukta olduğu göze çarpmaktadır. Amaç fonksiyonları açısından bakıldığında ise en çok incelenen amaç fonksiyonunun  $C_{enb}$  olduğu görülmektedir. Bu çalışmada ele alınan problem literatürde en çok dikkate alınmış olan özellikleri taşımaktadır. Sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş paralel makine çizelgeleme problemidir. Öte yandan erişilebilen literatür incelendiğinde  $C_{enb}$  ve  $\sum U_j$  amaçlarını birlikte ele alan hiçbir çalışmaya erişilememiştir. İlk defa bu çalışmada  $C_{enb}$  ve  $\sum U_j$  amaçları birlikte ele alınmıştır.

Tablo 1'de yer alan çalışmalar çözüm yöntemleri açısından incelendiğinde az sayıda çalışmada (Akyol ve Saraç, 2017; M'Hallah ve Al-Khamis, 2015; M'Hallah ve Bulfin, 2003) kesin çözüm yöntemlerinin kullanıldığı çalışmaların önemli bir kısmında karınca kolonileri (Kaya ve Karaçizmeli, 2018), tavlama benzetimi (Hamzadayı ve Yıldız, 2017; Gupta ve Torres, 2004; Saricicek, 2020; Kim ve Kim, 2020; Lin ve Ying, 2015), genetik algoritma (Hamzadayı ve Yıldız, 2017; Moghaddam, ve diğ., 2009; Afzalirad ve Rezaeian, 2016) gibi meta-sezgisel algoritmaların tercih edildiği görülmektedir. Tavlama benzetimi algoritmasının hem  $C_{enb}$  amacını (Hamzadayı ve Yıldız, 2017; Saricicek, 2020) hem de  $\sum U_j$  amacını (Gupta ve Torres, 2005) dikkate alan paralel makine çizelgeleme problemlerinde başarıyla uygulandığı göze çarpmaktadır. Ancak ilk defa bu çalışmada her iki amacı birlikte ele alan bir paralel makine çizelgeleme probleminin çözümü için kullanılmıştır.

Tablo 1

## Literatür taraması

Yazar ve Yılı	Problemin gösterimi	Çözüm yaklaşımı
Kaya ve Karaçizmeli, 2018	$P_m/S_{ij}/C_{enb}, C_{avr}$	Karınca kolonileri algoritması
Akyol ve Saraç, 2017	$P_m/S_{ij}, M_j, res/C_{enb}$	Karma tamsayı doğrusal programlama
Hamzadayı ve Yıldız, 2017	$P_m/S_{ij}/C_{enb}$	Tavlama benzetimi ve Genetik Algoritma
Lee ve diğ., 2012	$P_m/S_{ij}/C_{enb}, L_{enb}, \sum U_j$	Pseudopolynomial algoritma
Lin ve diğ., 2011	$P_m/S_{ij}, r_j/L_{enb}$	Geliştirilmiş Greedy sezgisel
Kang ve Shin, 2010	$P_m/S_{ij}/L_{enb}, C_{enb}, \sum U_j$	Çözüm uzayı tabanlı yerel arama algoritması
Moghaddam, ve diğ., 2009	$P_m/S_{ij}, Prec/C_{enb}$	Genetik algoritma
Chen ve Powell, 2003	$P_m/S_{ij}/\sum w_j U_j$	Dal sınır algoritması
Gupta ve Torres, 2005	$P_m//\sum U_j, \sum C_j$	Tavlama benzetimi
M'Hallah ve Bulfin, 2003	$P_m//\sum w_j U_j, \sum U_j$	Dal sınır algoritması
Lin ve Jeng, 2004	$P_m/batch/L_{enb}$ $P_m/batch, \sum U_j$	Dinamik programlama ve sezgiseller
Saricicek, 2020	$R_m/S_{ij}, M_j/C_{enb}, MP$	Tavlama benzetimi
Afzalirad ve Rezaeian, 2016	$R_m/r_j, S_{ij}, Prec, res/C_{enb}$	Genetik algoritma ve yapay bağışıklık sistemi
Chen ve Chen, 2008	$R_m/S_{ij}/\sum w_j U_j$	Yasaklı arama
Kim ve Kim, 2020	$R_m/brkdown/C_{enb}$	Tavlama benzetimi
M'Hallah ve Al-Khamis, 2015	$R_m/d_j/\sum w_j U_j$	Dal sınır algoritması
Lin ve Ying, 2015	$R_m//\sum w_j C_j, \sum w_j U_j, C_{enb}$	Tavlama benzetimi

### 3. Ele Alınan Problem ve Matematiksel Model

Uygulamanın yapıldığı tekstil firması birçok ülkede hizmet gösteren kurumsal ve küresel bir firma olup, yönetim olarak Avrupa Tedarik Zincirinin bir parçasıdır.

Söz konusu işletme için, hızlı servis, müşterileri kazanmak ve/veya elde tutmak için çok önemlidir. Bu nedenle çizelgeleme yönteminde yapılacak her türlü iyileştirme servisin iyileştirilmesine de hizmet edecektir.

Firmanın en önemli faaliyet alanı; endüstriyel iplik olarak adlandırılan, hazır giyim, ayakkabı, otomotiv, ev tekstili ve yatak üreticilerine yönelik ürünlerdir. Endüstriyel iplik ürünleri kendi içinde; tekstil sektöründe "Apparel", otomotiv ve daha özel ürün gruplarında ise "Performans Malzemeleri" olarak ikiye ayrılmaktadır:

**Apparel İplik Ürünleri:** Apparel ürün grubunda, üretimi olan toplam 137 farklı ürün olup bunların en yaygın olanları PPC (Poly / PolyCorespun), PCC (Poly/ Cotton Corespun), COT (Pamuk)'tur.

**Performans Malzemeleri:** Bu ürün grubuna dâhil üretimi olan toplam 692 farklı ürün olup bunların en yaygın olanları ise, NS (Nylon Soft), NB (Nylon Bonded), KEV (Kevlar) olup, genellikle bu ürün grubunun yanmazlık, sızdırmazlık gibi özellikleri vardır. Emniyet kemeri, hava yastığı, balık adam kıyafetleri, itfaiyeci kıyafetleri gibi özel ürünlerde kullanılır.

İşletme 2007 yılından bu yana Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) sistemlerinden SAP R/3'ü birçok bileşeni ile aktif olarak kullanmaktadır. Firmada SAP R/3'ün yanı sıra tedarik zinciri, ve çizelgelemeye daha detaylı destek veren SAP-APO (Advanced Planner and Optimizer) da kullanımdadır. SAP-APO sisteminden biraz bahsetmek gerekirse, çizelgeleme problemlerinde, doğrusal programlama, tam sayılı programlama ve genetik algoritmalar kullanan, amaç fonksiyonlarının katsayılarını değiştirme esnekliği sağlayan, birçok planlamacının aynı anda plan üzerinde değişiklikler yapabildiği bir sistemdir.

Firma daha önce belirtildiği gibi mevcut tedarik zinciri içerisinde Avrupa'ya bağlı olup, çoğu zaman söz konusu sistemleri bir son kullanıcı olarak kullanmaktan öteye gidememekte, yerel ihtiyaçlara göre yapılması gereken değişikliklerde zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle en popüler ERP sistemleri kullanılıyor olsa da, sistemler amaca ve beklentilere uyarlanmadığından, sonuçlar etkili olmaktan uzaklaşmaktadır.

İşletmede gerek Apparel, gerekse Performans malzemeleri ürünlerinin boya geçişleri yukarıda daha önce belirtilen ürün gruplarına göre değişiklik gösterdiğinden, işlem süreleri de bu gruplara göre değişmektedir.

Gün içerisinde her ürün grubundan alınan tüm siparişler, müşteri hizmetleri tarafından belirlenen termin bilgisi ile birlikte sistem havuzunda toplanmaktadır. Termini öncelikli olarak müşteri belirlemede, ancak müşterinin terminde esnek olduğu durumlarda ise, SAP sistemine daha önce tanımlanmış olan işlem sürelerine göre termin verilmekte, bu aşamada makine dolulukları dikkate alınmamaktadır.

Tüm siparişler için üretim onayı, günlük kapasite dikkate alınarak aynı anda yapılmaktadır. İşletmede mevcut durumda, çizelgeleme işlemi; tüm müşteri siparişlerinin, termine göre sıralanmasıyla yapılmakta, renkler arası geçişlerde yaşanan hazırlık süreleri birebir dikkate alınmadan blok planlamasına uygun olarak sıralanmaktadır. Blok planlaması makinelerin daha önceden açık, orta ve koyu renkli işlere tahsis edilmesi ve atamaların bu kurala uygun olarak makinelerin yük dengelerini dikkate almadan yapıldığı bir planlama biçimidir. İlk aşamada yük dengesi gözetilmediğinden bir sonraki aşamada planlamacılar makine yüklerini eşitlemeye çalışılmakta, bu da makinelerdeki renk geçişlerini ve buna bağlı olarak da makine temizliği sayısını ve süresini artırmaktadır. Artan hazırlık süresi hem zaman kaybına, dolayısıyla, üretim sürelerinin uzamasına, hem de su kaybına, dolayısıyla maliyet artışına yol açmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada sıra bağımlı hazırlık süreleri dikkate alınmış ve hem geciken iş sayısının, hem de enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Enbüyük tamamlanma zamanının küçültülmesi makinelerin daha dengeli planlanmasına, geciken iş sayısının azaltılması da müşteri tatmininin artmasına yardımcı olacaktır.

#### 3.1. Matematiksel Model

Atölyeye gelen  $n$  iş, sıfırıncı zamanda işlem için hazırır. İşlerin işlem süreleri, sıralamaya bağlı hazırlık süreleri ve teslim zamanları belirlidir. İşler ( $j=1,2,\dots,n$ ), mevcut paralel makinelerin ( $i=1,2,\dots,m$ ) herhangi birinde işlem görebilir. Makineler kapasite ve kullanım açısından özdeştir.

Çalışmada, 1-4 kg arası boyama yapan makinelerin çizelgenmesi problemi ele alınmıştır. İşletmede bu aralıkta boyama yapan özdeş 20 makine bulunmakta ve günlük olarak ortalama 250 sipariş onaylanmaktadır. Makine hazırlık süreleri renk grubuna bağlı olarak önceden bilinmektedir ancak sıra bağımlı olduğundan işlem süresine dâhil edilmemiştir. Başlangıç hazırlık süreleri dikkate alınmamıştır. İşlerin bölünmesine izin verilmez. Makineler çizelgeleme periyodu süresince çalışmaktadır ve bir makinede aynı anda sadece bir iş yapılabilmektedir. Terminler, yoğunlukla müşteri tarafından belirlenmekte, müşterinin terminde esnek olduğu durumlarda ise müşteri temsilcisi sistemde kayıtlı işlem sürelerine göre termin belirlemektedir. Problemden sadece müşteri siparişleri için yapılan üretim dikkate alınmakta, stoğa yapılan üretim toplu

olarak daha büyük makinelerde boyandığı için kapsam dışında tutulmaktadır.

Ele alınan problemde, özdeş  $m$  paralel makine olup, işler arası geçişlerde sıra bağımlı hazırlık süreleri söz konusu olduğundan problem  $P_m / S_{ij} / \sum U_j, C_{enb}$  şeklinde gösterilebilir.

**Kümeler:**

$N = \{1, 2, \dots, n\}$  iş kümesi

$L = \{1, 2, \dots, m\}$  makine kümesi

**İndisler:**

$j, t \in N$  (iş indisleri)

$k \in N$  (sıra indisi)

$i \in L$  (makine indisi)

**Parametreler:**

$n$ : iş sayısı

$m$ : makine sayısı

$M$ : yeterince büyük pozitif sayı

$p_j$ :  $j$ . işinin işlem süresi

$d_j$ :  $j$ . işinin teslim zamanı

$s_{jt}$ :  $j$  işi,  $t$  işinden sonra işlem görüyorsa hazırlık süresi

$CUST$ :  $C_{enb}$  ( $f_2$  amaç fonksiyonu) için bir üst sınır değeri

$$CUST = \sum_{j=1}^n P_j + \sum_{j=1}^n \left( \frac{\sum_{t=1, j \neq t}^n S_{jt}}{n} \right) \quad (1)$$

**Karar Değişkenleri:**

$q_{ik}$ :  $i$  makinesinin  $k$ . sırasındaki işin üretim süresi

$b_{ik}$ :  $i$  makinesinin  $k$ . sırasındaki işin teslim zamanı

$h_{ik}$ :  $i$  makinesinin  $k$ . sırasındaki işin hazırlık süresi ( $k > 1$  ise)

$c_{ik}$ :  $i$  makinesinin  $k$ . sırasındaki işin tamamlanma zamanı

$C_{enb}$ : son işin tamamlanma zamanı

$x_{ijk}$ : eğer  $j$ . iş,  $i$  makinesinin,  $k$ . sırasına atandıysa 1; diğer durumda 0.

$y_{itjk}$ : eğer  $j$ . iş,  $i$  makinesinin,  $k$ . sırasına  $t$  işinden sonra atandıysa 1; diğer durumda 0.

$u_{ik}$ :  $i$  makinesinin  $k$ . sırasındaki iş geciktiyse 1; diğer durumda 0.

**Amaç Fonksiyonları:**

$$enk f_1 = \sum_i \sum_k u_{ik} \quad (2)$$

$$enk f_2 = C_{enb} \quad (3)$$

Çok amaçlı bir problemin, tek amaçlı bir yapıya dönüştürülmesine amaçların birleştirilmesi denmektedir. Amaç birleştirme teknikleri ile çok amaçlı bir eniyileme problemi, tek amaçlı hale getirilebilir. Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi, Epsilon kısıt yöntemi, Benson skalerleştirme yöntemi, Konik skalerleştirme yöntemi en yaygın kullanılan yöntemlerdendir (Özsüt, 2015). Bu çalışmada ele alınan iki amaç fonksiyonunu birleştirmek için ağırlıklı toplam

yöntemi kullanılmıştır. Her iki amacın öneminin aynı olduğu varsayıldığından amaçlar ağırlıklarla çarpılmamıştır. İlgili amaç fonksiyonları (4) no'lu denklemde görüldüğü gibi normalleştirilerek birleştirilmiştir:

$$enk z = (f_1/n) + (f_2/CUST) \quad (4)$$

**Kısıtlar:**

$$b_{ik} = \sum_j d_j x_{ijk} \quad \forall i, k \quad (5)$$

$$q_{ik} = \sum_j p_j x_{ijk} \quad \forall i, k \quad (6)$$

$$h_{ik} = \sum_j \sum_{t \neq j} s_{tj} y_{itjk} \quad \forall i, k | k > 1 \quad (7)$$

$$c_{ik} = q_{ik} \quad \forall i, k | k = 1 \quad (8)$$

$$c_{ik} = c_{ik-1} + q_{ik} + h_{ik} \quad \forall i, k | k > 1 \quad (9)$$

$$\sum_j x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i, k \quad (10)$$

$$\sum_i \sum_k x_{ijk} = 1 \quad \forall j \quad (11)$$

$$\sum_j x_{ijk} - \sum_t x_{itk-1} \leq 0 \quad \forall i, k | k > 1 \quad (12)$$

$$1 + y_{itjk} \geq x_{ijk} + x_{itk-1} \quad \forall i, t, j | j \neq t, k | k > 1 \quad (13)$$

$$y_{itjk} \leq x_{itk-1} \quad \forall i, t, j | j \neq t, k | k > 1 \quad (14)$$

$$y_{itjk} \leq x_{ijk} \quad \forall i, t, j | j \neq t, k | k > 1 \quad (15)$$

$$C_{enb} \geq c_{ik} \quad \forall i, k \quad (16)$$

$$b_{ik} - c_{ik} \leq M(1 - u_{ik}) + M(1 - \sum_j x_{ijk}) \quad \forall i, k \quad (17)$$

$$c_{ik} - b_{ik} \leq M u_{ik} + M(1 - \sum_j x_{ijk}) \quad \forall i, k \quad (18)$$

$$q_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \quad (19)$$

$$b_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \quad (20)$$

$$h_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k | k > 1 \quad (21)$$

$$c_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \quad (22)$$

$$C_{enb} \geq 0 \quad (23)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (24)$$

$$y_{itjk} \in \{0,1\} \quad \forall i, t, j, k \quad (25)$$

$$u_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \quad (26)$$

$$Kabul\ olasılığı = P(kabul) = e^{-\left(\frac{\Delta E}{kBT}\right)} \quad (27)$$

Modelin amaç fonksiyonları (2) toplam geciken iş sayısı ve (3) son işin tamamlanma zamanının ( $C_{enb}$ ) enküçüklenmesidir. (4) nolu denklemde, söz konusu iki amaç fonksiyonu normalleştirilerek toplanmıştır. Kısıt (5)  $i$  makinenin  $k$  sırasındaki işin teslim zamanını ( $b_{ik}$ ), kısıt (6),  $i$  makinenin  $k$  sırasındaki işin üretim süresini ( $q_{ik}$ ), kısıt (7) ise  $i$  makinenin  $k$  sırasındaki ( $k>1$ ) işin hazırlık süresini ( $h_{ik}$ ) belirlemektedir. Kısıt (8), ilk sıraya atanan, kısıt (9) ise ikinci ve daha sonraki sıralara atanan işlerin tamamlanma zamanlarının hesaplanmasını sağlamaktadır. Kısıt (10) ve kısıt (11) sırasıyla, her makinedeki her sıraya yalnızca bir işin atanmasını ve bir işin yalnızca bir makinenin bir sırasına atanmasını garanti etmektedir. Kısıt (12), işlerin sıralanmadan sıralanmasını sağlamaktadır. Kısıt (13), (14) ve (15)  $x_{ijk}$  ve  $y_{itjk}$  karar değişkenleri arasındaki ilişki kısıtlarıdır. Kısıt (16),  $C_{enb}$  değerinin tamamlanma zamanlarının en büyüğüne eşit ya da büyük olmasını sağlamaktadır. Kısıt (17) ve (18) hangi işlerin geciktiğini belirlemektedir. (19)-(26) numaralı kısıtlar ise işaret kısıtlarıdır.

27 no'lu denklemde yer alan  $T$  ısı seviyesini göstermekteyken  $kB$  Boltzman sabiti olarak da bilinen bir sabittir.

#### 4. Önerilen Çözüm Yaklaşımı

Meta-sezgisel yöntemler, zor ve çözümü uzun süre gerektiren problemler için makul sürede kabul edilebilir sonuçlar veren kesin olmayan çözüm yöntemleridir. Meta-sezgiseller, doğayı taklit edip etmemelerine, hafızalı olup olmamalarına, deterministik veya rassal olmalarına, tek çözüm ve popülasyon temelli olmalarına göre sınıflandırılırlar (Özsüt, 2015). Çalışmada kullanılan Tavlama Benzetimi (TB), bir metalin soğuyarak ve donarak enküçük enerjili kristal yapısına dönüşmesi ile daha genel bir sistemde eniyi çözümün araştırılması arasındaki benzerlikten yararlandığı için doğadan ilham alan bir algoritmadır. İzleyen alt başlıkta TB hakkında genel bilgiler verilmiştir.

#### 4.1.Tavlama Benzetimi

Fiziksel tavlama sürecinde, herhangi bir katı madde erime noktasını aşınca kadar ısıtılır ve ardından katılaşıncaya kadar soğutulursa, bu katı maddenin yapısal özellikleri soğuma hızına bağlı olarak değişir. Örneğin büyük kristaller çok yavaş soğutulacak olursa gelişmeler gözlenebilirken; hızlı soğutulma neticesinde yapılarında birçok bozulmaları barındırır (Reeves, 1995).

Isı yeterli yavaşlıkta düşürüldüğü takdirde her ısı seviyesinde sistem termal eşitliğe ulaşır. Termal eşitlik şöyle tarif edilebilir; daha yüksek ısı seviyesindeki bir nesne daha düşük ısı seviyesindeki bir nesneyle temas halindeyse, yüksek ısı seviyesinden düşük ısı seviyesine sıcaklık transferi olur. Bu işlem her iki nesnenin ısı seviyeleri eşit olduğunda durur. Söz konusu eşitlik "termal eşitlik" olarak adlandırılır. Başka bir ifadeyle, termal eşitlik sağlandığında mevcut ısı seviyesi için sistemde enerji değişikliği gözlenmeyecektir (Cura, 2008).

Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, Teller ve Teller (1958), fiziksel tavlama sürecini taklit etmek için basit bir algoritma geliştirmişlerdir. Aslında önerdikleri algoritma Monte Carlo tekniklerine dayanmaktadır ve yeni fiziksel hallere şu şekilde geçilmektedir: Mevcut  $i$  halindeki enerji  $E_i$ , olsun. Buna göre bir sonraki  $j$  hali,  $i$  halinin biraz bozulmasıyla elde edilir ve enerjisi  $E_j$  ile gösterilir. Eğer enerji farkı,  $E_j - E_i \leq 0$  ise,  $E_j$  hali mevcut hal olarak kabul edilir. Aksi halde  $j$  hali reddedilmez, denklem 27'de verilen olasılığa bağlı olarak kabul edilebilir. TB'nin en önemli avantajı yerel eniyiden kurtulabilme yeteneğidir. Zaman zaman kötüye götüren çözümlerin araştırılması, yerel eniyeye takılmaktan korumaktadır.

Tavlama Benzetiminde sıcaklık sabit değildir, belirli bir iterasyona göre azaltılır. Sıcaklık parametresinin azaltılması, çözüme ulaşmada önemli bir parametredir. Pratikte en çok kullanılan yöntemlerden birisi geometrik azalma fonksiyonudur. Isı seviyesinin düşürülmesi için kullanılan azaltma fonksiyonu  $A(t)$ , aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$c$ : Soğuma oranı

$A(t) = c.t$  ve  $c < 1$  dir. Literatürde  $0,80 < c < 0,99$  arasında seçilir (Cura, 2008).

Tavlama benzetiminin önemli isimlerinden olan Kirkpatrick, Gelatt, ve Vecchi'nin, 1983'te yayınlanan makalesi baz alınarak, çalışmamızda  $c = 0,9$ ,  $T_0 = 10.000$  ve  $T_{son} = 0,1$  olarak seçilmiştir.

#### 4.2.Geliştirilen Çözüm Yöntemi

İşletmelerde karşılaşılan çizelgeleme problemlerinin çözümü, genellikle problem boyutlarının büyük olması nedeniyle, kesin çözüm yöntemleri ile mümkün

olamamaktadır. Bu sebeple, büyük boyutlu çizelgeleme problemlerine, dinamik ve hızlı bir şekilde çözüm bulabilmek adına, bir tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir.

Algoritma adımlarına geçmeden önce, ilk olarak Tavlama benzetiminin gereklerinden olan soğuma programı belirlenir. Başlangıç sıcaklığı, durdurma koşulu ve soğuma fonksiyonu belirlenip gerekli atamalar yapılır. Bu çalışmada ilk sıcaklık ( $T_0$ ) 10.000 ve son sıcaklık ( $T_{son}$ ) 0,1 olarak alınmıştır, soğuma stratejisi olarak sürekli soğuma seçildiğinden Markov zinciri uzunluğu ya da her sıcaklık adımında yapılacak deneme sayısı ise  $L=1$  olarak alınmıştır. Ayrıca durdurma koşulu olarak soğuma sıcaklığının yanı sıra, 10.000 sn toplam çalışma süresi durdurma kriteri de eklenmiştir.

Geliştirilen algoritma adımları şu şekildedir:

*Adım 1:* Tüm işler, işlem sürelerine göre azalan şekilde sıralanır;

*Adım 2:* İlk sıradaki iş, 1. makineye, ikinci sıradaki iş 2. makineye vb. olmak üzere, tüm makinelerin ilk sıralarına birer iş atanır. Böylece ilk  $m$  iş makinelerine atanmış olur.

*Adım 3:*  $(m+1)$ . ve daha sonraki işlerin ataması yapılırken, tüm makinelerdeki işlerin tamamlanma süreleri hesaplanır, hangi makinede işler daha erken tamamlanıyorsa, söz konusu iş o makineye atanır. Bu adım tüm işler tamamlandı, ilk çizelge elde edilene kadar devam edilir. Bu çizelgeleme  $S_0$  olarak atanır;

*Adım 4:* Elde edilen başlangıç çözüm eniyi çözüm olarak atanır ( $S^*=S_0$ );

*Adım 5:* Bu adımda, bir önceki adımda elde edilen çizelgelemeye göre amaç fonksiyonu hesaplanır ( $C(S_0) = C(S^*)$ ).

*Adım 6:* 1 ile  $n$  arasında eşit olmayan 2 rassal sayı üretilir.

*Adım 7:* Üretilen sayılar için çizelgede yer değişimi yapılarak yeni çizelge elde edilir ( $S_1$ ).

*Adım 8:* Yeni çizelge için amaç fonksiyon değeri hesaplanır  $C(S_1)$ .

*Adım 9:* Bir önceki çizelge ile son çizelgenin amaç fonksiyonlarının farkı alınır.

$$\Delta = C(S_1) - C(S_0) \quad (28)$$

*Adım10:*  $\Delta$  değeri negatif ise, yani amaç fonksiyonunda iyileşme varsa,  $S_1 = S^*$  ataması yapılır,  $C(S^*) = C(S_1)$  olarak kaydedilir, *Adım 12* ile devam edilir. Eğer  $\Delta \geq 0$  ise,  $(0,1)$  arasında bir rassal sayı üretilir ve bu sayı  $r$  olarak atanır. Eğer  $e^{-\Delta/T} > r$  ise  $S_1$  çizelgesi ile *Adım 12*'den devam edilir, değilse bir önceki çizelge ile *Adım 12*'den devam edilir.

*Adım 11:*  $T$  daha önce belirlenen fonksiyona göre azaltılarak güncellenir.

$$T = (T * c) \quad (c=0,9) \quad (29)$$

*Adım12:*  $T$  sıcaklığı durdurma sıcaklığı ile karşılaştırılır.  $T \leq T_{son}$  ya da algoritmanın toplam çalışma süresi  $\geq 10.000$  sn. ise *Adım 13*'e gidilir değilse *Adım 6*'ya geri dönlür.

*Adım13:* Eniyi çizelge  $S^*$  ve eniyi amaç fonksiyonu  $C(S^*)$  kaydedilir ve algoritma durdurulur.

Algoritmaya ait deneysel sonuçlar ve örneklere ilerleyen bölümlerde yer verilmiştir.

## 5.Deneysel Sonuçlar

Önerilen matematiksel modelin ve geliştirilen tavlama benzetiminin performanslarını gösterebilmek amacıyla, matematiksel model GAMS/Cplex'te, geliştirilen TB ise Visual Basic Programlama dilinde kodlanmıştır. Farklı boyut ve özellikte 60 adet test problemi türetilerek bu problemler GAMS/Cplex çözücüsü ve önerilen TB algoritması ile çözülmüş ve elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır. Tüm testler Intel Core i5-4200U CPU, 1.6 GHz işlemcili 8 GB Ram kapasitesine sahip bir bilgisayarda yapılmıştır. Son olarak önerilen TB algoritmasının gerçek hayat problemlerinin çözümündeki başarısı iplik fabrikasında yapılan bir uygulama ile gösterilmiştir.

### 5.1.Test Problemlerinin Türetilmesi

Literatürdeki özdeş paralel makine problemleri incelendiğinde, iş sayısının ( $n$ ), küçük boyutlu test problemlerinde yaklaşık 8, orta boyutlu test problemleri için yaklaşık 40 ve büyük boyutlu problemler için yaklaşık 100 alındığı görülmektedir (Akyol, 2013). Bu çalışmada da literatüre uygun olarak, küçük boyutlu problemleri temsilen  $n=8$ , orta boyutlu problemleri temsilen  $n=40$ , büyük boyutlu problemleri temsilen  $n=100$  alınmıştır.

Makine sayıları literatürdeki çalışmalarda farklılıklar göstermekle birlikte, incelenen birçok örnekte en az 2, en çok 6 adet olarak görüldüğü için, problemler  $m=2$  ve  $m=6$  olarak türetilmiştir.

Lin, Fowler ve Pfund (2013), yaptıkları çalışmada, işlem ve hazırlık sürelerini düzgün dağılıma göre aşağıdaki aralıklarda türetmişlerdir. Bu çalışmada da söz konusu kaynaktan esinlenerek işlem ve hazırlık süreleri türetilmiştir.

SDD: Sürekli düzgün dağılım

$$p_j \sim \text{SDD} (1,100)$$

$$s_{ej} \sim \text{SDD} (1,40)$$

Logendran, McDonell, ve Smucker (2006), yaptıkları çalışmada, siparişlerin termin süresi olan  $d_j$ 'leri

türetirken kullanılan dağılımın parametrelerini (a, b) belirlemede ise 30-32 no'lu formülleri kullanılmaktadır.

$$d_j \sim SDD (a, b)$$

$$P = \sum_{j=1}^n (P_j + \beta s_{jt}) / m \quad (30)$$

$$b = P * \left(1 - T + \frac{R}{2}\right) \quad (31)$$

$$a = P * \left(1 - T - \frac{R}{2}\right) \quad (32)$$

CV (coefficient of variation),  $s_{jt}$  dağılımının değişkenlik katsayısı olup 33 no'lu formül ile hesaplanır:

$$CV = \sigma / \mu \quad (33)$$

$s_{jt}$  dağılımının CV değerini bulabilmek için öncelikle  $s_{jt}$  dağılımına ilişkin  $\sigma$  ve  $\mu$  değerleri 34 no'lu formüller yardımı ile hesaplanmıştır.  $s_{jt}$  dağılımına ilişkin parametreler,  $a=1$  ve  $b=40$  olduğundan;

$$\sigma = \sqrt{\frac{(b-a)^2}{12}} \quad \mu = \frac{a+b}{2} \quad (34)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(40-1)^2}{12}} = 11,25$$

$$\mu = \frac{1+40}{2} = 20,5$$

$$CV = 11,25 / 20,5 = 0,549 \text{ dur.}$$

$d_j$ 'leri türetirken kullanılacak olan SDD parametrelerini (a ve b) hesaplayabilmek için 30 no'lu denklemdeki P değerine ve P'yi hesaplayabilmek için ise  $\beta$  değerine ihtiyaç vardır. Logendran ve diğ. (2006), CV ve  $\beta$  değerleri arasında doğrusal ilişki bulunduğu, interpolasyon yöntemi ile belirli bir CV değerine karşılık gelen  $\beta$  değerinin kolayca bulunabileceğini belirtmiştir. CV=1 iken  $\beta=0,1$ 'e ve CV=0,01 iken  $\beta=0,9$ 'a karşılık gelmektedir. Çalışmamızda elde edilen CV=0,549 değerine karşı gelen  $\beta$  aynı yöntemle 0,464 olarak hesaplanmıştır.

31 ve 32 no'lu formüllerdeki T gecikme faktörüdür.

T değeri  $\bar{d}$ : ortalama termin süresi iken; 35 no'lu formül ile hesaplanır. Büyük T değeri sıkı termin, küçük T değeri rahat termin anlamına gelmektedir.

$$T = 1 - \bar{d} / C_{enb} \quad (35)$$

R ise termin faktörü olarak adlandırılmakta,  $d_{enb}$ : en uzun termin,  $d_{enk}$ : en kısa termin iken 36 no'lu formül ile hesaplanmaktadır.

$$R = (d_{enb} - d_{enk}) / C_{enb} \quad (36)$$

Çalışmamızda kullanılan T ve R ikilileri için bir hesaplama yapılmamış olup, Logendran ve diğerlerinin çalışmasındaki T/R ikilileri kullanılmıştır. Bahsedilen ikililer (0,2-0,2), (0,2-0,8), (0,5-0,5), (0,8-0,2) ve (0,8-0,8) şeklindedir. T/R ikililerinden hareketle P değerleri ve P değerlerinden hareketle  $d_j$  dağılımının alt ve üst sınırları (a ve b) hesaplanmıştır. Bu sınırlara göre de  $d_j$ 'ler türetilmiştir.

## 5.2. Örnek Problemler

3 iş - 2 makine ve 5 iş - 2 makine olmak üzere iki örnek problem türetilmiştir. 3 iş - 2 makine problemi Örnek 1, 5 iş - 2 makine problemi ise Örnek 2 olarak adlandırılmıştır. Örnek 1 ve Örnek 2 hem GAMS/Cplex çözücüsü ile hem de önerilen TB algoritması ile çözülmüş ve elde edilen çözümler kıyaslanmıştır. Örnek 1'e ait işlem ve termin süreleri Tablo 2'de, sıra bağımlı hazırlık süreleri ise Tablo 3'de verilmiştir. Tüm süreler saat cinsindedir.

Tablo 2

Örnek1 için işlem ve termin süreleri

j	$p_j$	$d_j$
1	2	5
2	3	7
3	4	9

Tablo 3

Örnek1 için sıra bağımlı hazırlık süreleri

$s_{ij}$	j=1	j=2	j=3
i=1	0	0	0
i=2	2	0	0
i=3	3	2	0

Örnek 2'ye ait işlem ve termin süreleri Tablo 4'te, sıra bağımlı hazırlık süreleri ise Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4

Örnek2 için işlem ve termin süreleri

j	$p_j$	$d_j$
1	3	2
2	5	1
3	6	2
4	7	5
5	4	3



Tablo 5

Örnek2 için sıra bağımlı hazırlık süreleri

$s_{ij}$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$
$i=1$	0	1	2	3	3
$i=2$	1	0	2	3	3
$i=3$	1	2	0	3	3
$i=4$	1	2	3	0	0
$i=5$	1	2	3	0	0

Elde edilen çözümler Tablo 6'da özetlenmiştir. Tablo 6'dan da görülebileceği gibi TB algoritması ile GAMS/Cplex çözümlerine oldukça yakın çözümler makul sürelerde elde edilmiştir.

Tablo 6

Örnek 1 ve Örnek 2 için test sonuçları

Örnek 1	GAMS/Cplex	TB Algoritması
$f_1$	0	1
$f_2$	5	5
$z$	0,45	0,78
süre (sn)	< 1	< 1
Örnek 2	GAMS/Cplex	TB Algoritması
$f_1$	5	5
$f_2$	15	19
$z$	1,45	1,58
süre (sn)	< 1	< 1

Tablo 7

Küçük boyutlu problemlerin ( $n=8$ ) test sonuçları

$m$	$T$	$R$	$CUST$	$f_1$	$f_2$	süre(sn)	GAMS		TB		$z$
							$z$	$f_1$	$f_2$	süre(sn)	
6	0,8	0,8	469	4	206	32,94	0,94	5	221	1,20	1,10
			537	4	231	27,30	0,93	5	240	1,20	1,07
	0,8	0,2	542	5	225	23,53	1,04	5	286	0,99	1,15
			603	5	242	50,45	1,03	6	304	1,09	1,25
	0,5	0,5	570	2	248	21,19	0,69	3	283	0,98	0,87
			462	2	208	26,00	0,70	3	209	1,20	0,83
	0,2	0,8	547	1	220	13,92	0,53	2	271	0,98	0,75
			730	0	357	13,63	0,49	1	369	1,20	0,63
	0,2	0,2	441	1	190	35,53	0,56	1	247	0,98	0,69
			531	1	266	45,39	0,63	2	242	0,98	0,71
	0,8	0,8	524	6	88	436,56	0,92	6	88	0,66	0,92
			530	6	97	711,49	0,93	6	97	0,55	0,93
0,8	0,2	671	8	105	48,13	1,16	8	107	0,66	1,16	
		375	6	80	1696,41	0,96	6	80	0,88	0,96	
0,5	0,5	596	5	105	218,39	0,80	5	113	0,77	0,81	
		450	3	100	346,59	0,60	3	100	0,66	0,60	
0,2	0,8	595	2	121	23,33	0,45	2	130	0,66	0,47	
		459	3	79	136,59	0,55	3	101	0,66	0,60	
0,2	0,2	507	4	89	212,84	0,68	4	99	0,66	0,70	
		485	2	107	176,81	0,47	2	107	0,77	0,47	

### 5.3. Test Problemlerinin Çözümü

Küçük, orta ve büyük boyutlu test problemlerinin GAMS/Cplex ve TB algoritması ile elde edilen sonuçları, sırasıyla Tablo 7, Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 7'de, 2 ve 6 makine, 8 iş, farklı  $T$  ve  $R$  değerleri ile türetilen küçük boyutlu 20 problemin GAMS/Cplex ve TB algoritması ile elde edilen çözümleri verilmiştir. İş sayısı az olan problemlerde GAMS/Cplex çözümcüsü daha iyi sonuç verirken, aynı problemler için TB algoritması eniyiye yakın sonuçları GAMS/Cplex'e göre çok daha kısa bir sürede vermektedir.

Tablo 8'de, 2 ve 6 makine, 40 iş, farklı  $T$  ve  $R$  değerleri ile türetilen orta boyutlu 20 problemin GAMS/Cplex ve TB algoritması ile elde edilen çözümleri verilmiştir. GAMS/Cplex 20 problemin sadece 3 tanesinde çözüm bulabilirken, TB algoritması ile 20 problemde de kısa sürede başarılı sonuçlar bulunmuştur.

Tablo 9'da, 2 ve 6 makine, 100 iş, farklı  $T$  ve  $R$  değerleri ile türetilen büyük boyutlu 20 problemin GAMS/Cplex ve TB algoritması ile çözümleri verilmiştir. GAMS/Cplex 20 problemin hiçbirisine 10.000 saniye içinde uygun çözüm bulamazken, TB algoritması ile tüm problemlere 30 saniyenin altında çözüm bulunmuştur.

Tablo 8

Orta boyutlu problemlerin ( $n=40$ ) test sonuçları

$m$	$T$	$R$	$CUST$	GAMS				TB			
				$f_1$	$f_2$	$süre(sn)$	$z$	$f_1$	$f_2$	$süre(sn)$	$z$
2	0,8	0,8	2761	-	-	10000	N/A	26	1438	9,36	1,17
			3035	-	-	10000	N/A	27	1564	10,22	1,19
	0,8	0,2	2723	34	1502	10000	1,40	34	1334	9,44	1,34
			2834	-	-	10000	N/A	32	1384	10,09	1,29
	0,5	0,5	3072	-	-	10000	N/A	19	1645	8,91	1,01
			2974	21	1405	10000	1,00	23	1520	9,42	1,09
	0,2	0,8	2889	11	1283	10000	0,72	15	1405	10,72	0,86
			2440	-	-	10000	N/A	15	1158	12,33	0,85
0,2	0,2	2791	-	-	10000	N/A	13	1414	12,91	0,83	
		2881	-	-	10000	N/A	13	1398	9,45	0,81	
6	0,8	0,8	3119	-	-	10000	N/A	31	571	5,53	0,96
			2832	-	-	10000	N/A	37	483	6,56	1,10
	0,8	0,2	3033	-	-	10000	N/A	34	590	5,73	1,04
			3028	-	-	10000	N/A	34	557	5,39	1,03
	0,5	0,5	2617	-	-	10000	N/A	18	462	5,66	0,63
			2870	-	-	10000	N/A	22	542	5,52	0,74
	0,2	0,8	3229	-	-	10000	N/A	13	555	5,31	0,50
			2659	-	-	10000	N/A	16	516	4,8	0,59
	0,2	0,2	2715	-	-	10000	N/A	15	473	5,5	0,55
			2754	-	-	10000	N/A	15	513	4,72	0,56

Tablo 9

Büyük boyutlu problemlerin ( $n=100$ ) test sonuçları

$m$	$T$	$R$	$CUST$	GAMS				TB			
				$f_1$	$f_2$	$süre(sn)$	$z$	$f_1$	$f_2$	$süre(sn)$	$z$
2	0,8	0,8	6720	-	-	10000	N/A	74	3377	26,63	1,24
			7574	-	-	10000	N/A	74	4027	28,42	1,27
	0,8	0,2	7416	-	-	10000	N/A	87	3659	25,44	1,36
			6783	-	-	10000	N/A	83	3464	27,83	1,34
	0,5	0,5	6790	-	-	10000	N/A	59	3447	28,33	1,10
			6897	-	-	10000	N/A	57	3530	28,77	1,08
	0,2	0,8	7294	-	-	10000	N/A	33	3736	32,77	0,84
			6542	-	-	10000	N/A	38	3224	33,02	0,87
0,2	0,2	6658	-	-	10000	N/A	57	3391	32,09	1,08	
		6634	-	-	10000	N/A	32	3281	29,36	0,81	
6	0,8	0,8	7458	-	-	10000	N/A	75	1308	26,94	0,93
			6665	-	-	10000	N/A	75	1237	23,39	0,94
	0,8	0,2	7331	-	-	10000	N/A	83	1291	19,86	1,01
			6746	-	-	10000	N/A	84	1194	27,19	1,02
	0,5	0,5	6802	-	-	10000	N/A	60	1293	19,66	0,79
			7582	-	-	10000	N/A	62	1308	21,05	0,79
	0,2	0,8	6804	-	-	10000	N/A	32	1214	22,58	0,50
			7232	-	-	10000	N/A	29	1250	25,5	0,46
	0,2	0,2	7148	-	-	10000	N/A	31	1368	21,98	0,50
			6746	-	-	10000	N/A	36	1215	20,83	0,54

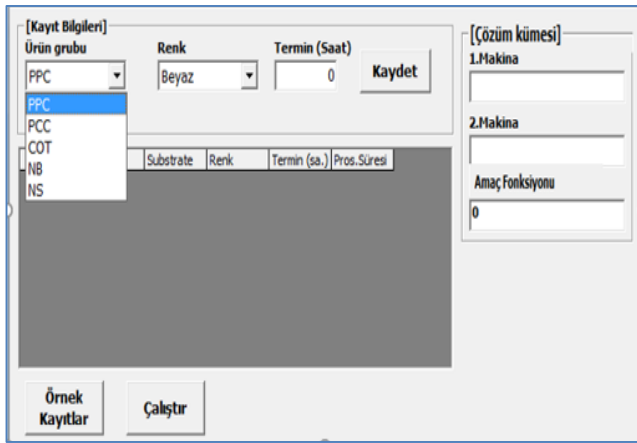
#### 5.4. Bir İplik Fabrikasında Uygulama

Uygulama, "Bir İplik Fabrikasında Siparişlere Hızlı Cevap Verebilecek Bir Çizelgeleme Yaklaşımı" isimli

yüksek lisans tezinin bir bölümünü içermektedir. Tezin hazırlanması aşamasında firmadan gerekli izinler alınmış olup, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Önerilen TB algoritması, Visual Basic programlama dilinde kodlanarak, uygulamanın yapıldığı fabrikanın günlük problemlerinin çözümünde kullanılabilmesi için bir arayüzle birlikte kullanıcılara sunulmuştur. Söz konusu arayüzde, kullanıcıdan istenen bilgiler; ürün grubu, renk ve termin bilgisidir. Girilen bilgiler ışığında, siparişin işlem süresi, başlangıç hazırlık süresi ve işlemler arası hazırlık süresi, programda daha önce tanımlanan matrislerden çekilmektedir. Girilen her sipariş bir kayıt numarası ile kaydedilmektedir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi ürün grubu listesi, 5 farklı gruba içermektedir. İşlem süreleri ürün grubuna göre değiştiğinden kullanıcının bu gruplardan birini seçmesi, işlem süresi ataması için yeterlidir. Programda tanımlı ürün grupları ve işlem süreleri ise Tablo 10'daki gibidir.



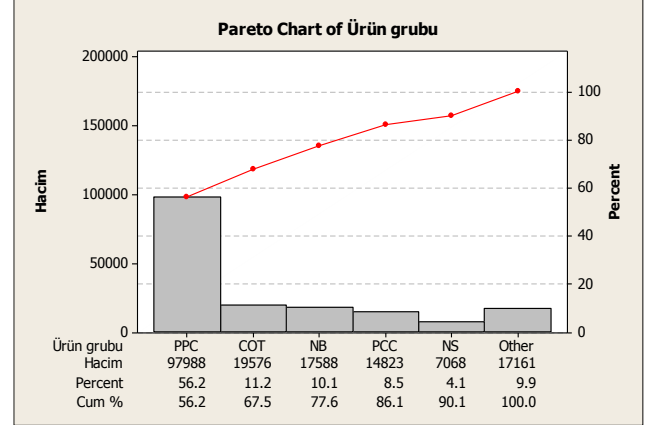
Şekil 1. Geliştirilen Kullanıcı Arayüzü: Ürün Grubu Listesi

Tablo 10

Ürün grubu işlem süreleri

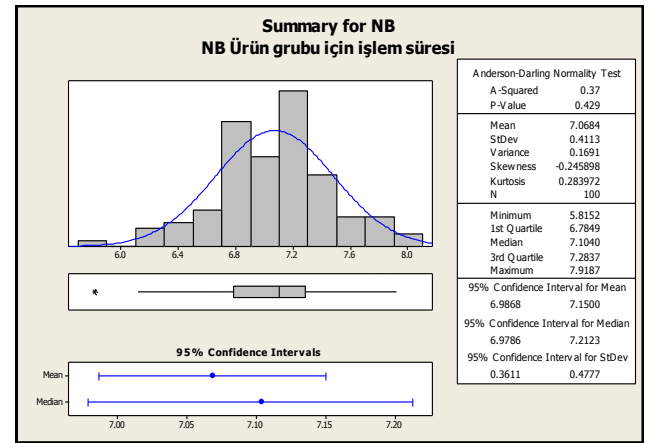
grup	$p_j$ (saat)
PPC	3
PCC	5
COT	6
NB	7
NS	4

Ürün grupları belirlenirken, mevcut sistemdeki tüm ürün grupları işlem sürelerine göre gruplandırılmış, aynı işlem süresine sahip olanlar bir grup altında toplanmıştır. Bu beş grubun seçilmesinin sebebi ise, son altı aylık üretim verilerine göre toplam siparişlerin %90'ını oluşturmasıdır. Kalan %10 ise 17 farklı grubun toplamıdır. Sipariş verilerine ait Pareto diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Ürün Grupları Pareto Diyagramı

İşlem süreleri, SAP sisteminde kayıtlı olmasına rağmen, kontrol amacıyla, son üç ayda gerçekleşen üretim sürelerine ilişkin istatistiksel analizler tüm ürün grupları için yapılmış, sistemdeki verilerle gerçekleşen arasında tutarsızlığın var olup olmadığı araştırılmıştır. Analiz sonucunda SAP sistemindeki verilerin tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. NB ürün grubu işlem sürelerinin dağılımı ve işlem süreleri için normallik testi Şekil 3'te verilmiştir. NB grubu için işlem süresinin  $\mu=7,068$  saat ve  $\sigma=0,411$  olan normal dağılıma uyduğu görülmektedir.



Şekil 3. NB Grubu İşlem Süreleri Dağılımı

NB grubu için işlem süresinin ortalama 7 saat olup olmadığını belirlemek için hipotez testleri gerçekleştirilmiştir:

$H_0$ : NB grubu için işlem süresi ortalaması 7 saattir. ( $\mu=7$ )

$H_a$ : NB grubu için işlem süresi ortalaması 7 saatten farklıdır. ( $\mu \neq 7$ )

Şekil 4'te görüldüğü gibi,  $p > 0,05$  olduğundan  $H_0$  reddedilememiştir. % 5 anlam düzeyinde NB grubu için işlem süresi ortalamasının 7 saat olduğu kabul edilebilir.

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	Z	P
NB	100	7.0684	0.4113	0.0500	(6.9704; 7.1664)	1.37	0.171

Şekil 4. NB Grubu İşlem Süresi Ortalaması Hipotez Testi

İşletmede mevcut olan 13 farklı renk grubu, çalışmamızda Şekil 5'te görüldüğü gibi 5 gruba indirgenmiştir. İşler için geçiş hazırlık süresi bu 5 renk grubuna göre (Beyaz, Açık, Orta, Koyu, Siyah) değişmektedir.

Şekil 5. Kullanıcı Arayüzü Renk Grubu Listesi

Boyahane çalışanları ile yapılan görüşme sonunda, her bir grup geçişinde hazırlık süresinin 1 saat arttığı tespit edilmiştir. Öyle ki makinede boyanacak rengin beyaz olması, eğer bir önceki boyanan renk koyu ise hazırlık süresini uzatacaktır. Benzer bir yaklaşımla herhangi bir koyu renkten sonra olacak siyah boyamada, hazırlık süresi daha kısa olacaktır. Aşağıdaki tabloda bahsedilen beyaz optikli boyama olduğu için beyazdan siyaha geçiş ile siyahtan beyaza geçiş süresi eşit kabul edilmiştir. Optik boyayı sökmek zor olduğu için, beyazdan siyaha ve siyahtan beyaza geçişler istenen bir durum değildir. En küçük makine yıkama ya da hazırlık süresi için, her zaman yakın renkleri bir araya getiren açıktan koyuya ya da koyudan açığa göre bir sıralama tercih edilmektedir. Programdaki hazırlık süresi matrisi Tablo 11'de gösterilmiştir.

Uygulamada, Tablo 12'de gösterildiği gibi, son üç ayda alınan siparişlerin renk ve ürün grubu olasılıkları bulunarak bunlara paralel olarak 10 sipariş üretilmek istenmiştir. Olasılık değerlerine göre, seçilmesi gereken ilk 5 siparişin, en büyük olasılıklara göre PPC ürün grubundan olduğu görülmektedir. İlk 5 sipariş dışındaki olasılıklar birbirlerine yakın olup, siparişlerin

çeşitlendirilmesi için ürün grubu bazında toplam olasılıklara bakılmıştır.

Örneğin; PCC grubu için toplam olasılık;  $0,027+0,021+0,026+0,024+0,028=0.126$ 'dır.

Bu nedenle sonraki iki sipariş PCC grubunda en yüksek olasılıklı renklerden seçilmiştir. Benzer şekilde, diğer gruplar için de (COT, NB, NS) en yüksek olasılığa sahip renk gruplarından 1'er adet sipariş belirlenmiştir.

Tablo 11

Renkler arası geçişlere göre hazırlık süresi (saat) matrisi

Sij	beyaz	açık	orta	koyu	siyah
beyaz	0	1	2	3	4
açık	1	0	1	2	3
orta	2	1	0	1	2
koyu	3	2	1	0	1
siyah	4	3	2	1	0

Tablo 12

Sipariş geliş olasılıkları ve seçilen işler

Grup	Renk	p- grup	p- renk	Pbağımsız	n:10 için	Seçilen işler
PPC	Siyah	0.627	0.215	0.135	1.35	1
PPC	Beyaz	0.627	0.166	0.104	1.04	1
PPC	Açık	0.627	0.206	0.129	1.29	1
PPC	Orta	0.627	0.192	0.120	1.20	1
PPC	Koyu	0.627	0.221	0.138	1.38	1
PCC	Siyah	0.125	0.215	0.027	0.27	1
PCC	Beyaz	0.125	0.166	0.021	0.21	0
PCC	Açık	0.125	0.206	0.026	0.26	0
PCC	Orta	0.125	0.192	0.024	0.24	0
PCC	Koyu	0.125	0.221	0.028	0.28	1
COT	Siyah	0.113	0.215	0.024	0.24	0
COT	Beyaz	0.113	0.166	0.019	0.19	0
COT	Açık	0.113	0.206	0.023	0.23	0
COT	Orta	0.113	0.192	0.022	0.22	0
COT	Koyu	0.113	0.221	0.025	0.25	1
NB	Siyah	0.090	0.215	0.019	0.19	0
NB	Beyaz	0.090	0.166	0.015	0.15	0
NB	Açık	0.090	0.206	0.019	0.19	0
NB	Orta	0.090	0.192	0.017	0.17	0
NB	Koyu	0.090	0.221	0.020	0.20	1
NS	Siyah	0.046	0.215	0.010	0.10	0
NS	Beyaz	0.046	0.166	0.008	0.08	0
NS	Açık	0.046	0.206	0.009	0.09	0
NS	Orta	0.046	0.192	0.009	0.09	0
NS	Koyu	0.046	0.221	0.010	0.10	1

Belirlenen 10 sipariş için veri havuzu Şekil 6'daki gibidir.

[Kayıt Bilgileri]					[Çözüm kümesi]	
Ürün grubu	Renk	Termin (Saat)			1.Makina	
PCC	Siyah	6	Kaydet		1, 2, 3, 9, 7	
					2.Makina	
					10, 5, 4, 6, 8	
					Amaç Fonksiyonu	
					f1=8, f2=24	
Kayıt No	Substrate	Renk	Termin (sa.)	Pros.Süresi		
8	HB	Koyu	8	7		
7	COT	Koyu	6	6		
10	PCC	Siyah	6	5		
6	PCC	Koyu	4	5		
9	NS	Koyu	6	4		
5	PPC	Siyah	6	3		
3	PPC	Orta	4	3		
2	PPC	Açık	3	3		
4	PPC	Koyu	6	3		
1	PPC	Beyaz	3	3		

Örnek Kayıtlar

Çalıştır

Şekil 6. Sipariş Veri Havuzu

Şekil 6'daki sipariş veri havuzu için, işletmenin mevcut çözümünde sipariş atamaları birinci makine için 4, 2, 9, 6, 7 ve ikinci makine için 10, 5, 1, 8, 3 olarak gerçekleşmiştir.

Bu çözüm için karşı gelen amaç fonksiyonu değerleri  $\sum U_j = 8$ ,  $C_{enb} = 29$ , amaç hesaplanmıştır.

İşletmede mevcut olan yaklaşım, blok planlama olarak adlandırılmakta, buna göre bir makineye bulunan tüm koyu, diğer makineye tüm siyah, veya tüm açık/beyaz renkler planlanacak şekilde gruplama yapılmaya çalışılmaktadır. Ancak makine dengelemesi yapılırken, blokların dengesiz dağılımları çizelgelemede değişikliklere neden olmaktadır.

Geliştirilen algoritma ile elde edilen iş sırası ise birinci makine için 1, 2, 3, 9, 7 ve ikinci makine için 10, 5, 4, 6, 8 olarak bulunmuştur.  $\sum U_j = 8$ ,  $C_{enb} = 24$ , olduğundan geliştirilen algoritma ile elde edilen çizelge mevcut çözümden daha başarılıdır. Geliştirilen algoritmada iş sayısı açısından herhangi bir kısıt olmadığından, firmada aktif olarak kullanılabilir durumdadır.

Algoritmada her adımda elde edilen iş sıraları ve karşı gelen amaç fonksiyonu değerleri bir metin dosyasına kaydedilmektedir. Bu kayıtlar grafiğe dökülerek, kullanıcının amaç fonksiyonundaki iyileştirmeleri izleyebilmesi mümkündür.

## 6. Sonuç ve Öneriler

Yapılan çalışmada ele alınan problem, sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu özdeş paralel makine çizelgeleme problemidir. Ele alınan problem için çok amaçlı bir matematiksel model ve bir TB algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen TB algoritması ile ele alınan çizelgeleme problemi çözülmüş ve elde edilen çizelgeler matematiksel modelin GAMS/Cplex ile çözümüyle elde edilen ve işletmenin mevcut çizelgeleri ile karşılaştırılmıştır.

Uygulama yapılan firmadan alınan veriler özdeş makine gruplarının bir bölümüne aittir. Bu bölümde yapılan işlemler, işlem süreleri ve hazırlık süreleri detaylı olarak incelenmiş hem geciken iş sayısı hem de enbüyük

tamamlanma süresi enküçülenmiştir. Uygulama sonuçları değerlendirildiğinde TB algoritmasının kayda değer oranda başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Müşteri siparişlerinin, renge göre blok planlaması ve en erken termine göre çizelgelendiği firmada, önerilen çözüm yönteminin, firmanın servis hedeflerine ulaşması için yardımcı olacağı açıktır.

Gelecekte, ele alınan problem TB dışında başka meta-sezgisel yaklaşımlarla da çözümlenerek karşılaştırmaları yapılabilir. Ayrıca yapılacak çalışmalarda, müşteri önceliklerinin ve mevcut makine kuyruklarının ele alınması da mümkündür. Son olarak müşterilere daha sağlıklı termin belirlemek adına çalışmalar yapılabilir. Örneğin, işler arası geçiş süreleri için geçmişe dayalı öğrenme algoritmaları yazılarak müşterilere verilen terminlerde daha gerçekçi süreler ulaşılabilir.

## Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada Çiğdem ŞENBAY; konunun belirlenmesi, literatür araştırması, firmadaki uygulama, ve sezgisel algoritmanın geliştirilmesi konularında; Tuğba SARAÇ ve Ezgi AKTAR DEMİRTAŞ, literatür araştırması, matematiksel modelin oluşturulması, test problemlerinin türetilmesi ve istatistiksel analiz konularında katkı sağlamışlardır.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

- Afzalirad, M. & Rezaeian, J. (2016). Resource-constrained unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times, precedence constraints and machine eligibility restrictions. *Computers and Industrial Engineering*, 98, 40-52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.05.020>
- Akyol, E. ve Saraç T. (2017). Paralel makina çizelgeleme problemi için bir karma tamsayı programlama modeli: ortak kaynak kullanımı. *Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 5(3), 109-126.
- Akyol, E. (2013). *Hazırlık süreli, makine uygunluk kısıtları ve ortak kaynak olduğu sıra bağımlı paralel makine çizelgeleme problemi için model etkileşimli genetik algoritma* (Yüksek lisans tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Chen, C.L. & Chen, C.L. (2008). Hybrid metaheuristics for unrelated parallel machine scheduling with sequence-dependent setup times. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 43,

- 161-169. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1692-1>
- Chen, Z.L. & Powell, W.B. (2003). Exact algorithms for scheduling multiple families of jobs on parallel machines. *Naval Research Logistics*, 50, 823-840. doi: <https://doi.org/10.1002/nav.10091>
- Cura, T. (2008). *Modern sezgisel teknikler ve uygulamaları*, Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Gupta, J.N.D. & Torres, A.J.R. (2005). Generating efficient schedules for identical parallel machines involving flow-time and tardy jobs. *European Journal of Operational Research*, 167, 3, 679-695. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.015>
- Hamzadayı, A. & Yıldız, G. (2017). Modeling and solving static m identical parallel machines scheduling problem with a common server and sequence dependent setup times. *Computers & Industrial Engineering*, 106, 287-298. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.02.013>
- Kang, Y.H. & Shin, H.J. (2010). An adaptive scheduling algorithm for a parallel machine problem with rework process. *International Journal of Production Research*, 48, 1, 95-115. doi: <https://doi.org/10.1080/00207540802484903>
- Kaya, S. ve Karaçizmeli, İ.H. (2018). Hazırlık zamanlı ortak teslim tarihli özdeş paralel makine çizelgeleme problemlerinin çok amaçlı çözümü. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 205-213.
- Kim, Y. & Kim, H.J. (2020). Rescheduling of unrelated parallel machines with job-dependent setup times under forecasted machine breakdown. *International Journal of Production Research*. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1775910>
- Kirkpatrick, S. Gelatt, C.D. & Vecchi, M.P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, 4598.
- Lee, K. Lei, L. & Pinedo, M. (2012). Production scheduling with history-dependent setup times. *Naval Research Logistics*, 59, 58-68. doi: <https://doi.org/10.1002/nav.21472>
- Lin, B.M.T & Jeng, A.A.K. (2004). Parallel-machine batch scheduling to minimize the maximum lateness and the number of tardy jobs. *International Journal of Production Economics*, 91(2), 121-134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.07.003>
- Lin, S.W. Lee, Z.J., Ying, K.C. & Lu, C.C. (2011). Minimization of maximum lateness on parallel machines with sequence-dependent setup times and job release dates. *Computers and Operations Research*, 38, 809-815. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.09.020>
- Lin, Y.K. Fowler, J.W. & Pfund, M.E. (2013). Multi-objective heuristics for scheduling unrelated parallel machines. *European Journal of Operational Research*, 227, 2, 239-253. doi: [10.1016/j.ejor.2012.10.008](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.10.008)
- Lin, S.W. & Ying, K.C. (2015). A multi-point simulated annealing heuristic for solving multiple objective unrelated parallel machine scheduling problems. *International Journal of Production Research*, 53, 4, 1065-1076. doi: [10.1080/00207543.2014.942011](https://doi.org/10.1080/00207543.2014.942011)
- Logendran, R. McDonell, B. & Smucker, B. (2006). Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setups. *Applied Mathematics and Computation*, 181, 2, 1008-1017. doi: [10.1016/j.amc.2006.02.006](https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.02.006)
- Metropolis, N. Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H. & Teller, E. (1958). Equations of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21, 1087-1092. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1699114>
- M'Hallah R. & Bulfin, R.L. (2003). Minimizing the weighted number of tardy jobs on parallel processors. *European Journal of Operational Research*, 160, 471-484. doi: [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00114-4](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00114-4)
- M'Hallah R. & Al-Khamis, T. (2015). A Benders decomposition approach to the weighted number of tardy jobs scheduling problem on unrelated parallel machines with production costs. *International Journal of Production Research*, 53, 19, 5977-5987. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1033501>
- Moghaddam, R.T. Taheri F., Bazzazi, M., Izadi M. & Sassani, F. (2009). Design of a genetic algorithm for bi-objective unrelated parallel machines scheduling with sequence-dependent setup times and precedence constraints. *Computers and Operations Research*, 36, 3224-3230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.02.012>
- Nelson, R.T. Sarin, R.K. & Daniels, R.L. (1986). Scheduling with multiple performance measures: The one machine case. *Management Science*, 32, 4, 464-479. doi: <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.4.464>
- Özsüt, Z. (2015). *Konteynır yükleme problemleri için matematiksel modeller ve çözüm yöntemleri* (Yüksek Lisans tezi). Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Pinedo, M. (2002). *Scheduling theory, algorithms and systems*, Prentice Hall, 2nd Edition, New Jersey.
- Reeves, C.R. (1995). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*, Mc Graw-Hill, UK.
- Sarıççek, İ. (2020). Multi-objective scheduling by maximizing machine preferences for unrelated parallel machines. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38, 1, 405-420.